



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS ARMÓNICO DE LA ZONA CIUDAD DEL CARMEN POR LA
INCORPORACIÓN AL SISTEMA DE 115 KV DE LOS BANCOS DE
CAPACITORES DE 7.5 MVAR EN LA SUBESTACIÓN CONCORDIA Y
15 MVAR EN LA SUBESTACIÓN CIUDAD DEL CARMEN.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO
P R E S E N T A
ROSA MILAGROS BARRAZA ROJAS



Asesor de Tesis: ING. Francisco Cuevas Arteaga

MÉXICO, D. F.

2010



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.

AGRADECIMIENTOS

★ *A Dios:*

Por permitirme llegar hasta este momento de mi vida y lograr otra meta más en mi carrera.

★ *A Mi Mama:*

Por darme la vida, por su cariño y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

★ *A mi esposo él Ing. Erick Estrada:*

Por su amor, comprensión y constante estímulo, gracias por estar siempre conmigo y compartir todas mis metas y ser parte de mi vida.

★ *A mi asesor el Ing. Francisco Cuevas por su tiempo y paciencia durante la elaboración de esta tesis.*

★ *A la Ing. Mónica Mónico:*

Por su apoyo en la realización de este trabajo.

★ *A mis Hijos Carol y Erick:*

Por su sonrisa cada mañana que me da la fuerzas para superarme y la alegría para vivir feliz cada día de mi vida.

★ *A todas las personas que siempre han estado apoyándome en el transcurso de mi vida gracias.*

ÍNDICE

Capítulo I	Introducción a las corrientes y voltajes Armónicos	3
Capítulo II	Fuentes corrientes de Armónicos	13
Capítulo III	Efectos de las corrientes y voltajes Armónicos en el Sistema Eléctrico de Potencia	46
Capítulo IV	Dimensionamiento, Operación y Protección de Banco de Capacitores.	83
Capítulo V	Diagrama Unifilar Del Sistema.	106
Capítulo VI	Análisis Armónico de la Zona Ciudad del Carmen, Área Peninsular.	107
	Conclusiones del Análisis Armónico.	125
	Anexos	127
	Bibliografía.	128

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN A LAS CORRIENTES Y VOLTAJES ARMÓNICOS

En un sistema eléctrico de potencia (SEP) ideal, el voltaje (tensión) suministrado a los usuarios y la corriente de carga son ondas perfectamente senoidales, en la práctica, sin embargo, las condiciones nunca son ideales, así que las formas de onda son a veces bastante distorsionadas.

La desviación de la senoide perfecta se expresa en términos de *Distorsión Armónica (DH)* de las formas de onda de corriente y voltaje.

La Distorsión Armónica (*DH*), anteriormente fue causada por la saturación magnética de transformadores o por ciertas cargas industriales, tales como hornos de arco eléctrico ó soldadoras. Los efectos de las armónicas se dieron en las máquinas síncronas y de inducción, en interferencia telefónica y fallas en capacitores de potencia. En el pasado, problemas armónicos fueron tolerados por el diseño conservador del equipo y por las conexiones delta-estrella aterrizada de los transformadores.

Actualmente, se ha incrementado la instalación de cargas no lineales (convertidores estáticos de potencia aplicados a controladores de velocidad, equipo controlado por computadoras, trenes eléctricos, soldadoras, hornos de arco eléctrico, molinos, remachadoras, tv`s, taladros, hornos de microondas, lámparas electrónicas y de arco, etc.), la mayoría, cargas no lineales operan a bajo factor de

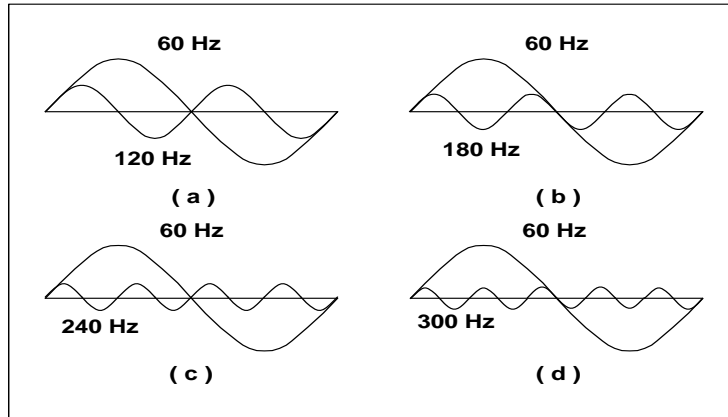
potencia (FP), por lo que se tienen que compensar los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), instalando bancos de capacitores en plantas industriales, comerciales y sistemas de distribución de las empresas suministradoras, con lo que se busca mejorar el FP, reduciendo las pérdidas y obteniendo una mejor regulación de voltaje. Con la instalación de un banco de capacitores se da origen a la resonancia paralelo entre la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva de la fuente que da como resultado corrientes oscilatorias de gran magnitud y consecuentemente altos voltajes armónicos.

Reconociendo que muchas nuevas cargas que están siendo conectadas a los sistemas eléctricos (tales como pc's) son sensibles a la distorsión armónica, los problemas armónicos deberán ser estudiados y tomados en consideración durante la planeación de los sistemas eléctricos, ya que afectan tanto a empresas industriales y comerciales como de suministro eléctrico.

Definición de Armónica: El término Armónica se origina en el campo de la acústica, y se refiere a la vibración de una cuerda o columna de aire a una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia de repetición básica (fundamental). Similarmente para señales eléctricas una armónica es definida como una componente senoidal de una onda periódica cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

Así en sistemas de potencia de 60 Hz, una onda armónica es una senoide que tiene una frecuencia expresada por: $f_{\text{armónica}} = n \times 60 \text{ Hz}$.

Donde: n es un entero y es el orden de armónica.



La Fig. 1.1. Muestra una onda senoidal de 60 Hz y su a)2ª, b)3ª, c)4ª Y d)5ª Armónica.

✚ Característica de la Distorsión Armónica (DH) composición de una onda distorsionada.

La Fig.1.2 Muestra el efecto de superposición de una onda armónica sobre la fundamental. Cuando la onda e_1 de 60 Hz (de 1 pu de magnitud) se combina con la onda e_2 que es la tercera armónica en fase con la fundamental (de magnitud 0.3 pu) y da como resultado una forma de onda distorsionada e_r con la misma frecuencia que la fundamental.

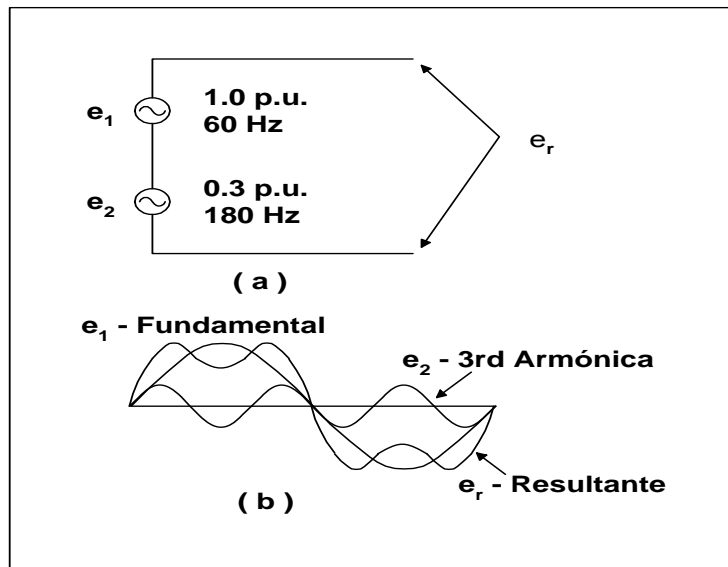


Fig. 1.2. (a) Circuito, (b) Onda Resultante (e_r) Obtenida de la superposición de la 3ª armónica (e_2) En fase sobre la fundamental (e_1).

Usando otras frecuencias armónicas y otras amplitudes, podemos producir una forma de onda distorsionada de alguna onda concebible. Por ejemplo la onda periódica cuadrada de la fig. 1.3 es creada por la superposición de un número infinito de armónicas impares (con amplitudes decrecientes) sobre la fundamental de 1 pu de magnitud. La n ésima armónica (donde n es un entero impar) tiene una frecuencia de $60 n$ y una amplitud de $1/n$ en pu's de la amplitud fundamental.

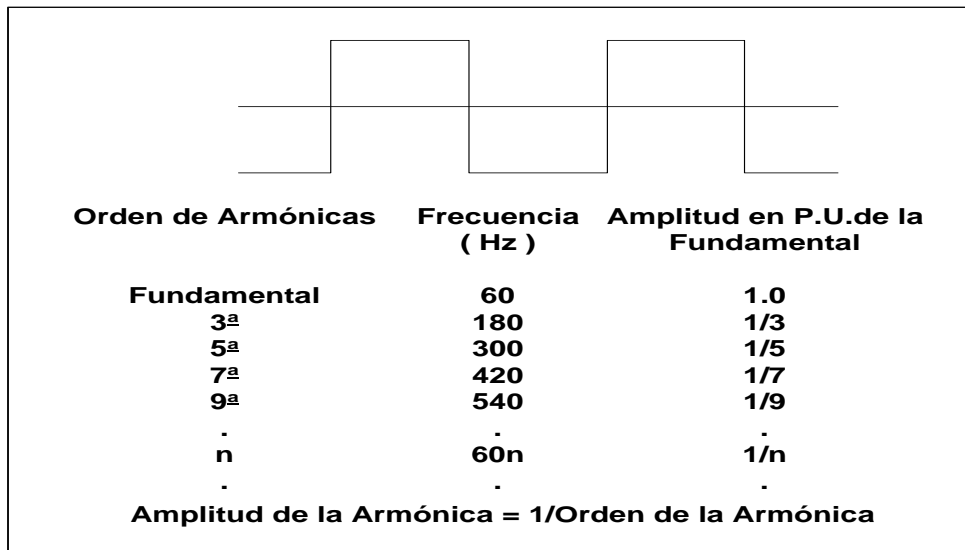


Fig.1.3. Onda cuadrada creada por la superposición de un número infinito de armónicas impares sobre la fundamental de 1 p.u.

🔧 Descomposición de una onda distorsionada.

Así como una forma de onda periódica distorsionada puede ser compuesta, ésta también puede ser descompuesta en una onda fundamental y sus armónicas.

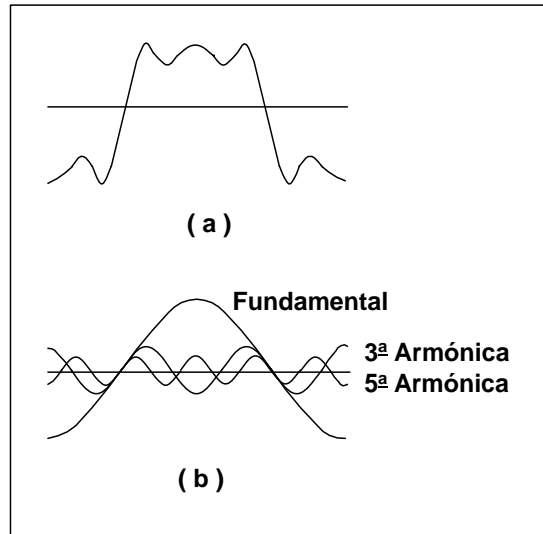


Fig. 1.4. (a) Onda Distorsionada, (b) Su descomposición en una fundamental y sus componentes armónicas.

La habilidad para descomponer alguna forma de onda periódica considerando su grado de distorsión, es significativa desde el punto de vista de análisis de sistemas, así se puede considerar separadamente cada componente senoidal de la onda distorsionada y sus componentes armónicas.

✚ POTENCIA FUNDAMENTAL Y ARMÓNICA.

En circuitos de C.A., el voltaje y la corriente fundamental producen potencia fundamental.

$$P_{\text{fund}} = V_{\text{fund}} I_{\text{fund}} \cos \theta_1 \quad (\text{Representa potencia útil})$$

Dónde θ_1 es el ángulo de fase entre V_{fund} e I_{fund} .

$P_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} I_{\text{arm}} \cos \theta_2$ (potencia armónica disipada en forma de calor, efecto indeseable, excepto en ciertos procesos industriales que requieren calor). Las corrientes y voltajes armónicos deberán ser tan pequeños como sea posible.

✚ RELACIÓN ENTRE COMPONENTES ARMÓNICOS Y DE SECUENCIA

Cuando las armónicas son generadas en sistemas trifásicos, ellas pueden ser analizadas en términos de componentes de secuencia. En una red balanceada donde todas las armónicas son el resultado de la distorsión balanceada trifásica de los voltajes de secuencia positiva, hay un patrón que relaciona las armónicas con su correspondiente secuencia, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1- Relación entre secuencia de fase y orden armónico

Sec de fase	Positiva	Negativa	Cero
Orden de	1	2	3
La	4	5	6
Armónica	7	8	9

En la fig.1.5. Se muestra que las corrientes o voltajes fundamentales están balanceados, además, la 3^a armónica de la fase "a", la 3^a armónica de la fase "b" y la 3^a armónica de la fase "c," están en fase entre ellas y son de igual magnitud (sec 0), las componentes de 5^a armónica de las tres fases, están fuera de fase entre ellas por 120 grados, con una secuencia a,c,b (secuencia negativa).

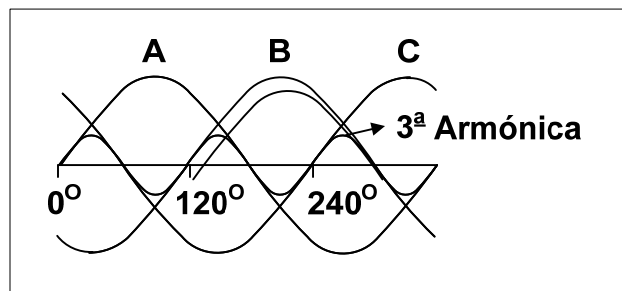


Fig. 1.5. Corrientes o voltajes trifásicos balanceados con 3^a armónica,

La 5ª armónica es importante cuando se considera el comportamiento de motores y generadores ya que causa calentamiento en el rotor y par negativo en las máquinas. La tabla 1. Muestra la secuencia dominante correspondiente a cada armónica

✚ FACTOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICO (DF).

El factor de distorsión o factor armónico expresa la cantidad de distorsión armónica contenida en la onda distorsionada y es determinado por la siguiente ecuación:

$$DF(\%) = \frac{\sqrt{\text{SUMA DE LOS CUADRADOS DE TODAS LAS AMPLITUDES ARMÓNICAS}}}{\text{AMPLITUD DE LA FUNDAMENTAL}} \times 100$$

Para ilustrar la aplicación de ésta ecuación, considere la forma de onda distorsionada de corriente de la fig.1.6.

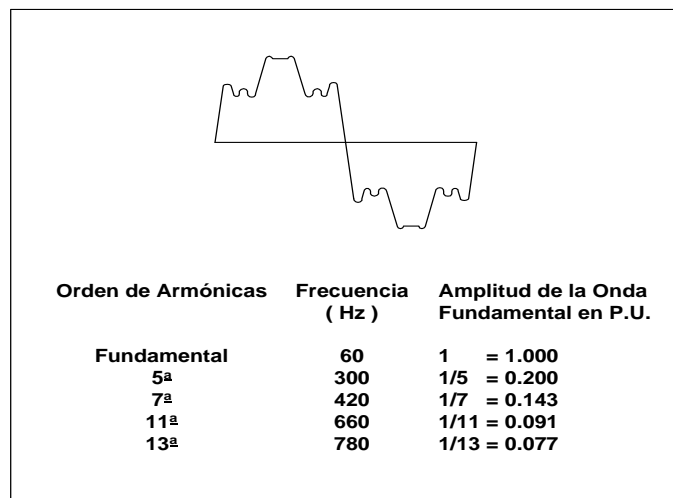


Fig. 1.6. Contenido armónico de una onda distorsionada.

$$DF = \frac{\sqrt{(0.2)^2 + (0.143)^2 + (0.091)^2 + (0.077)^2}}{1.0} \times 100 = 27\%$$

✚ IMPORTANCIA DE LOS ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS.

Los problemas de distorsión fueron observados por el personal de operación de empresas suministradoras (1910) y dicha distorsión fue causada por cargas no-lineales conectadas a los sistemas de distribución de las empresas suministradoras. Por ejemplo, un horno de arco eléctrico es una carga no lineal que demanda corrientes no senoidales (ricas en armónicos). En el pasado, las armónicas a menudo fueron mitigadas con el uso de los transformadores con conexión delta-estrella aterrizada. Actualmente es necesario resolver problemas de armónicas por tres razones principales:

- 1.- El uso de convertidores estáticos de potencia (CEP) han proliferado recientemente. (convertidores estáticos de potencia se refiere a dispositivos semiconductores que convierten potencia de una frecuencia a otra.)
- 2.- Las resonancias de red se han incrementado.
- 3.- El equipo del sistema eléctrico de potencia y las cargas son más sensibles a las armónicas.

La mayor aplicación de los CEP, es en controladores de velocidad para motores que incrementan la eficiencia y mejoran el control de la velocidad. En la mayoría de las aplicaciones, las cargas con CEP demandan corrientes del sistema, que consisten de pulsos positivos y negativos, separados por intervalos de corriente cero.

Las armónicas generadas por el CEP se propagan a través del sistema causando la distorsión de voltaje en el bus remoto y las corrientes distorsionadas fluyen en

los circuitos de carga. La fig. 1.7 ilustra el efecto remoto causado por una fuente de armónicos en el sistema, este CEP, genera: 5^a, 7^a, 11^a y 13^a corrientes armónicas dominantes, el problema de armónicos con frecuencia se agrava con la tendencia a instalar bancos de capacitores para mejorar el FP y/o controlar voltaje.

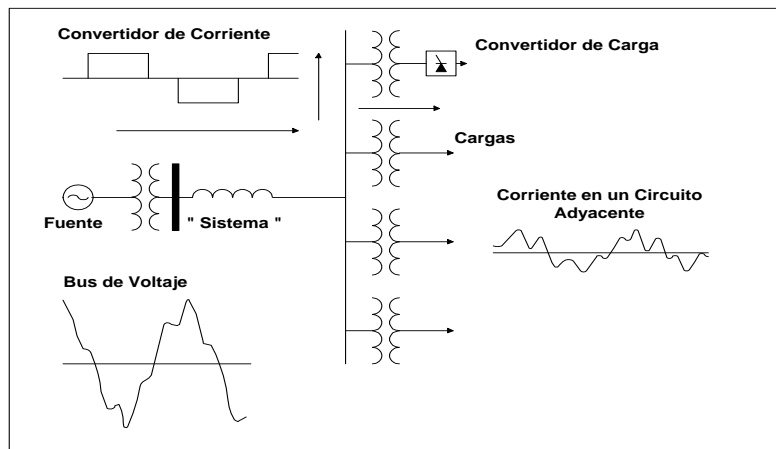


Fig. 1.7. Propagación de corrientes y voltajes armónicos a través del sistema de potencia.

Si una corriente armónica es inyectada (de una frecuencia cercana a la frecuencia de resonancia), una gran corriente de oscilación fluirá y causará fusión de fusibles y altos voltajes armónicos.

Los problemas con armónicas en la actualidad tienen consecuencias más serias y más extendidas que en el pasado, ya que los equipos utilizados son más sensibles a las armónicas, como ejemplos:

1.- Computadoras, máquinas herramienta controladas por computadoras y varios tipos de controladores digitales, son susceptibles a las armónicas.

2.- Las armónicas pueden dañar por calentamiento al dieléctrico de cables subterráneos.

3.- Las fallas en los bancos de capacitores con frecuencia se deben a los armónicos.

4.- Los armónicos pueden ser las causantes de problemas en las comunicaciones.

5.- Diseños modernos de generadores y transformadores, agravan los problemas térmicos causados por armónicas.

CAPITULO II

FUENTES DE CORRIENTES ARMÓNICOS

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

Los convertidores estáticos de potencia (CEP) presentan la categoría más grande de los dispositivos que producen armónicas en el sistema eléctrico de potencia. Los convertidores oscilan desde enormes subestaciones inversoras de 1000 MW para líneas HVDC (High Voltage DC) hasta rectificadores de 75 W encontrados en una televisión. Otras fuentes no lineales de armónicos incluyen dispositivos de arco tales como hornos de arco, impedancia magnetizante de transformadores y luces fluorescentes.

La corriente armónica ocasionada por las fuentes no lineales pueden ocasionar la distorsión armónica en el voltaje del sistema y problemas para otros dispositivos. El diodo es el elemento básico que describe el proceso de rectificación, las formas de onda de corriente y voltaje resultantes y la generación de armónicas. La característica importante del diodo, es su habilidad para discriminar entre los voltajes de directa e inversa. El diodo ideal es eléctricamente equivalente a un switch selectivo que es cerrado para voltajes en directa y abierto para voltajes en inversa.

Equipos que producen armónicos: convertidores electrónicos de potencia, equipos de computación, control de luminarias, ups, variadores estáticos de velocidad, plc's, control de motores, televisores, microondas, fax, fotocopiadoras, impresoras, etc.

Equipos con arqueo de electricidad: hornos de fundición, balastos electrónicos, equipos de soldadura eléctrica, sistemas de tracción eléctrica.

Equipos ferromagnéticos: transformadores operando cerca del nivel de saturación, balastos magnéticos.

✚ Rectificadores Monofásicos.

En rectificadores se toma la característica no-lineal de un diodo para convertir corriente alterna a corriente unidireccional pero pulsante.

Los rectificadores de media onda y onda completa son usados en equipo doméstico (tv, vcr's, radios, maquinas de coser, taladros, pc's, lámparas etc.)

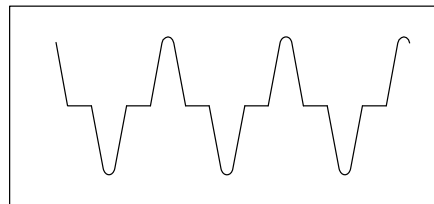


Fig. 2.1 Corriente demandada por los usuarios.

Los rectificadores de onda completa son muy comunes en pequeños equipos electrónicos (TVs, computadoras, stereos, etc). En el rectificador monofásico para corriente DC, los diodos actúan para cortar la mitad negativa de la onda sinusoidal, en el rectificador de onda completa de la figura 2.2, la corriente i_a fluye por los diodos 1 y 2 hacia la carga cuando el voltaje de la fuente está en su medio

ciclo positivo. Cuando se aplica el voltaje en inversa los diodos 3 y 4 conducen la corriente i_b a la carga y los diodos 1 y 2 no conducen (note sin embargo que la corriente a través de la carga esta siempre en la misma dirección).

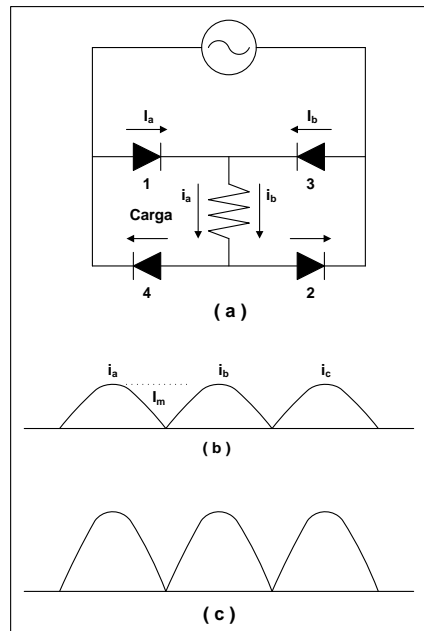


Fig.2.2 Rectificador 1 Φ de Onda Completa: (A) Diagrama del Circuito; (B) Corriente de Carga; (C) Voltaje de Carga.

Rectificador de media onda:

En la operación del rectificador de media onda el diodo experimenta un voltaje de directa cuando el voltaje de la fuente está en su ciclo positivo y conduce corriente a la carga resistiva durante el intervalo de (0° a 180°). Cuando el voltaje de la fuente está en su ciclo negativo de (180° a 360°) el diodo actúa como un switch abierto y no hay circulación de corriente hacia la carga.

En rectificadores de media onda de la figura 2.3, la corriente y el voltaje de carga son senoidales de medio ciclo, y la corriente directa demandada por la carga es aproximadamente el 30% del valor máximo de la corriente pulsante.

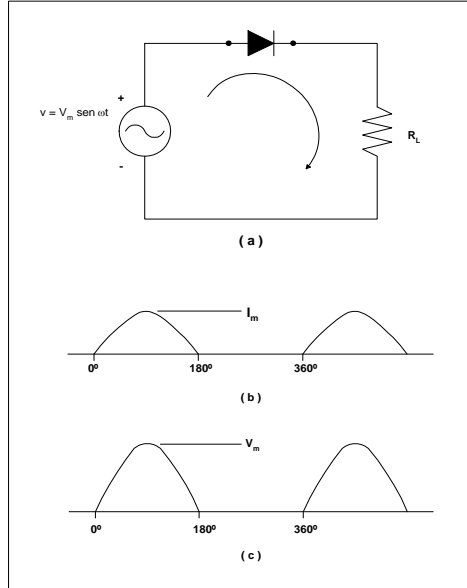


Fig. 2.3. Rectificador 1 Φ de Media Onda: (A) Diagrama del Circuito; (B) Corriente de Carga; (C) Voltaje de Carga

🔌 Convertidores Estáticos de Potencia.

Se considera el efecto de la inductancia del sistema, así como la reducción de las amplitudes de las armónicas de las amplitudes teóricas; también se describe el impacto del uso de los tiristores con la variación del ángulo de encendido para controlar el voltaje de salida del rectificador e inversor.

Efecto de la inductancia en el sistema. En el circuito del rectificador de la fig. 2.4 cuando la inductancia del sistema es incluida, el switcheo de corriente de un diodo a otro (llamado conmutación) no ocurre instantáneamente.

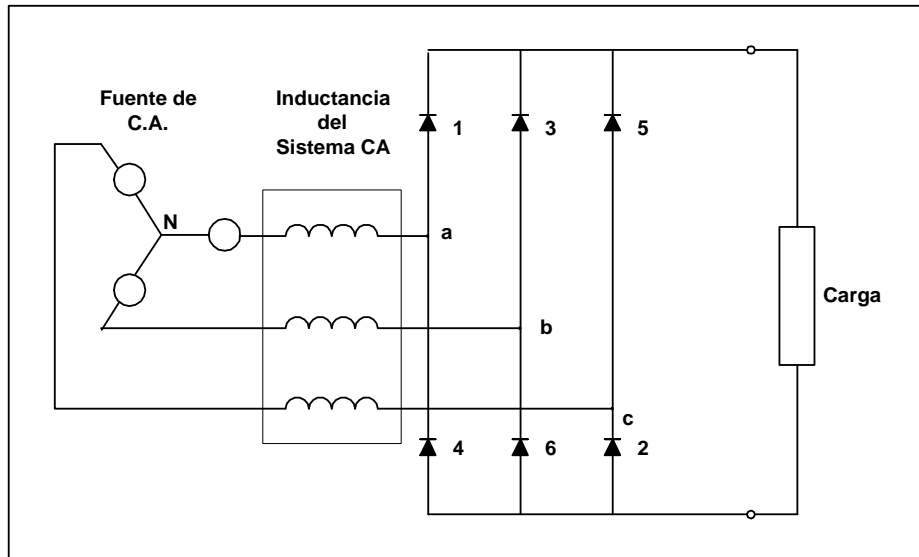


Fig. 2.4. Rectificador trifásico de seis pulsos con la inductancia del sistema de c.a.

Periodo de conmutación: En la fig. 2.4, la conmutación entre diodos es mostrada de manera gradual, en el punto donde el voltaje (línea a neutro) de la fase b empieza a ser más positivo que el voltaje (línea a neutro) de la fase a (indicado por la flecha) la corriente en el diodo 1 (corriente de la fase a) no puede cortar abruptamente sin un excesivo voltaje, $L di/dt$; además, la corriente del diodo 3 (corriente de la fase b) no puede incrementarse instantáneamente. La duración del período en el cual ambos diodos conducen es llamada período de conmutación y es denotado por una medida angular μ (ángulo de traslape).

Durante el período de conmutación hay un corto circuito entre fases (a y b) mientras está el corto circuito, el voltaje en el lado de CD es el promedio de voltaje de las dos fases de conducción. (I de carga = $I_{d1} + I_{d3}$ durante el período de conmutación). En la fig. 2.5, durante el período de conmutación se muestra que el voltaje de salida de C.D. es el promedio de los voltajes de las fases a y b, se nota que el efecto de traslape causa una reducción en el voltaje de C.D. entregado a la

carga, como lo muestran las áreas sombreadas, se nota también que la corriente del diodo 1 decrece y la del diodo 3 se incrementa por cantidades iguales, de manera que la suma de estas corrientes es igual a la corriente de carga (C.D.) durante el período de conmutación.

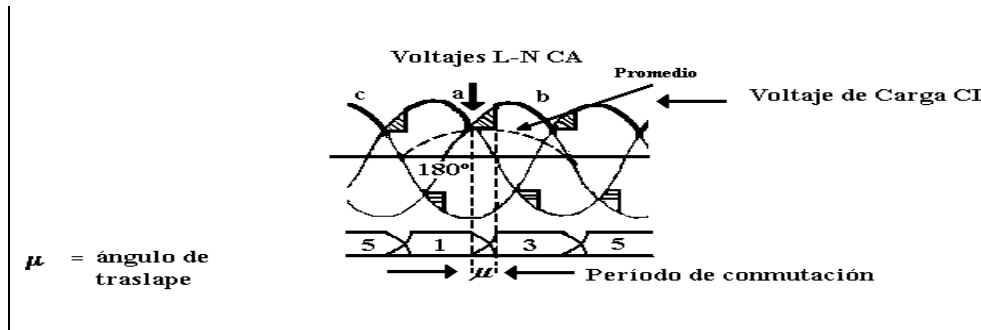


Fig. 2.5 Efecto Del Período De Conmutación En Voltaje De C.D. Aplicado A La Carga.

⚡ Notching o Ranura en la forma de onda de voltaje.

Es un disturbio repetitivo en la forma de onda de voltaje causada por el traslaje en la conducción de la electrónica de potencia (rectificadores, inversores y controladores de velocidad).

El efecto de la inductancia del sistema en el lado de C.A. del puente causa un disturbio en los voltajes entre fases conocidas como notching. La fig. 2.6 muestra los notchings que ocurren cuando 2 fases son corto-circuitadas durante el período de conmutación, esto es mostrado por los intervalos de voltajes entre fases igual a cero, un notching es mostrado en V_{ba} para el tiempo que los diodos 1 y 3 conducen; un notching es mostrado en V_{ac} para el tiempo que los diodos 2 y 4 conducen.

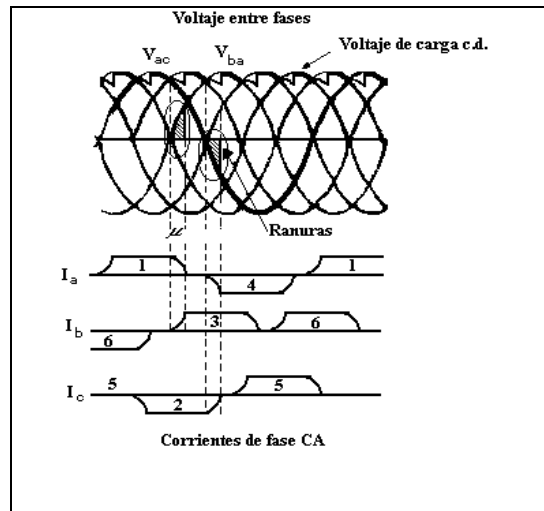


Fig. 2.6 Efecto del período de conmutación en los voltajes entre fases de CA.

El tiempo de conmutación (μs) es el ancho de la ranura o notching, la corriente demandada por cargas de gran capacidad (tales como controladores de velocidad grandes) tiene períodos de conmutación más largos (con inductancia de la fuente constante) y por lo tanto, producen ranuras más anchas. En la fig. 2.6 muestra que las corrientes de alterna por fase consisten de pulsos de corrientes positivos y negativos, separados por intervalos de corriente cero, pero note que los bordes son redondeados por el efecto de la inductancia del sistema.

La probabilidad en la existencia de problemas por Notching depende de:

1. -La robustez del sistema de C.A. (sistemas más robustos son menos afectados)
2. -Capacidad del rectificador estático (rectificadores de gran capacidad es más probable que ocasionen problemas).
3. -Presencia del equipo sensible en el mismo circuito.

✚ Uso de Tiristores

Un tiristor puede ser considerado como un diodo con conducción controlada. Igual que el diodo, el tiristor tiene un ánodo (A) y un cátodo (K), pero posee una tercera terminal, una compuerta o gate (G).

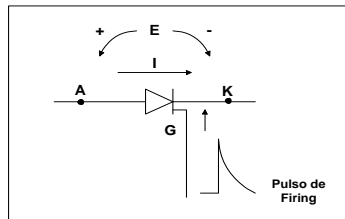


Fig. 2.7 Símbolo del tiristor y pulso de encendido.

Si la compuerta es conectada al cátodo, el tiristor no conducirá aunque el voltaje del ánodo sea positivo con respecto al cátodo. Bajo estas circunstancias se dice que el tiristor está bloqueado. Para iniciar la conducción, se deben cumplir dos condiciones: El tiristor debe estar en directa y un flujo de corriente debe penetrar en el gate durante unos cuantos segundos.

En la práctica, la corriente es inyectada por la aplicación de un corto pulso de voltaje positivo (pulso de encendido) en la compuerta. Tan pronto como se inicia la conducción la compuerta pierde toda la característica de control, parando la conducción sólo cuando la polaridad del voltaje esté en inversa, después la compuerta ejerce nuevamente el control, así el tiristor se comporta de la misma manera que el diodo excepto que el gate permite iniciar la conducción en ciertos tiempos predeterminados. A simple vista, esta característica tiene una insignificante ventaja, sin embargo, tiene una gran importancia ya que la conducción controlada del tiristor permite ajustar el voltaje de salida del rectificador y que la conducción sea iniciada de tal forma que el rectificador se comporte como

un inversor convirtiendo CD a CA. La fig. 2.8. Ilustra el efecto del uso de tiristores en lugar de diodos en el arreglo del puente, si el pulso de encendido al gate de cada tiristor es retardado por el mismo ángulo α , el voltaje de salida resultante es reducido (como se indica con la línea gruesa).

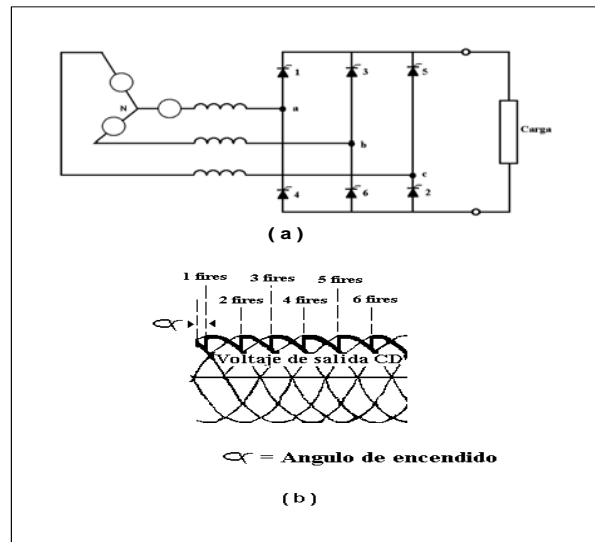


Fig.2.8 Rectificador trifásico de seis pulsos: A) Diagrama del circuito con tiristores; (B) Voltaje entre fases de C.A. mostrando el efecto de retardo del ángulo de encendido en el voltaje de C.D.

⚡ Armónicas en Sistemas de Corriente Alterna

Los convertidores estáticos de potencia inyectan armónicas hacia el sistema de CA, porque ellos demandan corrientes no senoidales (compuestas por una fundamental más componentes armónicas) de la fuente de alimentación CA. En la fig. 2.9 se ilustran las armónicas características generadas por la mayoría de los convertidores estáticos de potencia de hoy.

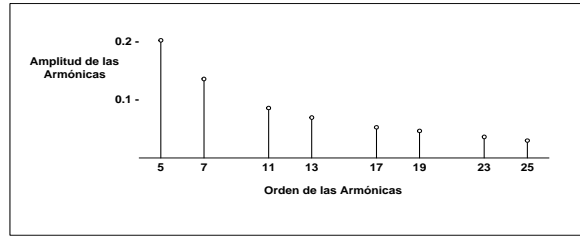


Fig. 2.9 Corrientes de armónicos característicos de un convertidor trifásico de seis pulsos.

Las armónicas características cumplen con la siguiente ecuación general:

$$h = kq \pm 1$$

Donde: h es el orden armónico,

k es un entero

q el número de pulsos

🚧 Curvas del Factor de Reducción.

La cantidad de los componentes armónicos de corriente reducidos puede ser estimada de curvas similares a las de la fig. 2.10 para $\mu = 30^\circ$, estas gráficas dan un factor de reducción en función del ángulo de traslape en la conmutación. Bajo condiciones de plena carga típicas, el ángulo de traslape es de 20° a 25° .

Tomando la 7ª armónica como ejemplo, se obtiene un factor de reducción del 0.75 para un traslape de 20° , por lo tanto, el valor práctico de la amplitud de la 7ª armónica es sólo el 75% del valor teórico de $1/7^{\text{th}}$. La contribución esperada de la corriente de 7ª armónica en un sistema es del 11% de la amplitud de la corriente

fundamental. A mayores grados de ángulo de traslape, las amplitudes de los armónicos dominantes tienden a disminuir, como se ilustra en la fig. 2.11.

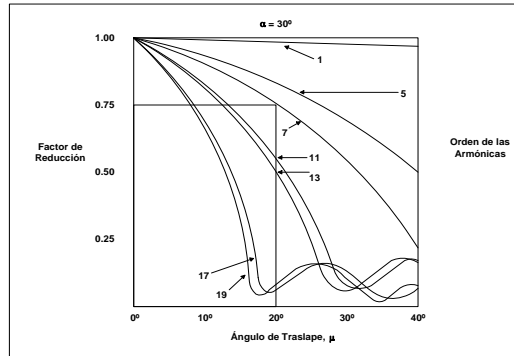


Fig. 2.10 Factores de reducción para una $\alpha = 30^\circ$.

Para $\alpha = 30^\circ$ y $\mu = 20^\circ$, la 7ª tiene un factor de reducción de 0.75, la 5ª un factor aproximado de 0.85.

Las amplitudes de los armónicos son mayores conforme α se aproxima a 90° .

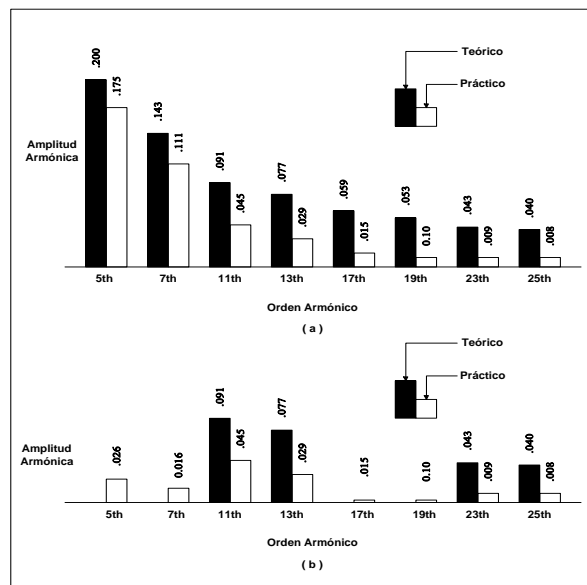


Fig. 2.11 corrientes armónicas teóricas y prácticas generadas por:
(A) Convertidor de 6 pulsos; (B) Convertidor de 12 pulsos.

🚧 Armónicas No Características

Hasta aquí sólo se han considerado las armónicas "características" que se producen bajo las condiciones "ideales" siguientes:

- 1) Pulsos de encendido en el puente igualmente espaciados.
- 2) Reactancia de conmutación balanceada entre fases.
- 3) Voltajes de bus de C.A. perfectamente balanceados.

Cualquier desbalance en el sistema o pulsos de encendido no uniformes originarán armónicas adicionales conocidas como "armónicas no características".

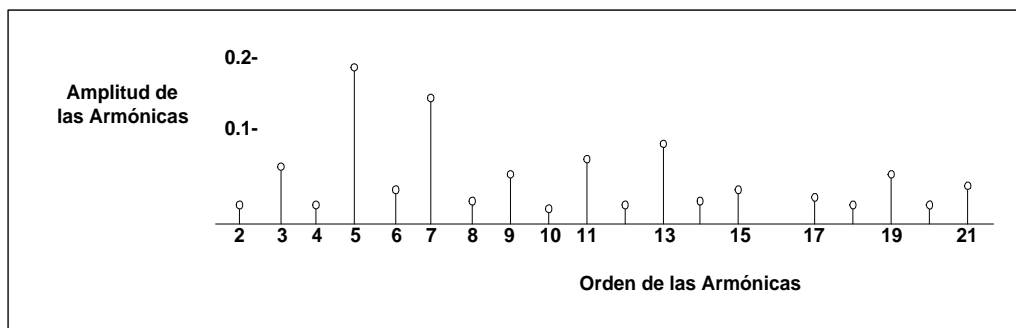


Fig. 2.12. Corrientes Armónicas No Características generadas por un convertidor trifásico de seis pulsos.

🚧 Convertidores de potencia de gran capacidad.

Las fuentes más grandes de armónicas son los convertidores como los utilizados en las industrias electroquímica y electrometalúrgica y controladores de velocidad de motores de gran capacidad usados en una gran variedad de aplicaciones industriales, estos CEP incluyen las estaciones convertidores de transmisión de corriente directa en alta tensión (HVDC), su potencia nominal se especifica en MW y generalmente tiene mucha más inductancia en el lado de C.D. que en el lado de C.A., por lo que la corriente directa es prácticamente constante y el convertidor

actúa como una fuente de voltaje armónico en el lado de C.D. y como una fuente de corriente armónica en el lado de C.A.; más aún, con un sistema perfectamente simétrico, las corrientes resultantes son iguales en todas las fases.

Debido al problema potencial causado por estos equipos, se utilizan conexiones de transformadores con CEP'S multi-pulsos y filtros de armónicas.

Terminales HVDC:

Una aplicación común de los grandes convertidores estáticos de potencia es en los grandes sistemas de transmisión de corriente HVDC.

Por ejemplo, grandes grupos de sistemas utilizados en los E.U. y Canadá son conectados en HVDC para hacer más fácil la operación de todos los sistemas en sincronismos. En algunos casos la instalación del HVDC podría estar “espalda con espalda” con distancia pequeña o no, entre el rectificador y el inversor, ambos son convertidores de 6 o 12 pulsos.

La fig. 2.13, muestra un sistema de HVDC con dos CEP'S operados por tiristores, uno opera como rectificador y el otro como inversor, la corriente de CD fluye por la línea de transmisión (línea de 2 polos o bipolar), la potencia de DC puede ser cambiada rápidamente por el cambio en los ángulos de encendido de los tiristores de los CEP'S.

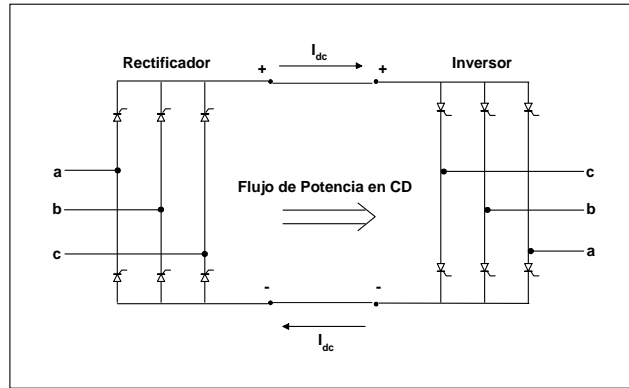


Fig. 2.13. Sistema simplificado de HVDC.

La dirección del flujo de potencia también puede ser inversa por ajuste en los ángulos de encendido de los tiristores de los CEP'S, donde el inversor opera como rectificador y el rectificador como inversor. La dirección del flujo de la corriente es la misma, sin embargo, el flujo de potencia es inverso.

Magnitudes típicas de un CEP de 12 pulsos es mostrado en la figura 2.14.

En una instalación HVDC con convertidores de 12 pulsos, los filtros de 5^a y 7^a armónicas pueden ser pequeños o eliminados.

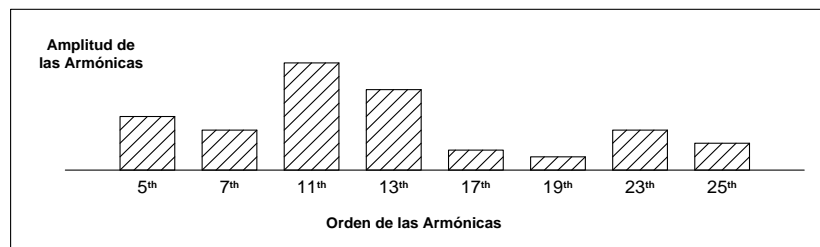


Fig. 2.14. Armónicas típicas en la corriente de alterna generados por un convertidor de 12 pulsos.

Una estación convertidora HVDC se muestra en la Fig. 2.15, usa un puente de 12 pulsos por polo, cada alimentación por un transformador convertidor y conectados en paralelo, filtros de armónicas son necesarios en ambos lados (de C.A. y C.D.),

un reactor de alisamiento ó de amortiguamiento es también insertado en serie con la línea de C.D. en cada terminal.

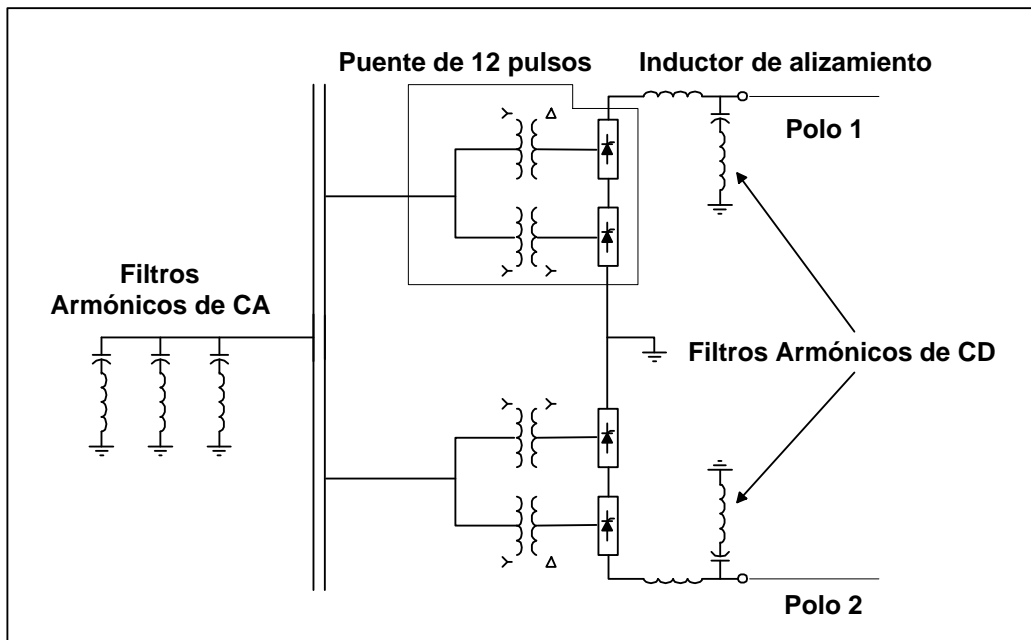


FIG. 2.15. Estación convertidora de HVDC con filtros tanto en C.A. como en C.D.

La estación convertidora HVDC controla grandes cantidades de potencia y cada puente de 12 pulsos está compuesto por muchos tiristores, conectados en combinaciones serie y paralelo para obtener el voltaje y corriente requeridos. Los grupos de tiristores, asociados con amortiguadores y circuitos de protección, son llamados "válvulas", cada estación convertidora podría contener algunos cientos de tiristores individuales.

Los transformadores de convertidores son especialmente diseñados para llevar niveles significativos de corriente armónica. Las armónicas generadas por los convertidores de 6 pulsos, en particular la 5^a y 7^a, circulan entre los dos transformadores, sin penetrar al resto del sistema de potencia de C.A. las

impedancias de los transformadores deben ser perfectamente balanceadas para reducir las armónicas no características y así mantener la simetría del puente de 12 pulsos.

Los filtros de CA consisten de circuitos individuales serie inductivo/capacitivo sintonizados a la frecuencia adecuada, frecuentemente, se requieren filtros para 5^a, 7^a, 11^{va}, y 13^{va} armónica. En adición, un filtro paso altas puede ser usado para filtrar armónicas de alta frecuencia. Un filtro de 12^{ava} armónica puede ser usado para minimizar los voltajes armónicos en el sistema de C.D.

Para minimizar armónicas se diseñan convertidores estáticos de potencia de 12 pulsos ó mayores. Estos arreglos de muchos pulsos ayudan a limitar las armónicas de menor orden, especialmente la 5^a y la 7^a, lo cual de otra manera tendrían grandes magnitudes.

Convertidores de Potencia de Mediana Capacidad.

El número de convertidores de mediana capacidad (de decenas de miles de kW) está creciendo rápidamente en la industria. Las primeras aplicaciones se basan en el control de velocidad para motores de C.D, que aún representa el mayor mercado para este tipo de convertidores. Sin embargo, el énfasis se está inclinando 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 el área de control de motores de C.A.

Muchos usuarios de motores eléctricos saben que los controladores de velocidad a base de convertidores estáticos de potencia proveen alta eficiencia, un control

de velocidad más precisa y menor mantenimiento que otros tipos de controladores de velocidad.

Por lo anterior, los controladores estáticos son ampliamente usados para todos los tipos de motores industriales, el uso principal de tales convertidores es como controladores de velocidad de motores de CA y de C.D.

Aunque prácticamente toda la energía eléctrica producida comercialmente es generada, transmitida y distribuida en potencia de alterna, una buena porción de esta energía es utilizada en la forma de CD.

Motores de CD son usados por todas partes en la industria para muchas aplicaciones especiales y son preferidos sobre los de CA cuando la carga del motor requiere de un alto par. Los motores de CD operan a relativa baja velocidad, tales como laminadoras, grúas, perforadoras, propulsores de barcos y locomotoras eléctricas. En todas estas aplicaciones el control de la velocidad es muy importante.

Controladores de Motores de CA.

Los controladores de velocidad de motores de C.A. son también usados en la industria, de hecho, los motores de inducción trifásicos son los más frecuentemente utilizados. Mientras los motores de C.D. se prefieren cuando se requieren bajas velocidades y altos pares, los motores de C.A. se emplean en aplicaciones de alta velocidad tales como bombas, ventiladores y compresores. Estos motores de inducción típicamente operan a velocidades de 1200, 1800, 3600 r.p.m. y mayores, los motores de C.A. son generalmente más robustos, requieren menos mantenimiento y son más baratos que los motores de C.D.

La velocidad del motor de C.A. es usualmente controlada por el ajuste del voltaje y la frecuencia, esto puede ser realizado con un controlador de C.A. de voltaje ajustable y frecuencia ajustable.

En la figura 2.16, el voltaje ajustable es suministrado por el rectificador, mientras la frecuencia ajustable por la sección inversora, el inversor es capaz de generar su propia frecuencia porque es un inversor de conmutación forzada, los elementos necesarios para la conmutación están incluidos dentro del mismo inversor.

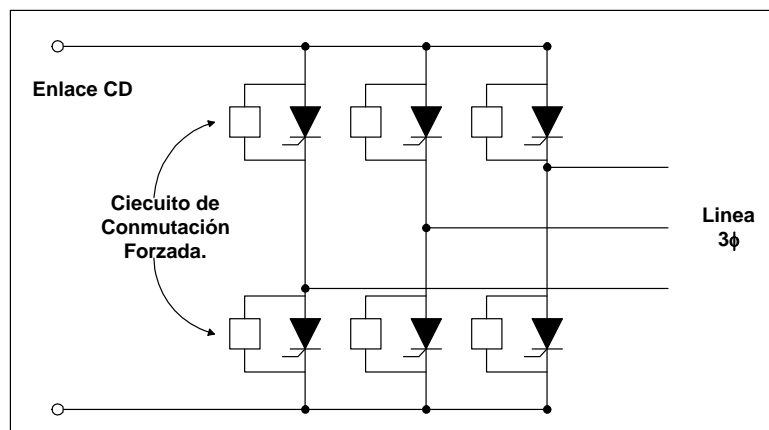


Fig. 2.16. Frecuencia ajustable suministrada por un inversor de conmutación forzada.

El inversor periódicamente switchea el voltaje de entrada de CD, en pulsos positivos y negativos a través de las líneas de carga del motor trifásico. Cuando el voltaje de C.D. incrementa ó decrementa, el voltaje de onda cuadrada suministrado al motor incrementará ó disminuirá también.

El controlador trifásico para motor de CD es un rectificador a base de tiristores de 6 pulsos, frecuentemente usado en maquinaria industrial donde un alto par es requerido.

Un típico controlador monofásico para motores de CD consiste de un rectificador monofásico de onda completa a base de tiristores, estos controladores son empleados en trenes eléctricos para controlar los motores de tracción de CD.

Las armónicas generadas por los controladores trifásicos para motores de CD y CA son las armónicas características de convertidores de 6 pulsos (5^a, 7^a, 11^{ava}, 13^{ava} Etc.) Las armónicas generadas por el controlador monofásico consiste de todas las armónicas impares (incluyendo los impares múltiplos de 3), 1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,....

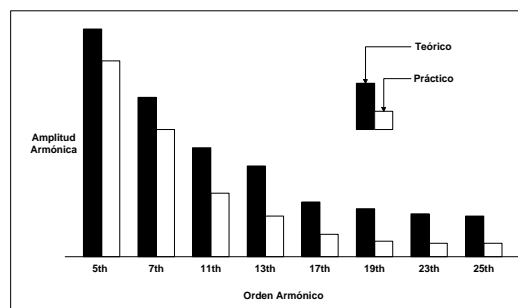


Fig. 2.17. Amplitudes de corrientes armónicas teóricas y prácticas.

Las armónicas inyectadas al sistema eléctrico de potencia por la locomotora eléctrica son similares a las producidas por el rectificador monofásico, como se muestra en la fig. 2.18, todas las armónicas impares están presentes y la tercera es la de mayor amplitud. A diferencia del convertidor trifásico de seis pulsos, el convertidor monofásico produce armónicas que incluye los múltiplos de tres.

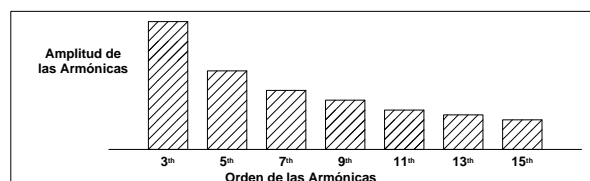


Fig. 2.18. Corrientes armónicas inyectadas al sistema por los controladores de las locomotoras eléctricas

Los armónicos generados por los controladores con enlace de CD son las mismas que en el rectificador de 6 pulsos. Las corrientes de línea de alterna son compuestas predominantemente con 5^a, 7^a, 11^{va}, 13^{va} armónica y armónicas de orden mayor; esto es, todas las impares excepto los múltiplos de tres.

Todos los controladores con enlace de CD con adecuados reactores de amortiguamiento generan armónicas características de un convertidor estático de seis pulsos.

Convertidores de pequeña capacidad y otras fuentes de armónicos.

Aparatos de consumidores: convertidores de potencia pequeños son usados en todos los equipos electrónicos de consumidores. Muchos de estos convertidores de baja potencia son monofásicos, rectificadores de onda completa.

La mayoría de los equipos electrónicos tales como computadores personales, máquinas copadoras, fax, circuitos de control para máquinas herramientas y circuitería para equipos de sonido y tv's, generalmente se alimentan por un rectificador y una alta capacitancia suavizante. Estas fuentes demandan corriente en un pulso corto de cada medio ciclo y por lo tanto producen niveles considerables de corriente directa y armónicas de orden par.

La fig. 2.19 muestra la corriente demandada por la tv. La corriente distorsionada tiene la 3^a armónica como componente dominante.

Estudios han demostrado que la cantidad de distorsión armónica en los sistemas de potencia es importante durante períodos pico de televisión o durante eventos especiales televisados, tales como finales de fut-bol, etc.



Fig. 2.19. Corriente de línea para una fuente de potencia en modo switcheo.

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

🚧 Equipos con núcleo magnético.

Transformadores:

Antes del incremento de los convertidores estáticos de potencia, las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia fueron primariamente debido a la corriente de excitación requerida por los transformadores de potencia. Cuando un voltaje senoidal es aplicado al devanado primario del transformador una pequeña corriente fluirá si el transformador está en vacío. Ésta corriente conocida como corriente de excitación, es necesaria para establecer el campo magnético en el núcleo del transformador y así, inducir un voltaje en el lado secundario. La relación entre el voltaje aplicado y la corriente de excitación es extremadamente no lineal.

La corriente de excitación demandada por el transformador (fig. 2.20) no es senoidal y contiene muchas armónicas. La forma de onda de la corriente de

excitación es rica en 3ª armónica, la cual alcanza el 50% de la corriente de frecuencia fundamental, la 5ª, 7ª y 9ª están presentes a un menor grado.

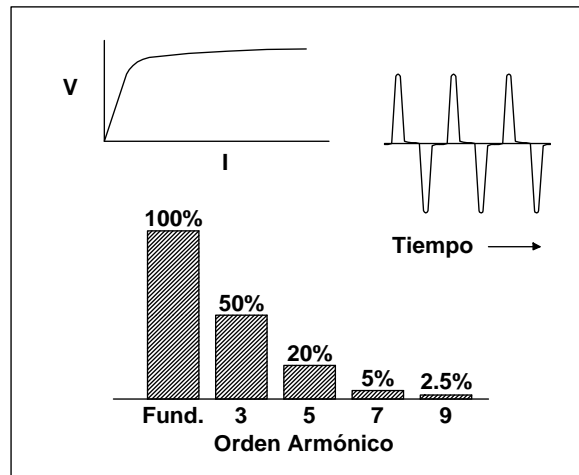


Fig. 2.20. Corriente de excitación no senoidal de un transformador y su contenido armónico

Afortunadamente, los transformadores son diseñados para operar cerca de la rodilla de la curva de saturación, donde la corriente de excitación es del 1% o 2% de la corriente a plena carga. Así, aunque los transformadores son numerosos en el sistema de potencia, su corriente de excitación generalmente no causa problemas armónicos,

Durante el sobrevoltaje por efecto ferranti, altas corrientes armónicas aparecen en la corriente de excitación hasta que el sobrevoltaje sostenido se reduce por el cierre del interruptor de carga.

Transformadores estrella- estrella y delta- estrella.

En sistemas de distribución se usan transformadores estrella- estrella para minimizar las fallas monofásicas, también tienen la ventaja de minimizar el efecto de ferro-resonancia causado por la fusión de un fusible en el lado de alto voltaje.

La corriente de excitación de ésta conexión fluye al sistema de potencia y puede causar distorsión de voltaje significativo en la onda de voltaje del lado secundario. En contraste con la conexión delta-estrella, tiene una trayectoria de baja impedancia para la 3ª armónica de la corriente de excitación representada por el devanado delta, dando como resultado un voltaje secundario no distorsionado. En la práctica las plantas industriales usan transformadores delta-estrella, lo cual elimina el problema de voltaje secundario distorsionado.

✚ Corrientes de Inrush o Energización para un Transformador.

La corriente de excitación de un transformador es una corriente periódica continua la figura 2.21 muestra la corriente de inrush o de energización del transformador, que podría ser de 8 o hasta 12 veces la corriente a plena carga y hasta por un segundo, después de ese tiempo la corriente de excitación decae a su valor normal de 1% ó 2% de la corriente a plena carga.

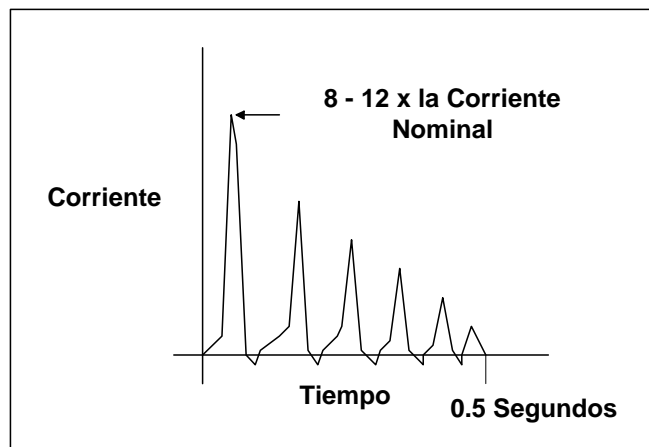


Fig.2.21. Corriente de Inrush de un Transformador que alcanza de 8- a- 12 veces la corriente de plena carga

La. Corriente de inrush contiene armónicas pares e impares con la 2ª armónica dominante, pero como no es una corriente de excitación continúa, no representa un problema armónico.

En transformadores de mediana y gran capacidad son protegidos por el relevador diferencial (figura 2.22) éste esquema compara la corriente primaria con la secundaria del transformador y es sensible a fallas internas del transformador.

Ya que la corriente de inrush tiene una gran cantidad de 2ª armónica y otras armónicas, un filtro para restringir la 2ª armónica es usado por muchos relevadores diferenciales.

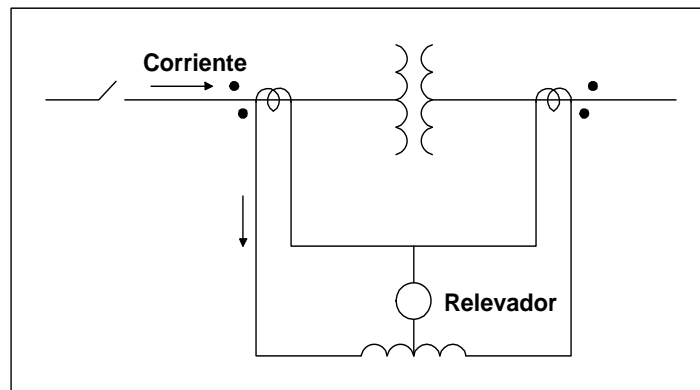


Fig.2.22 Esquema típico de la protección diferencial para la mayoría de transformadores de media y gran potencia.

⚡ Motores y Generadores.

En adición a los transformadores, hay un gran número de equipo con núcleo magnético que genera armónicas como los motores y generadores. Similar al transformador, un motor requiere de corriente de excitación (que contiene 3ª armónica) del sistema para establecer un campo magnético en su núcleo.

La comparación se muestra en la fig. 2.23, así, las armónicas generadas son menores. El tipo de devanado de un motor también influye en la generación de

armónicos, los devanados típicos del motor tienen 5 o 7 ranuras por polo, produciendo 5ª y 7ª corrientes de armónicos, aunque éstas son menores que las corrientes armónicas producidas por los convertidores estáticos, los controladores de velocidad de motores de gran capacidad (30,000 HP y mayores) pueden causar efectos armónicos en el sistema de potencia.

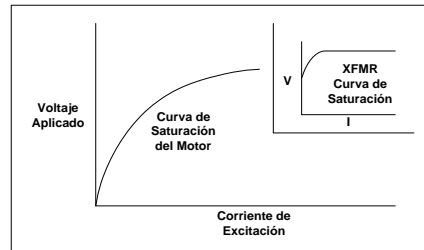


Fig. 2.23. Curva típica de saturación de un motor comparada con una curva de saturación de un transformador.

Los armónicos que se producen en un generador de CA son porque, el voltaje inducido en el estator es ligeramente distorsionado y contiene una componente dominante de 3ª armónica; esto causa que corriente de 3ª armónica fluya cuando el generador opera bajo carga.

Bajo la mayoría de condiciones de operación, las armónicas causadas por motores y generadores no son significativas en comparación con la producción armónica total en el sistema de potencia. En casos raros, podría haber un problema cuando una frecuencia armónica de una máquina rotatoria de gran capacidad excita a un circuito resonante en el sistema de potencia.

⚡ Dispositivos de Arco.

El sistema de potencia está “lleno” dispositivos de arco, tales como; hornos de arco eléctrico, soldadoras de arco y lámparas fluorescentes.

Todos estos equipos tienen un comportamiento no-lineal, los dispositivos de arco actúan parecido a un gap en serie con una reactancia que limita la corriente a un valor determinado. El voltaje a través del gap es parecido a una onda cuadrada y éste produce una corriente distorsionada con numerosas componentes armónicas.

De todos los dispositivos de arco del sistema de potencia, la mayor producción de armónicas, probablemente es de cargas de alumbrado, las cuales son conectadas en toda la red, sin embargo, hornos de arco causan los más severos problemas porque representan una fuente armónica de gran capacidad, concentradas en un lugar (existen hornos de arco de hasta 250 MW).

En un horno de arco eléctrico de CA, como el mostrado en la fig. 2.24, donde el acero y otros materiales metálicos son fundidos y refinados por medio de un arco de alta energía. Para arrancar el proceso, tres electrodos de grafito, cada uno controlado individualmente son acercados al horno, haciendo contacto con el acero, los electrodos son levantados y bajados para regular la corriente de arco, la trayectoria de la corriente es de un electrodo a través del acero a otro electrodo. La corriente que pasa a través del carbón del electrodo al acero tiene una impedancia diferente en la dirección positiva que en la dirección negativa, así exhibe una acción de rectificación débil entre los dos elementos distintos. Ésta simple acción de rectificación de fase produce las armónicas en la corriente de fase.

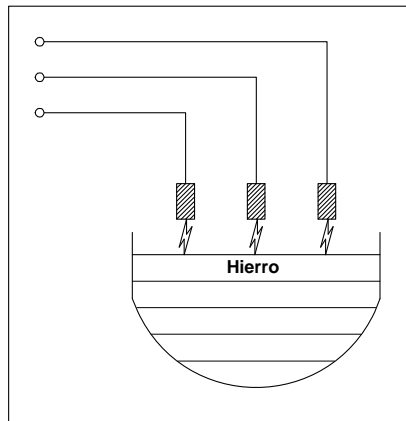


Fig. 2.24. Horno de arco mostrando que los electrodos están arriba hasta que los arcos son establecidos entre cada electrodo y el acero.

Una corriente muy grande típicamente en decenas de kilo amperes fluye a través de los electrodos y la chatarra de acero, la corriente es limitada por las reactancias de los cables de alimentación al horno y el transformador de horno. En la etapa inicial de fundición, la trayectoria de arco es errática, el resultado de las variaciones del voltaje de arco produce todas las armónicas dominantes por la acción rectificadora.

El horno es alimentado desde un transformador construido especialmente con un devanado conectado en delta, por las características monofásicas del arco, todas las armónicas son producidas, incluyendo pares y triples.

La fig. 2.25 muestra un espectro de frecuencia típico de corriente del horno de arco durante el período inicial cuando la chatarra está siendo fundida, la 2ª y 3ª son dominantes, cada una con el 25% de la magnitud de corriente fundamental.

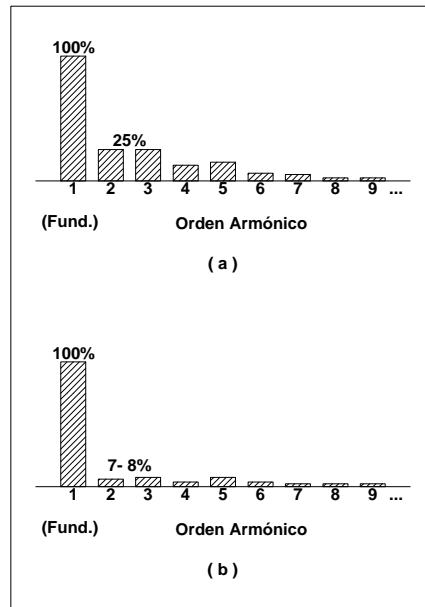


Fig. 2.25. Armónicas típicas producidas durante la operación del horno de arco:

- (a) durante el período inicial de fundición dónde la 2ª y 3ª corrientes armónicas son dominantes; (b) durante el período de refinación dónde la 2ª y 3ª armónicas son dominantes, pero reducidas a un 7-8%.

Durante el período más largo que es cuando la chatarra está siendo refinada, la superficie del metal es relativamente uniforme y el arco es más estable. El inciso b de la Fig. 2.25 muestra el contenido armónico de la corriente del horno durante el período de refinación. Aunque la 2ª y 3ª armónicas predominan, sus magnitudes son reducidas al 7% u 8% de la magnitud de corriente fundamental.

✚ Aluminado Fluorescente:

En alumbrado fluorescente, la corriente es limitada por un balastro que consiste de conductores devanados sobre un núcleo de hierro.

La corriente demandada por la lámpara fluorescente se ilustra en la fig. 2.26 las armónicas generadas incluyen una fuerte componente de 3ª armónica, porque el

balastro es un dispositivo ferro magnético que requiere corriente de excitación que contiene 3ª armónica.

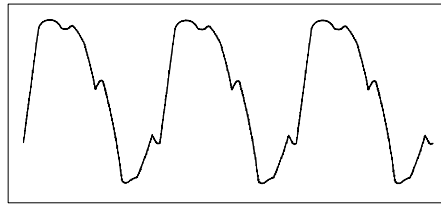


Fig. 2.26. Corriente demandada por una lámpara fluorescente.

⚡ **Compensadores Estáticos de VARS (CEV'S O SVC'S):**

El uso primario de un controlador de voltaje en el sistema de potencia es el compensador de potencia reactiva (var) o svc. el svc controla el voltaje por el ajuste de la cantidad de potencia reactiva suministrada o absorbida del sistema, el svc usa reactores y capacitores controlados o switcheados con tiristores, el svc puede cambiar la magnitud y dirección del flujo de var's muy rápidamente (en medio ciclo cuando mucho) en respuesta a las necesidades de carga.

Hay dos aplicaciones generales del SVC.

El 1º: en cargas industriales que varían rápida y significativamente, tales como hornos de arco eléctrico, un SVC es usado para suministrar potencia reactiva local a la carga, esto reduce el flicker e incrementa la eficiencia del horno.

La 2ª aplicación es en los sistemas de potencia, donde el SVC opera continuamente para regular el voltaje y mejorar la capacidad de transferencia de potencia a través del sistema de transmisión. El SVC podría también ser switcheadado inmediatamente después de una falla en el sistema para ayudar a mantener la estabilidad suministrando potencia reactiva y tener un mejor soporte de voltaje.

El diseño más común consiste de capacitores en derivación con un reactor controlado por tiristores conectado en paralelo, como se muestra en la fig. 2.27.

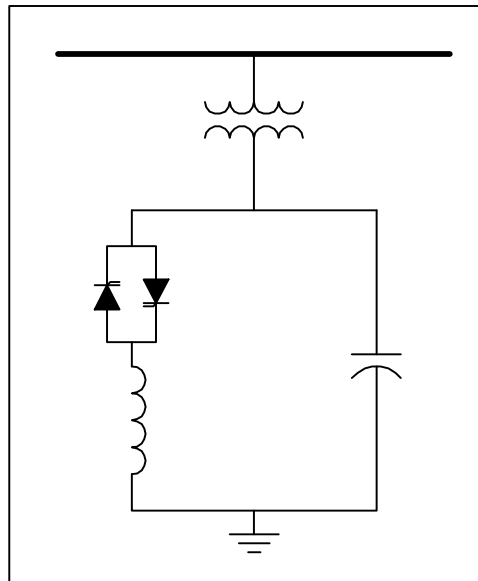


Fig. 2.27. Configuración típica de un compensador estático de VAR'S.

La fig.2.28, ilustra un ejemplo de una aplicación industrial donde se tiene un horno de 100 MVA'S y un SVC conectado al primario del transformador o al bus de distribución principal. El SVC consiste de un reactor en derivación controlado por tiristores y filtros LC en derivación. Los filtros son sintonizados para eliminar la 2^a, 3^a, 4^a y 5^a armónicas. En algunas aplicaciones es también necesario instalar un filtro paso altas para eliminar armónicas de mayor orden.

El filtro de 3^a armónica debe ser aterrizado para permitir el flujo de corriente de 3^a armónica o secuencia cero, sin embargo, los reactores controlados por tiristores son conectados en delta y los otros filtros y capacitores son conectados en estrella flotante.

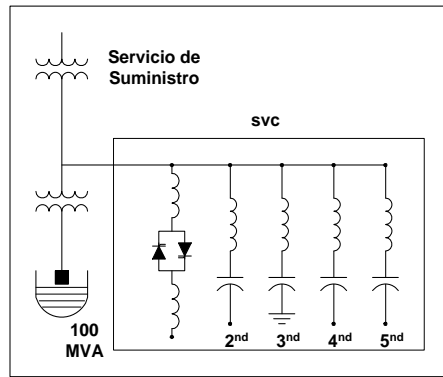


Fig. 2.28. Compensador estático de var's en una aplicación industrial como es el horno de arco eléctrico.

El propósito del SVC en la Fig. 2.28 es para suministrar continuamente cualquier potencia reactiva requerida por el horno (ésta no deberá suministrarse por la empresa suministradora), estos vars son suministrados por los capacitores fijos en los filtros, la caída de voltaje a lo largo del alimentador es mínima y reduce problemas de flicker (fluctuaciones de voltaje) que podrían ocurrir en los circuitos adyacentes al horno.

Suponiendo que los filtros suministran 100 MVAR fijos de potencia reactiva, pero en un instante el horno sólo requiere 60 MVAR, el exceso (40 MVAR) de potencia reactiva generada deberá ser absorbido por el reactor controlado por tiristores, en realidad, el reactor puede absorber solo el nivel de potencia reactiva que esté dentro de su capacidad. Esto se realiza por el control de fase por medio de los tiristores, modulando la corriente del reactor.

Los pulsos de corriente en el reactor controlado por tiristores deben ser centrados alrededor de los cruces por cero del voltaje, puesto que la carga es casi inductiva

pura, por lo tanto, los pulsos de corriente en los tiristores son simétricos alrededor del cruce por cero del voltaje.

Por ejemplo, los tiristores podrían ser “encendidos” donde el voltaje V es máximo, como se muestra en la figura 2.29, ocurre conducción plena y el reactor absorbe los máximos var's, desafortunadamente, el control de fase de los tiristores genera armónicas que son características de un convertidor estático.

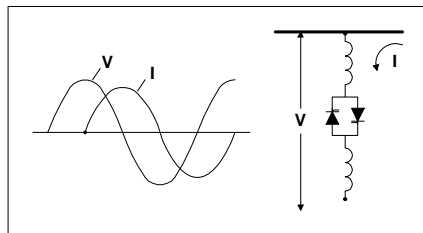


Fig. 2.29. Corriente de encendido de los tiristores coincidiendo con el voltaje máximo.

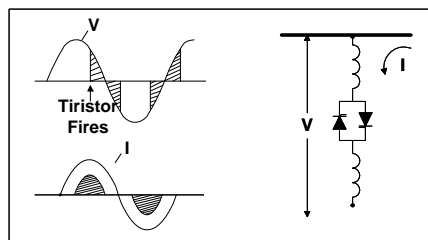


Fig. 2.30. Resultado del retardo en el encendido y sólo porciones de voltaje se aplican al reactor y por eso los pulsos de corriente son cortos.

En la Fig. 2.30, la 3ª, 5ª y 7ª y otras armónicas características de un convertidor de seis pulsos del reactor controlado por tiristores son agregadas a las armónicas pares e impares del horno de arco. El arreglo del filtro debe ser bien diseñado para mitigar las armónicas generadas por el horno y el SVC.

Otra aplicación importante de un SVC es en el sistema de una empresa suministradora. Un SVC podría ser instalado en puntos estratégicos del sistema para regular el voltaje, como se ilustra en la Fig. 2.31.

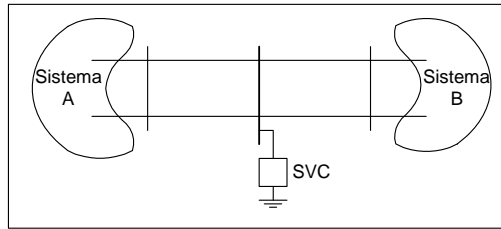


Fig. 2.31. Aplicación típica de un svc en una empresa suministradora.

El SVC aplicado en la empresa suministradora (fig. 2.32) es similar al usado en sistemas industriales, excepto que podría haber capacitores switchados por tiristores o interruptores, separados de los filtros. El SVC monitorea el voltaje del sistema, suministrando vars cuando el voltaje es bajo y absorbiendo cuando es alto. Nuevamente el suministro o absorción de vars se realiza por el control de fase de los tiristores del reactor. Filtros para la 5^a, 7^a, 11^{va} y 13^{va} armónicas pueden ser instalados. Las corrientes de 3^a armónica generadas por la modulación de corriente son confinadas en la conexión delta del reactor trifásico.

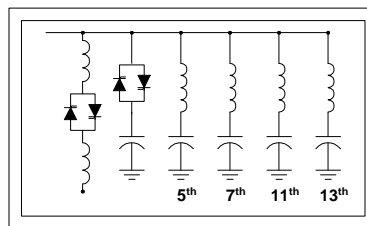


Fig. 2.32. Configuración típica de un svc de una empresa suministradora.

CAPÍTULO III

EFFECTOS DE LAS CORRIENTES Y VOLTAJES ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Este capítulo describe algunos de los posibles efectos de las armónicas en los equipos de los usuarios y de la empresa suministradora, así como también en los sistemas de comunicaciones. Se intenta dar un amplio conocimiento de los tipos de problemas que se pueden presentar para las diferentes configuraciones y condiciones de operación del sistema.

Los efectos de las armónicas se dividen en tres categorías:

1. Efectos en el propio sistema de potencia.
2. Efectos en las cargas de los usuarios.
3. Efectos en los circuitos de comunicaciones.

En el sistema de potencia, las corrientes armónicas son las culpables del sobrecalentamiento y disminución de la vida útil del equipo. El impacto es mayor cuando por resonancias en la red se amplifican dichas corrientes armónicas.

Las armónicas también pueden causar errores en el encendido de los tiristores en instalaciones de transmisión de corriente directa en alto voltaje (HVDC), compensadores estáticos de vars (SVC), errores en la medición y falsos disparos del equipo de protección. El comportamiento del equipo del usuario tal como controladores de velocidad, equipo de cómputo, controladores lógicos

programables (PLC's) puede ser afectado por las armónicas. Además el flujo de corrientes armónicas en los alimentadores puede inducir ruidos en las líneas de comunicación cercanas.

Efectos en el Sistema de Potencia:

Importancia de la Impedancia del Sistema.

Como ya se mencionó las armónicas son producidas por cargas no lineales, las cuales demandan corrientes distorsionadas de la fuente de alimentación. Los sistemas de potencia son generalmente capaces de aguantar considerables corrientes armónicas sin que ocurran problemas importantes, porque el sistema de potencia es robusto en relación a la carga, por lo tanto, la impedancia del sistema es pequeña comparada con la impedancia de la carga.

Con una impedancia pequeña del sistema, el flujo de la corriente distorsionada a la carga causa una distorsión de voltaje mínima en los buses, y no se ve afectada la operación de otras cargas y equipos.

Resonancia Paralelo.

Cuando existe una resonancia paralelo en el sistema, la distorsión de voltaje es significativa, así como la amplificación de corriente. La inductancia paralelo de la fig. 3.1, corresponde a las reactancias de línea, transformador y sistema, la capacitancia paralelo consiste de capacitores en derivación, cables y capacitancia de la línea y la fuente de armónicas es la de un convertidor estático de seis pulsos.

Existe alguna frecuencia a la cual la reactancia inductiva X_L es igual a la reactancia capacitiva X_C de tal manera que la impedancia equivalente es muy grande. La frecuencia a la cual la impedancia es muy grande es llamada frecuencia de resonancia y el circuito es referido como un circuito tanque.

Por ejemplo, la frecuencia de resonancia de la figura 3.1 es cercana a 300 Hz (5ª armónica), y como el convertidor genera la 5ª armónica, ésta excita al circuito resonante, esto es, se presenta una impedancia muy grande al flujo de la corriente de 5ª armónica.

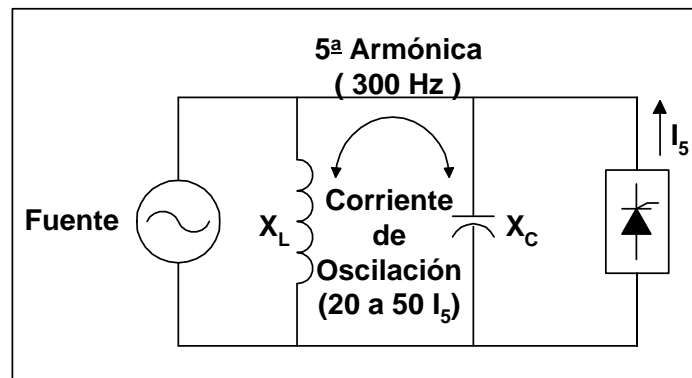


Fig. 3.1 Circuito típico de resonancia paralelo.

La resonancia paralelo y la corriente de 5ª armónica producen un voltaje armónico grande en el bus, y una gran corriente de oscilación en el circuito tanque. Un efecto de la resonancia es que se amplifica la corriente armónica en la inductancia (L) y capacitancia (C) del circuito tanque. La corriente de oscilación puede ser de 20 a 50 veces la magnitud de la corriente armónica que originalmente excita al circuito tanque; la corriente amplificada podría fundir fusibles del banco de capacitores, el voltaje distorsionado del bus podría causar el flujo de corrientes distorsionadas en los circuitos adyacentes de la figura 3.2 y afectar a cargas remotas de la fuente armónica y circuito tanque.

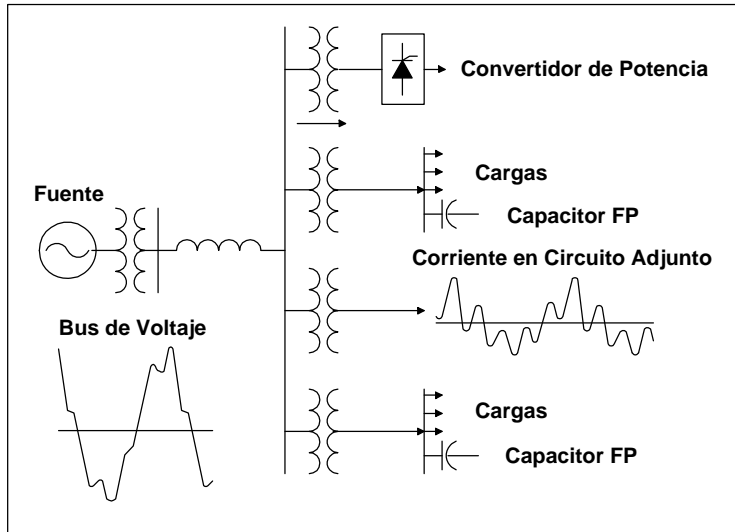


Fig. 3.2. Propagación de corriente distorsionada a través del sistema y distorsión de voltaje.

Otro ejemplo de resonancia paralelo: Considere que la planta de cemento es alimentada en 4.16 KV (fig. 3.3), la planta emplea un número de controladores de velocidad de una capacidad total de 12 MW, un banco de capacitores de 4.2 MVAR para suministrar potencia reactiva y mejorar el F.P. de la planta, un circuito equivalente de esta planta es mostrado en la figura 3.4.

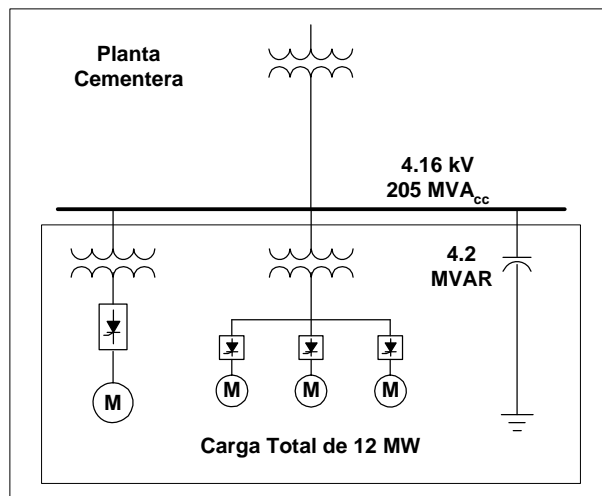


Fig. 3.3. Diagrama unifilar de una planta cementera que utiliza convertidores estáticos para motores.

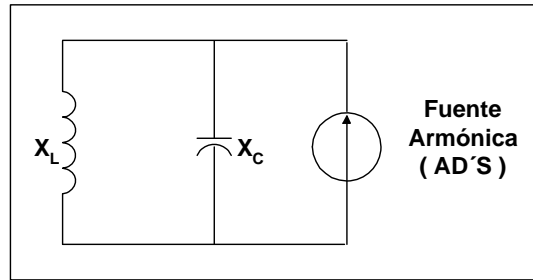


Fig. 3.4 Circuito equivalente de la planta cementera.

Visto desde la fuente armónica, el banco de capacitores en derivación (X_C) está en paralelo con la inductancia del sistema (X_L), la frecuencia de resonancia del circuito tanque puede ser calculada:

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} ; f_r = f_1 \sqrt{\frac{\text{MVA de Corto circuito del sistema}}{\text{MVAR del capacitor}}}$$

Donde:

f_r = frecuencia resonante en Hz.

f_1 = frecuencia fundamental en Hz.

X_C, X_L = reactancias en Ω ó en PU a la frecuencia fundamental.

Aquí las reactancias son expresadas en términos de la capacidad de corto circuito (MVA) en la localización del capacitor y la capacidad del banco de capacitores (MVAR), esta Información es a menudo disponible directamente de los diagramas unifilares.

La capacidad de corto circuito en el bus de 4.16 KV es de 205 MVA y teniendo un banco de capacitores de 4.2 MVAR, la frecuencia de resonancia es de 420 Hz.,

aunque la impedancia del circuito tanque es bastante baja a la frecuencia fundamental del sistema de potencia (60 Hz), a 420 Hz (7ª armónica) es muy grande, como se muestra en la figura 3.5, ya que la corriente demandada por la carga contienen una fuerte componente de 7ª armónica y el circuito resonará a ésta frecuencia. La corriente de 7ª armónica será amplificada y una gran corriente de oscilación fluirá en el circuito tanque.

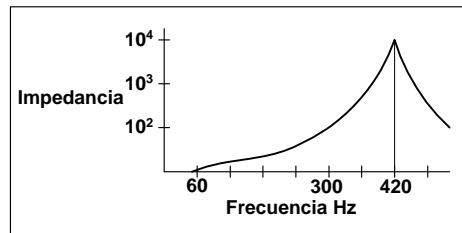


Fig. 3.5. Curva de impedancia contra frecuencia mostrando un gran pico a 420 HZ, entonces se amplifica la corriente de 7ª armónica.

🚧 Severidad de una Resonancia Paralelo

El efecto de una resonancia paralelo es mayor si la capacidad de la carga no lineal es grande en relación a la capacidad de corto circuito. Para aplicar una regla general se puede definir una cantidad llamada relación de corto circuito (SCR)

$$SCR = \frac{\text{Corto circuito (MVA)}}{\text{Carga no lineal (MW)}}$$

Una SCR baja implica que la carga no-lineal es grande con respecto al sistema de potencia, si la SCR es menor que 20 y si la frecuencia de resonancia es cercana a la 5ª ó 7ª armónica, indica un problema armónico potencial. De la fig. 3.3.

$$\bar{f}_r = \sqrt{\frac{205}{4.2}} \cong 7 \text{ P.U.}$$

$$\text{SCR} = \frac{205 \text{ MVA}}{12 \text{ MW}} = 17$$

Como la SCR es menor de 20 y el circuito resuena a la 7^a armónica, las corrientes y voltajes armónicos en este sistema deberán ser excesivos y requiere de un estudio para resolver éste problema. El efecto de una resonancia paralelo podría ser no tan severo si se agrega una resistencia al circuito tanque, como se muestra en la figura 3.6, la relación de reactancia a resistencia (X/R) es el factor que controla la amplificación de corriente, a una baja relación X/R implica una relativa alta resistencia, de tal manera que la amplificación de corriente es menos severa. La relación X/R baja es típica de los circuitos de baja tensión, conforme la relación X/R incrementa, la amplificación de corriente va siendo mayor.

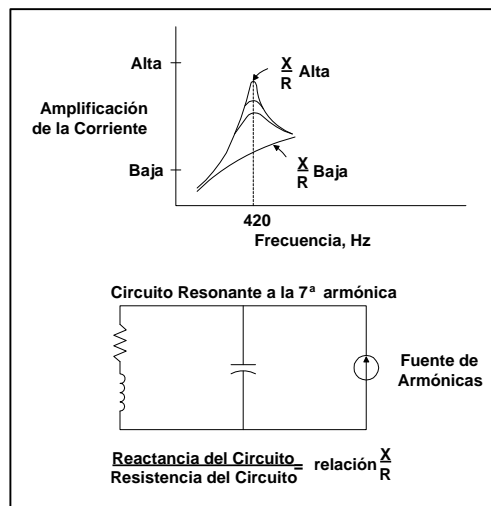


Fig. 3.6. Reducción del efecto de la resonancia paralelo que resulta por agregar una resistencia en el circuito tanque.

Otro factor que afecta la severidad de la resonancia paralelo es la carga; conforme se incrementa el nivel de la carga, la amplificación de la corriente armónica disminuye como se muestra en la fig. 3.7, esto es porque hay más trayectorias de baja impedancia disponibles para el flujo de la corriente y más resistencia para amortiguar las armónicas, además, los circuitos con demanda mínima son más susceptibles a las altas corrientes armónicas causadas por la resonancia paralelo.

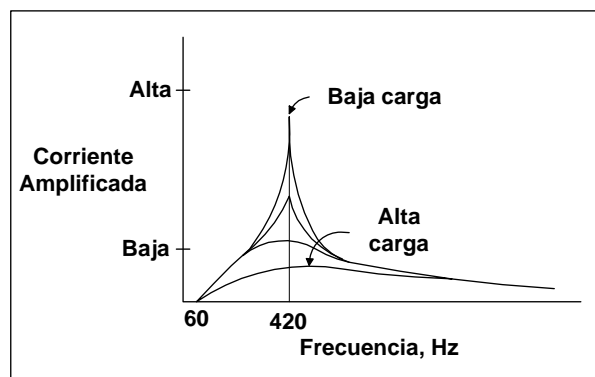


Fig. 3.7. Reducción de la amplificación de corriente debido a las trayectorias de baja impedancia que resultan de la alta carga.

✚ Resonancia Serie.

La resonancia serie ocurre entre el sistema y el banco de capacitores. Un ejemplo es ilustrado en la fig. 3.8, donde se tiene un transformador de 13.8 KV a 440 Volts, de 1500 KVA con 5.75% de impedancia. Para corregir el f.p. se colocan bancos de capacitores de un total de 500 KVAR en 480 Volts. Hay también una fuente armónica en el sistema de distribución de 13.8 KV que consiste de convertidores estáticos de 6 pulsos y estos convertidores no están equipados con filtros de armónicas.

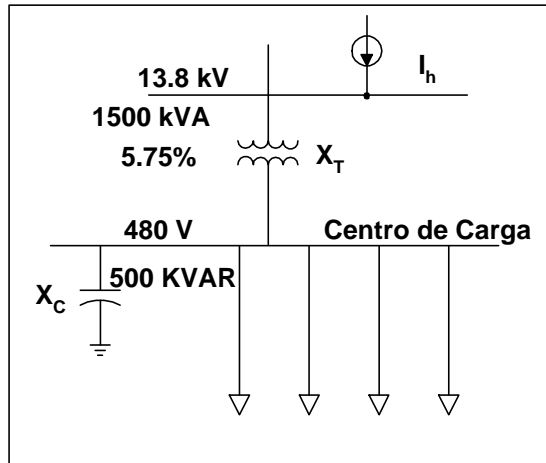


Fig. 3.8. X_C En resonancia serie con la X_T .

Visto desde la fuente armónica, el circuito equivalente en demanda mínima en la fig. 3.9, incluye la inductancia del transformador y la capacitancia del banco de capacitores conectados en serie. Igual que en la resonancia paralelo, existe una frecuencia de resonancia a la cual las dos reactancias son iguales.

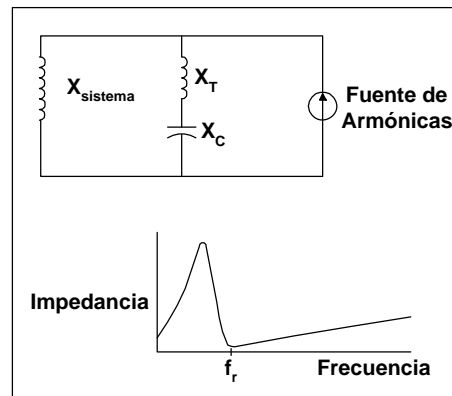


Fig. 3.9. Circuito equivalente "visto" desde la fuente armónica.

La frecuencia de resonancia serie (f_r) es dada por las mismas expresiones que se aplican para la resonancia paralelo. Sin embargo, en la resonancia serie, la impedancia total a la frecuencia de resonancia es muy baja en lugar de alta. Esto significa que el circuito resonante parecerá un filtro en derivación. Si la frecuencia de resonancia del circuito serie es cercana ó igual a la 5^a ó 7^a armónica generadas

por los convertidores estáticos de potencia, éstas corrientes armónicas serán desviadas hacia la combinación transformador-capacitor. La concentración de corrientes armónicas en la trayectoria resonante puede también causar altos voltajes distorsionados en el banco de capacitores y al secundario del transformador. A diferencia de la resonancia paralelo aquí no hay amplificación de la corriente armónica, pero el circuito de resonancia serie fuerza a la corriente armónica a fluir por trayectorias indeseables.

En el circuito de la fig. 3.9, la impedancia del transformador es determinada por:

$$X_L = \frac{(0.0575 \text{ p. u.}) (0.48 \text{ KV})^2}{1.5 \text{ MVA}} = 0.0088 \text{ ohm}$$

La impedancia equivalente del banco de capacitores es:

$$X_L = \frac{(0.0575 \text{ p. u.}) (0.48 \text{ KV})^2}{1.5 \text{ MVA}} = 0.0088 \text{ ohm}$$

La frecuencia de resonancia paralelo es:

$$f_r = 60 \text{ Hz} \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = 433 \text{ Hz}$$

La frecuencia de resonancia serie es cercana a la 7ª armónica. Si se instala un banco de capacitores de 1000 KVAR en lugar de 500 KVAR la frecuencia de resonancia será de 307 Hz, (cercana a la 5ª armónica). Las capacidades de los bancos de capacitores son dos terceras y una tercera parte de la capacidad del

transformador. Para una impedancia estándar del transformador (5.75%) con una tercera parte de su capacidad en capacitores la resonancia serie ocurre a la 7^a armónica y con capacitores de dos terceras partes de la capacidad del transformador, la resonancia serie ocurre a la 5^a armónica. Donde se tienen convertidores estáticos de potencia instalados en el primario del transformador, éstos producirán valores significativos de corrientes armónicas de 5^a y 7^a, por lo tanto deberá evitarse esas capacidades de bancos de capacitores. De otra manera, la resonancia serie causará que las corrientes armónicas sean filtradas a través del transformador y banco de capacitores

Capacitores en los Alimentadores de Distribución:

Cuando se presentan problemas por armónicas en los sistemas de potencia, es generalmente porque una resonancia serie ó paralelo ha aumentado los niveles armónicos. Esto es particularmente verdadero en sistemas de distribución donde un gran número de bancos de capacitores fijos ó switcheados son aplicados para soporte de voltaje a lo largo de los alimentadores.

La inductancia del alimentador entre la capacitancia de los bancos de capacitores podría entrar en resonancia a diferentes frecuencias. Desde el punto de vista de una fuente de corriente armónica conectada al alimentador, el sistema de distribución "ve" una combinación de circuitos resonantes serie y paralelo.

Se utilizan programas de cómputo para predecir y resolver problemas armónicos de los alimentadores. Sin embargo, una tendencia general es que la distorsión de voltaje en un alimentador es mayor cuando los bancos de capacitores son

localizados al final del alimentador. En la fig. 3.10 muestra los capacitores conectados a lo largo del alimentador. La inductancia L, del alimentador incrementa provocando que la frecuencia de resonancia disminuya.

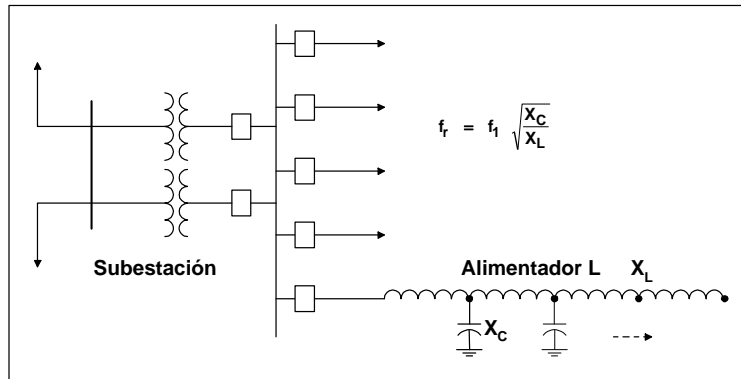


Fig. 3.10. La distorsión de voltaje incrementa conforme se colocan los capacitores al final del alimentador.

Conforme los capacitores son colocados hacia el final del alimentador, las resonancias podrían ocurrir a frecuencias más bajas tales como la 3ª, 5ª y 7ª armónica. Además éstas frecuencias dominantes son generadas por cargas no lineales monofásicas y trifásicas, por lo tanto el banco de capacitores no deberá ser localizado donde resuene con la inductancia del sistema a éstas frecuencias (3ª, 5ª y 7ª).

⚡ Efectos en Bancos de Capacitores

La distorsión de voltaje armónico causa destrucción del aislamiento del equipo, particularmente en los capacitores. Cuando las armónicas causan que el voltaje aplicado al banco de capacitores sea distorsionado, el voltaje pico podría ser bastante alto para causar una descarga parcial o corona dentro del dieléctrico del

capacitor como se muestra en la fig.3.11. Esto podría eventualmente resultar en un corto circuito en las bobinas y falla del banco de capacitores.

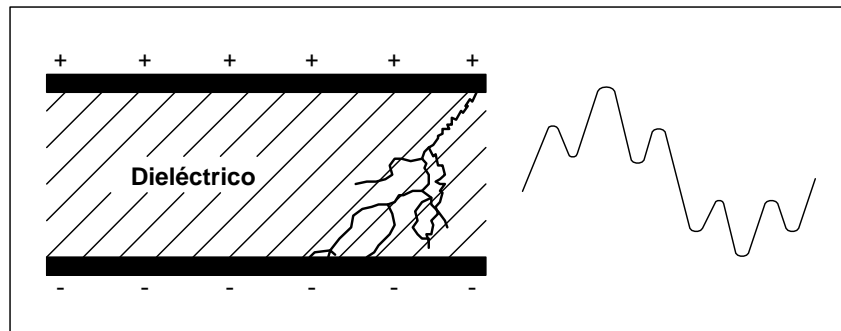


Fig. 3.11. Descarga parcial o corona en el dieléctrico del capacitor como resultado de la distorsión de voltaje causada por armónicas.

No obstante, la mayoría de los problemas de los equipo causadas por armónicas son debido a la distorsión de corriente. El flujo de altas corrientes armónicas causa sobrecalentamiento en el equipo, pérdida de vida útil y fallas. En transformadores, motores y generadores por ejemplo, corrientes distorsionadas pueden incrementar significativamente las pérdidas en el núcleo y en el cobre de los devanados.

Altas corrientes armónicas también causan la fusión de fusibles en los bancos de capacitores, dando como resultado una disminución en la potencia reactiva suministrada al sistema, y en el caso de una planta industrial un decremento en el factor de potencia.

Efectos en los Sistemas de Control

En terminales de transmisión de corriente directa en alto voltaje y en compensadores estáticos de vars, la distorsión puede causar errores en el encendido de los tiristores, y los cambios en el sistema podrían crear nuevas

resonancias dando como resultado la amplificación armónica causando problemas en estas instalaciones.

Efectos en los Medidores.

Los dispositivos de instrumentación y medición podrán ser afectados por las armónicas causando errores en las lecturas. Por ejemplo, un wathhorímetro es esencialmente un pequeño motor con un disco metálico como motor. La corriente en fase con los voltajes demandados por la carga fluye a través de las bobinas del medidor, produciendo un par en el disco que tiende a hacerlo girar. El consumo de energía es medido por la acumulación del número de vueltas del disco sobre un período de tiempo.

Sin embargo, el par desarrollado en el disco es sensible a la frecuencia. A frecuencias más altas que la fundamental, el par disminuye, causando una lenta rotación del disco y consecuentemente menor lectura de la energía que la que debería ser.

Las componentes armónicas son usualmente bastante pequeñas comparadas con la componente de frecuencia fundamental, así este error de medición es generalmente despreciable. Estudios recientes sobre el efecto de las corrientes armónicas en medidores y otros instrumentos muestran que un factor de distorsión de cundo menos el 20% es requerido para tener un error significativo.

Efectos en Relevadores:

Los relevadores de corriente son diseñados para operar sólo cuando suceden condiciones anormales, tales como durante una falla, cuando las magnitudes de

corriente son varias veces la corriente de carga normal. Usualmente la distorsión de voltaje y corriente no deberá operar los relevadores de protección, sin embargo, las armónicas pueden conducir a la mala operación de algunos tipos de relevadores de protección.

En un caso notable, la distorsión armónica ha dado como resultado falsos disparos de interruptores durante condiciones normales de operación. Esto ocurre con los relevadores de protección contra fallas a tierra instalados en muchos esquemas de protección de sobre corriente.

En alimentadores, relevadores sensores vs fallas a tierra son alimentados desde un transformador de corriente tipo dona por donde pasan los tres conductores de fase, el cuál puede ser ajustado para operar a 10 o 15 amperes de corriente de secuencia cero. Hay particularmente susceptibles a corrientes de secuencia cero (3a armónica).

Otros tipos de relevadores que pueden ser afectados por armónicas, son por ejemplo, el relevador de baja frecuencia que es diseñado para detectar un severo déficit de generación en el sistema y “tirar” carga cuando cae la frecuencia abajo de cierto ajuste.

Un relevador de estado sólido monitorea la frecuencia contando el numero de cruces por cero en le forma de onda, sí hay más de dos cruces por cero en cada ciclo da como resultado un mal cálculo de la frecuencia ya que la frecuencia fundamental puede estar abajo del punto de ajuste, pero el relevador erróneamente calcula la frecuencia como dos veces el valor actual y falla en su operación.

✚ Efectos en Consumidores

En grandes cargas industriales y comerciales son los mismos efectos que en el sistema de potencia, a menudo consisten de grandes máquinas rotatorias, transformadores, bancos de capacitores, equipo de protección, control y medición. Todos los efectos en equipos del sistema de potencia discutidos hasta aquí se aplican a éstos sistemas industriales y comerciales también.

Además, todos los usuarios usan una gran variedad de convertidores estáticos los cuales son bastante sensibles a la contaminación armónica. Ejemplo de éstos son los controladores de velocidad de motores y fuentes de potencia para computadoras y otros equipos electrónicos. Si el voltaje aplicado a estos dispositivos tiene un alto contenido armónico, el comportamiento de los mismos puede ser afectado.

Irónicamente, los mismos dispositivos que son afectados por la distorsión armónica podrían ser los que la causan.

En suministradores de potencia de equipo crucial, tales como computadoras, la pérdida de voltaje es más crítica que la distorsión de la forma de onda de voltaje. Para prevenir la pérdida de potencia de las computadoras estas son equipadas con fuentes de potencia no interrumpibles (UPS), como se muestra en la figura 3.12.

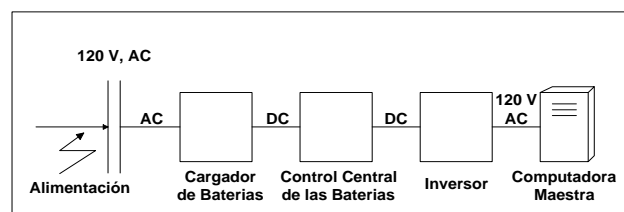


Fig. 3.12. UPS para alimentar a una pc.

Una batería de respaldo en la UPS es continuamente cargada desde el bus de alterna; la potencia de directa (DC) es invertida a alterna (AC) para alimentar a la computadora.

Si la línea de alimentación de alterna falla, la potencia continúa suministrándose desde la batería para que el voltaje de alimentación a la computadora sea ininterrumpido, quedando los datos protegidos y el proceso continúe.

Un UPS típica usa un rectificador estático para convertir la potencia de AC a DC y cargar la batería, por lo tanto, es otra fuente de contaminación armónica en el sistema de potencia.

✚ Efectos en Comunicaciones.

Interferencia Telefónica.

Uno de los problemas anteriores causados por armónicas fue la interferencia telefónica. Esto sucedió porque la corriente armónica generada por rectificadores, inducen un campo magnético que se enlaza con el circuito telefónico, como se ilustra en la fig.3.13. El voltaje inducido fue bastante alto para crear un severo ruido en los circuitos telefónicos.

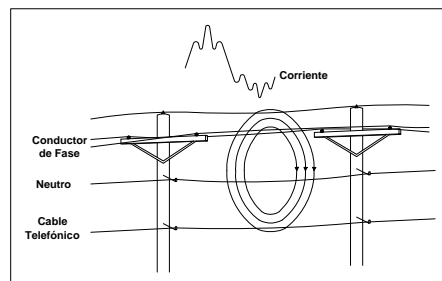


Fig. 3.13. Campos magnéticos generan voltajes inducidos

Hoy, éste modo de interferencia todavía existe, pero es menor el problema porque la mayoría de los circuitos telefónicos son cables trenzados con pantalla, como se muestra en la figura 3.14. El área del circuito telefónico que está expuesto al campo magnético de la línea de potencia es mínima.

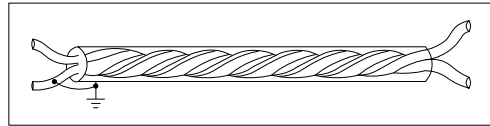


Fig. 3.14. Los Cables con pantalla minimizan los efectos de voltaje inducido. Factor de Influencia Telefónica (TIF).

🚧 Factor de Influencia Telefónica (TIF).

El ruido telefónico generado por corrientes y voltajes armónicos en el sistema de potencia es generalmente cuantificado como un factor de influencia telefónica (TIF). El sistema reconoce que el ruido inducido por armónicas tiene un efecto subjetivo en el usuario telefónico. Esto es porque el oído humano es más susceptible a unas frecuencias que a otras.

La fig. 3.15 muestra los factores TIF. El TIF en la curva es una medida de la sensibilidad al ruido del sistema telefónico y el oído humano a varias frecuencias discretas. Por ejemplo el TIF a 60 Hz es cercano a cero, indica que los circuitos telefónicos y el oído humano son insensibles al ruido de la frecuencia potencial. También a las frecuencias armónicas más comunes tales como la 5^a ó 7^a el TIF es relativamente bajo. El TIF tiene un máximo alrededor de los 2600 Hz con un valor de 10600 a esta frecuencia.

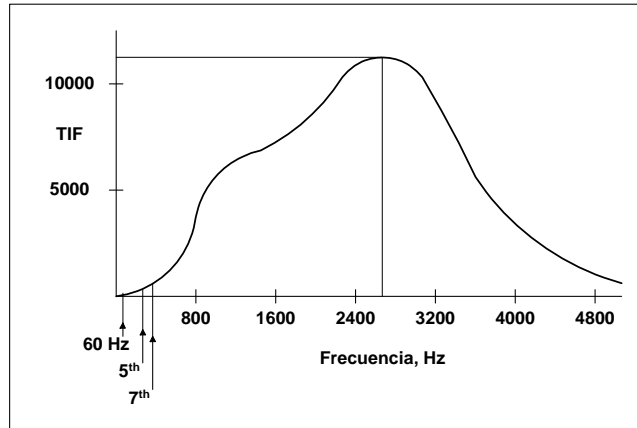


Fig. 3.15. TIF Vs Frecuencia, mide la sensibilidad al ruido del sistema telefónico y el oído humano a varias frecuencias.

Valores de TIF a diferentes frecuencias

<u>Frec.</u>	<u>TIF</u>	<u>Frec.</u>	<u>TIF</u>	<u>Frec.</u>	<u>TIF</u>	<u>Frec.</u>	<u>TIF</u>
60	0.5	1020	5100	1860	7820	3000	9670
180	30	1080	5400	1980	8330	3180	8740
300	225	1140	5630	2100	8830	3300	8090
360	400	1260	6050	2160	9080	3540	6730
420	650	1380	6370	2220	9330	3660	6130
540	1320	1440	6650	2340	9840	3900	4400
660	2260	1500	6680	2460	10340	4020	3700
720	3360	1620	6970	2580	10600	4260	2750
780	4350	1740	7320	2820	10210	4380	2190
900	5000	1800	7570	2940	9820	5000	840
1000							

Tabla 3.1.

El nivel de ruido que actualmente aparece en el circuito telefónico también depende de la corriente armónica presente en el sistema de potencia. Para medir este efecto combinando la interferencia telefónica es a menudo expresada como

un producto de corriente y TIF ó voltaje y TIF. Este parámetro es referido como el producto I•T.

$$\mathbf{I \bullet T} = \left[\sum_{h=1}^{\infty} (\mathbf{I}_h \cdot \mathbf{TIF}_h)^2 \right]^{1/2}$$

El producto KV•T está dado por:

$$\mathbf{KV \bullet T} = \left[\sum_{h=1}^{\infty} (\mathbf{KV}_h \cdot \mathbf{TIF}_h)^2 \right]^{1/2}$$

Donde I_h = Corriente armónica (rms) presente en el sistema de potencia

KV_h = Voltaje armónico (rms) presente en el sistema de potencia

h = Orden armónico

TIF_h = Factor de influencia telefónica a la frecuencia armónica.

Normas industriales han establecido los niveles aceptables de interferencia telefónica. Por ejemplo el producto $I \bullet T < 10,000$ indica un nivel relativamente bajo de distorsión de corriente armónica el cual no causa problemas de ruido. Un producto $I \bullet T > 50,000$ probablemente causará problemas de interferencia en el circuito telefónico. Las empresas suministradoras deben asegurar que las armónicas generadas en sus sistemas no resulten productos $I \bullet T$ que excedan los criterios aceptables.

Herramientas para el Análisis Armónico

Esta sección describe los programas de cómputo disponibles y otras herramientas de análisis que pueden ser usadas para predecir y analizar la distorsión armónica y el flujo de corriente armónica en los sistemas eléctricos de potencia. En general, estos programas usan información acerca de la estructura y configuración de la red para determinar cómo varía la impedancia de la red con la frecuencia; esto es, determina la impedancia de la red a cada armónica. Dada esta información, junto con las corrientes armónicas que están siendo generadas por las cargas conectadas, los programas de cómputo calculan los niveles de distorsión armónica, los flujos de corriente armónica en ramas de la red y los efectos de los diferentes filtros.

Predicción De Resonancia Paralelo.

Las cargas no lineales que generan corrientes armónicas, generalmente operan a bajos factores de potencia por lo tanto surge la necesidad de instalar bancos de capacitores para suministrar la potencia reactiva que demandan dichas cargas. Apareciendo la resonancia paralelo entre la inductancia del sistema y la capacitancia del banco de capacitores. En la figura 3.16 se muestran los capacitores para mejorar el factor de potencia en paralelo con la inductancia del sistema visto desde la carga (rectificador) que produce corrientes armónicas. A la frecuencia de resonancia de éste circuito tanque, su impedancia es muy grande, consecuentemente una magnitud pequeña de corriente armónica a esa frecuencia producirá grandes voltajes en los elementos del circuito. Si las armónicas son de

importancia, es útil poder predecir la frecuencia a la cual el circuito entra en resonancia. Esto se realiza con la siguiente ecuación:

$$h = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{Mvar_C}}$$

Donde h = orden armónico a la frecuencia resonante

MVA_{sc} = capacidad de cortocircuito de sistema

$Mvar_C$ = capacidad del banco de capacitores

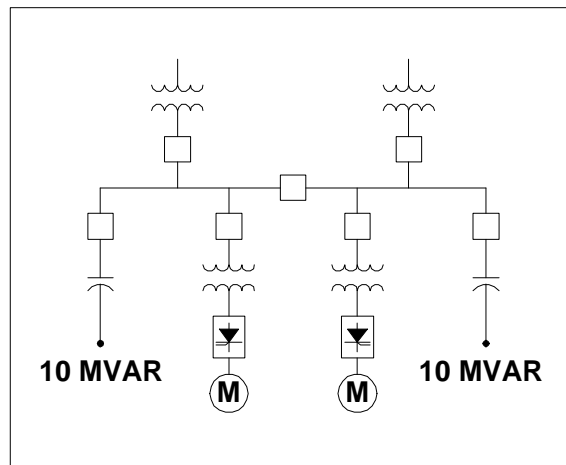


Fig. 3.16. Planta típica de un sistema de potencia que puede sufrir condiciones de resonancia paralelo

Si la planta tiene más de un banco de capacitores, los Mvars variarán con el número de bancos en servicio. Similarmente, los MVA_{sc} variarán entre un máximo y un mínimo de acuerdo a las condiciones de generación y será reducida cuando líneas cercanas y transformadores estén fuera de operación. La capacidad de corto-circuito cambiará cuando existan expansiones de la empresa suministradora

(entrada en operación de líneas de transmisión y plantas generadoras por ejemplo). Estas variaciones deben considerarse para el análisis armónico.

Por ejemplo, la planta en Figura 3.1 tiene una capacidad de 600 MVA cuando ambos transformadores están en servicio y sólo 400 MVA cuando un transformador está fuera de servicio. Se utilizan dos bancos de capacitores de 10 Mvar para mejorar de factor de potencia. Usando la regla de dedo para calcular la frecuencia resonante h mostrará que hay un rango de posibles condiciones de resonancia paralelo como se puede ver en la tabla 3.2.

Tabla 3.2.

Condiciones de operación del Equipo de la planta

Y órdenes armónicos resultantes

<u>Transformadores</u>	<u>Bancos de Capacitores</u>	<u>h^*</u>
1	2	4.47
2	2	5.48
1	1	6.32
2	1	7.75

Estos valores de frecuencia están en p.u.
Las armónicas son valores enteros de la fundamental.

La capacidad del corto-circuito real en un momento dado puede quedar entre el nivel mínimo y máximo, pero está claro que para algunas condiciones de operación del sistema hay resonancias paralelo cercanas a la 5^a y 7^a armónicas. Si el equipo de la planta genera niveles significativos de estas corrientes

armónicas, se necesita realizar estudios detallados para determinar la necesidad de filtros a las frecuencias de interés.

Predicción de Corrientes Armónicas

Otra regla que es útil al ingeniero es la relación de corto circuito (SCR) Este cálculo es una medida del impacto de las fuentes armónicas en el sistema. El tamaño o capacidad, de una fuente de corriente armónica es un importante parámetro en la determinación de su efecto en la red. La SCR es una medida de tamaño de la fuente armónica con respecto a la habilidad del sistema para absorber la corriente armónica.

Las fuentes de armónicas de la figura 3.11 son dos controladores de velocidad de estado sólido. Al máximo nivel de cortocircuito (600 MVA), una carga total de los controladores de velocidad de los motores mayor a 30 MW dará un SCR menor de 20.

$$SCR = \frac{600 \text{ MVA}}{30 \text{ MW}} = <20$$

Una SCR baja indica que habrá problemas si existe una resonancia paralelo cercana a una de las armónicas características.

El cálculo de la frecuencia de resonancia h y de la relación de corto circuito, SCR, proveen una manera rápida y fácil de predecir la probabilidad de condiciones resonantes paralelas y la existencia de niveles significativos de corrientes armónicas. Los resultados de estas predicciones requieren de análisis más

detallados que usan simulaciones por computadora. También sería necesario hacer una investigación completa de las corrientes armónicas esperadas de la fuente. El análisis detallado indicaría si los bancos de capacitores deben ó no formar parte de filtros de armónicas.

PREDICCIÓN DE CAÍDA DE TENSIÓN.

Un cambio repentino en la carga causará una caída de tensión. La conexión de un reactor en derivación producirá el mismo resultado. Recíprocamente, la conexión de un banco de los capacitores suministrará potencia reactiva, causando un incremento en el voltaje. En resumen, variaciones del nivel de carga ó el switcheo de elementos del sistema causarán variaciones en la tensión del sistema. La magnitud de la variación dependerá de la capacidad del elemento switcheado (en MVAR) ó la capacidad de la carga (en MW) relativos a la capacidad de cortocircuito ó robustez de la red.

Cargas fluctuantes de gran capacidad: como hornos del arco eléctrico, molinos y grúas causan variaciones de tensión a una relativa alta frecuencia. Las variaciones pueden ocurrir muchas veces por segundo ó pocas veces por minuto. Esto es diferente a un evento de switcheo que sólo ocurre una vez al día. Cuando la tensión varía rápidamente, el efecto es llamado "Flicker ó parpadeo" porque hay una variación intermitente y notable de los niveles de iluminación. Las personas algunas veces encuentran esta variación irritante. Incluso sin variaciones perceptibles en los niveles de iluminación, sin embargo, el flicker puede causar un problema en equipo electrónico sensible como computadoras y equipos de instrumentación.

Debe reconocerse que el flicker no es un problema armónico, pero generalmente es causado por cargas fluctuantes de gran capacidad que generan armónicas. A menudo los ingenieros de empresas suministradoras se referirán a las variaciones de tensión causadas por algún switcheo como flicker. Sería mejor referirse a él como una simple caída (dip) de tensión. Aunque las personas pueden encontrar un solo evento tolerable, podría ser un problema para el equipo sensible.

Cálculo de caída de Voltaje

El nivel de la caída de voltaje puede ser calculado usando un programa del corto-circuito ó más convenientemente por un cálculo manual.

Generalmente se conoce la carga y nivel de corto-circuito de sistema en MVA, pero no las impedancias respectivas. Donde la impedancia y la capacidad están directamente relacionados, por lo tanto la predicción de la caída de voltaje puede obtenerse como:

$$Caída\ de\ Voltaje = \frac{MVA_{carga}}{MVA_{carga} + MVA_{sc}}$$

Reglas para la ejecución de estudios armónicos.

Las secciones anteriores han identificado un número de reglas que pueden ser rápida y fácilmente aplicadas para determinar la probabilidad de problemas armónicos. Donde existen fuentes de gran capacidad y condiciones de resonancia paralelo, un análisis más detallado es requerido. Otras condiciones también indican la necesidad para una evaluación comprensiva de las características armónicas de una red. Por ejemplo:

- Aplicación de bancos de capacitores a un sistema que contiene fuentes armónicas, sobre todo si existen resonancias y el SCR es menor que 20.
- Instalación de nuevas terminales de transmisión de corriente directa HVDC ó SVCs.
- Requerimientos estrictos sobre inyección de corrientes armónicas permitidas al sistema de potencia.
- Un historial sobre fusibles fundidos de bancos de capacitores.
- Sobre calentamiento de motores y transformadores.
- Disparo de interruptores inexplicables debido a operación de relevadores vs fallas a tierra.
- Quejas de interferencia telefónica.

Si se establece que es necesario un análisis armónico, se requerirá un programa de flujos de carga armónico.

Un programa de flujo de carga armónico es la herramienta del análisis básico para la ejecución de estudios armónicos. Es capaz de calcular la penetración de corrientes armónicas al sistema de potencia y su equipo asociado, así como calcular los voltajes armónicos que aparecen en los diferentes buses. Su mayor uso, sin embargo, es el cálculo de la impedancia del sistema en cualquier punto de la red sobre un rango de frecuencias, especialmente en aquellas localizaciones donde se generan corrientes armónicas. La mayoría de los programas de flujo de carga armónico son similares a los programas de flujos de carga familiar y de corto circuito; sin embargo, hay algunas diferencias importantes:

1. El programa de flujos de carga armónica debe proporcionar soluciones sobre un rango de frecuencias. Estas frecuencias no deberán ser limitadas a armónicas enteras pero deben incluir puntos intermedios. Es necesario barrer un rango de frecuencias para identificar las frecuencias resonantes que podrían estar cerca de armónicas características de las cargas no lineales. Normalmente, la solución deberá ser obtenida a cada 5 ó 6 Hz.
2. Los elementos de la red son: generadores, transformadores, líneas de transmisión, reactores, capacitores, etc., que tienen impedancias que cambian con la frecuencia. El programa debe contener este requerimiento para construir el modelo de red a cada frecuencia de interés durante la solución.
3. Si la red incluye impedancias ó cargas desbalanceadas, una sola representación de secuencia positiva no puede ser usada ya que los efectos de armónicas triples y desbalance no serán tomados en cuenta. Las tres fases ó tres secuencias deberán ser representadas.

Filtros de Armónicos.

Filtro. Combinación de capacitores, inductancias y resistencias que están configuradas para reducir la corriente armónica y exhibir una impedancia mínima a la corriente fundamental a 60 Hz.

El filtrado es una técnica de mitigación de armónicas usado en los sistemas industriales y de empresas suministradoras. Sin embargo, la aplicación de filtros no elimina corrientes armónicas que son generadas por cargas no-lineales. El objetivo es desviar el flujo de corriente armónico del sistema de potencia ó porciones específicas de un sistema de potencia, en otras palabras, controlar el

flujo de corrientes armónicas. A menudo, las corrientes armónicas fluyen libremente sin restricción en las redes eléctricas.

La aplicación de filtros en sistemas de transmisión de corriente directa (HVDC), limita que las corrientes armónicas generadas por los convertidores fluyan por el sistema. En situaciones donde corrientes armónicas viajan grandes distancias por las redes de alto voltaje (EHV), afectan líneas telefónicas cercanas.

Donde la carga industrial y comercial está creciendo, es fácil identificar problemas potenciales y planear su mitigación. Sin embargo, las fuentes armónicas pueden haber existido en un sistema desde hace mucho tiempo, sin ser detectadas y sin causar problemas, hasta que se realiza un cambio en la red. Se ha estimado que de 30% a 60% de la nueva carga para procesos industriales es no lineal y genera corrientes armónicas.

Características de un Filtro.

Los dos tipos principales de filtros armónicos normalmente empleados son: el derivación y el serie.

El filtro en derivación (paralelo) aparece como en una impedancia muy baja para las ondas de frecuencias armónicas, y una gran impedancia a la frecuencia fundamental de 60 Hz. El filtro en serie con la carga trabaja de manera opuesta. Presenta una impedancia alta a la corriente armónica y una baja impedancia en 60 Hz. Una desventaja de los filtros en serie es que deben estar fabricados para la corriente total de línea, incluyendo las armónicas, y eso los hace más caros que

los otros. Pero, los filtros en serie a veces se utilizan para regular el voltaje como ventaja adicional.

El filtro en derivación tiene una baja impedancia a su frecuencia de sintonía, además puede sintonizarse a una ó más frecuencias discretas o sobre un ancho de banda de frecuencias. El filtro serie es de bloqueo y tiene una alta impedancia a su frecuencia de sintonía. La figura 3.17 muestra la composición de estos dos tipos.

Un tipo particular de filtro de bloqueo o serie es el reactor de alisamiento usado en el sistema de transmisión HVDC. Éste no es sintonizado a una frecuencia particular ya que es un sólo elemento inductivo. Sin embargo, actúa como una alta impedancia a las armónicas del lado de CD y también actúa como alisador del pico de la onda de CD, estableciendo una corriente directa continua.

El enlace de CD de los controladores de velocidad también usa un reactor de alisamiento para el mismo propósito.

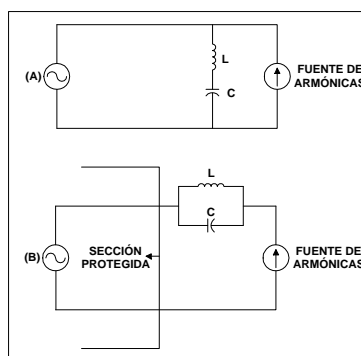


Fig. 3.17. Tipos de filtros más comunes: (a) filtro en derivación; (b) filtro de bloqueo ó serie.

✚ Filtros en Derivación.

Los filtros en derivación son ampliamente usados en los sistemas de potencia. El diseño más común es el sintonizado a una sola frecuencia, ver figura 3.18. La resistencia mostrada es la del reactor ya que las pérdidas del capacitor son despreciables.

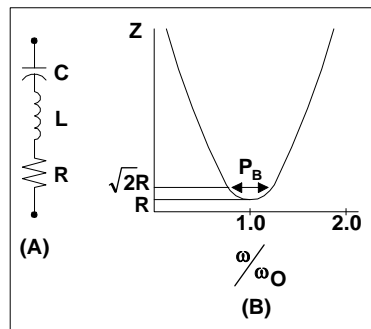


Fig. 3.18. - Filtro en derivación: (A) diagrama esquemático; (B) impedancia característica vs frecuencia

La frecuencia resonante del filtro está dada por la expresión:

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

donde: f_0 = frecuencia resonante (Hz).

L = inductancia del filtro (H).

C = capacitancia del filtro (F).

Alternativamente, la frecuencia resonante puede expresarse en términos de las reactancias a la frecuencia fundamental:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

donde: X_L = es la reactancia inductiva del filtro.

X_C = es la reactancia capacitiva del filtro.

El valor de la resistencia determina el factor de calidad (Q) del filtro y es igual a la reactancia inductiva ó capacitiva a la frecuencia de resonancia entre la resistencia:

$$Q = \frac{X_{L(fr)}}{R} = \frac{X_{C(fr)}}{R}$$

Donde: Q = factor de calidad

R = resistencia filtro

$X_{L(fr)}$ = reactancia inductiva a la frecuencia resonante

$X_{C(fr)}$ = reactancia capacitiva a la frecuencia resonante

Cuanto mayor es Q indica menores pérdidas y más aguda la característica de impedancia vs frecuencia del filtro. La agudeza de la característica del filtro se define con el "paso banda," que es el rango de frecuencia definido por los puntos donde la reactancia del filtro es iguala a la resistencia del mismo filtro. En estos límites, el ángulo de la impedancia es 45°. El paso banda (PB) se define como:

$$PB = \frac{\omega_0}{Q}$$

donde: PB = paso banda

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

Los valores típicos de Q para un filtro sintonizado son de 20 a 150, el valor de 50 es muy común.

🚧 Filtro de doble sintonía.

Donde sólo se usan dos filtros de una sintonía c/u, por ejemplo de 5^a y 7^a armónicas, un filtro de doble sintonía puede usarse en lugar de aquellos dos. La impedancia característica de este tipo de filtro se muestra en figura 3.19. Un filtro de doble sintonía tiene dos ventajas sobre el de una sola sintonía:

1. A frecuencia fundamental, las pérdidas de potencia son menores.
2. Un inductor, en lugar de dos, está sujeto a la aplicación de sobretensiones de impulso pleno.

Este tipo de filtro se utiliza en estaciones convertidoras de transmisión de corriente directa (HVDC). Los filtros de doble sintonía de gran capacidad son baratos y por lo tanto, no se usan en aplicaciones industriales y comerciales.

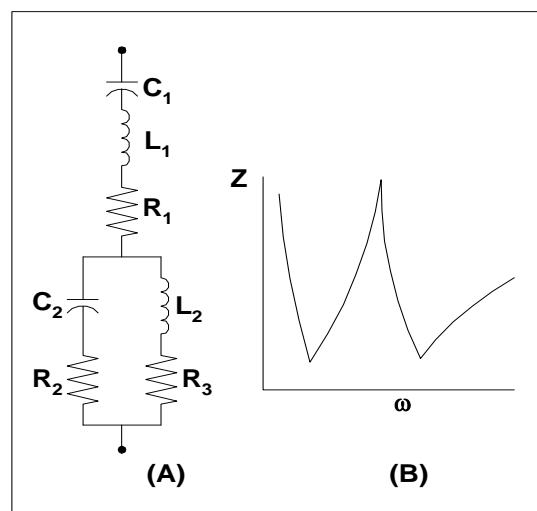


Fig. 3.19. - Filtro de doble sintonía; (A) diagrama esquemático; (B) característica de impedancia vs. frecuencia.

La selección de un filtro sintonizado puede ser resumida por lo siguiente tres pasos:

1. Seleccione los kVAR capacitivos necesarios para mejorar el factor de potencia.
2. Seleccione un reactor que resuene en serie con el capacitor a la armónica apropiada.
3. Calcule voltaje pico a través del capacitor y la I_{rms} total a través del reactor. Verifique los aguantes (duties) contra las capacidades nominales de cada componente.

Hay una Q óptima que minimiza la componente de voltaje armónico. Este es dado

por:

$$Q_{opt} = \frac{1 + \cos \varphi}{2 \delta \sin \varphi}$$

donde: δ = desintonía relativa del filtro

φ = ángulo de fase de la impedancia del sistema

Cuando $\varphi < 90^\circ$

$$\delta = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{\Delta F}{F_0} + 0.5 \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right)$$

Normalmente, se selecciona un ángulo de fase del sistema conservador basado en cálculo de flujos de carga. El voltaje armónico puede ser verificado usando la expresión:

$$V_h = \frac{2I_h R}{\text{sen}\phi}$$

donde: V_h = voltaje armónico.
 I_h = corriente armónica.
 R = resistencia del filtro

Se selecciona una Q adecuada para minimizar pérdidas y proveer un ancho banda bastante amplio para cubrir los efectos de desintonización. Usualmente a mayor Q se proporciona un mejor filtrado.

La potencia reactiva y pérdidas de un filtro están dadas por:

$$\text{MVAR}_C = \frac{V_S^2}{X_C - X_L} \quad P = R \left(\frac{\text{MVAR}_C}{V_S} \right)^2 = RI^2$$

V_S = voltaje nominal del sistema en kV

X_C = reactancia capacitiva del filtro

X_L = reactancia inductiva del filtro

P = pérdidas del filtro

R = resistencia del filtro

Características Nominales de los Capacitores.

Los capacitores operan a tensiones de voltaje relativamente altos. Como sucede a otros equipos de potencia, sobrevoltaje transitorios ó temporales pueden romper el dieléctrico. De acuerdo al estándar IEEE 18-1980, los capacitores en paralelo se

diseñan para operar sin pérdida de la vida útil esperada, bajo las siguientes condiciones:

1. Hasta 135% de los kVAR nominales, incluidos los efectos de sobrevoltaje, armónicas y tolerancias de fabricación.
2. Hasta 120% del voltaje nominal incluyendo armónicas pero no transitorios.
3. Hasta 120% de la corriente nominal rms, incluyendo la fundamental y armónicas.
4. Transitorios por switcheo con voltajes pico hasta de 2 pu's.

Los efectos de voltajes y corrientes armónicas son la preocupación principal para los bancos de capacitores en derivación, especialmente en capacitores utilizados en filtros armónicos. Un síntoma de problemas armónicos es la frecuencia excesiva de fusión de fusibles que protegen al banco de capacitores.

El diseño del filtro debe verificar los niveles esperados de voltaje, corriente y potencia reactiva total incluyendo armónicas.

La figura 3.20 muestra los niveles tolerables de voltaje y corrientes armónicas para limitar la capacidad del capacitor al 135% de la nominal, asumiendo que el voltaje y la corriente consisten de la fundamental más una componente armónica.

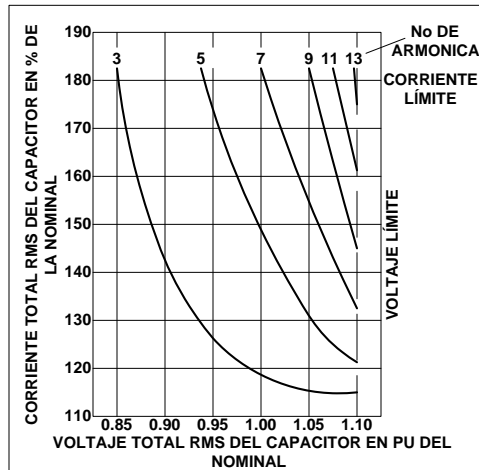


Fig. 3.20. Límites tolerables de voltaje y corriente armónica en el capacitor.

En situaciones reales, con algunas componentes armónicas en las formas de onda de voltaje y corriente, los niveles aceptables de contenido armónico deberán ser menores que los mostrados en la figura para cada componente.

CAPITULO IV

DIMENSIONAMIENTO, OPERACIÓN Y PROTECCIÓN DE BANCO DE CAPACITORES

Dimensionamiento de bancos de capacitores de fusibles externos, trifásicos y conectados en estrella flotante.

Generalidades

Para determinar la capacidad de un banco de capacitores se realizan estudios de flujos de potencia (en demanda mínima, media y máxima) y/o se analiza la carga (curvas de demanda diaria, perfiles de potencia real, reactiva, FP y voltaje) de tal manera que dicho banco de capacitores no esté entrando y saliendo de operación, que en demanda mínima y con el banco de capacitores insertado el voltaje no se eleve arriba del 3% del nominal.

$$\% \Delta V = \frac{MVAR_c}{MVA_{cc}} \times 100$$

Conexión del banco de capacitores.

Los bancos de capacitores pueden ser conectados en delta, estrella sólidamente aterrizada o flotante, doble estrella sólidamente aterrizada o flotante. La conexión delta se encuentra en sistemas de baja tensión y se determina generalmente por razones económicas.

Las conexiones estrella y doble estrella sólidamente aterrizada se aplica sólo en sistemas eléctricos de potencia multi-aterrizados y en todos los niveles de tensión, en éste caso las armónicas triples existentes (de secuencia cero) fluyen por los circuitos de neutro o de retorno a tierra y pueden causar problemas de interferencia telefónica o en los circuitos de control, la ventaja es que se presentan sobretensiones transitorias menores que en la conexión flotante. La conexión estrella y doble estrella flotante se aplica en cualquier sistema (multi-aterrizado o flotante).

Ya establecida la conexión del banco de capacitores, se especifica para un 1.05 PU del voltaje nominal (los sistemas eléctricos de potencia son dinámicos y el voltaje podría variar un $\pm 5\%$ del nominal) más la suma aritmética de los voltajes armónicos. Construidas las unidades capacitoras en base a la Norma IEEE- Std 18 - 1992.

Voltaje para especificación $V_{op} = 1.05 V_1 + \sum V_h$

V_1 = Voltaje nominal a 60 Hz.

V_h = Voltaje armónico (2^a, 3^a, 4^a, 5^a, 7^a, Etc.)

Para obtener la potencia deseada se deberá incrementar la potencia nominal un 10%, ya que a voltaje nominal sólo suministrará dicho banco de capacitores el 90% de su potencia nominal (por la relación al cuadrado del voltaje nominal entre el voltaje especificado).

Para el caso donde se desconozcan los voltajes armónicos, se especificará el banco de capacitores para 1.05 PU del voltaje nominal, formado por unidades capacitoras construidas en base a la Norma IEEE- Std 18 - 1992 y también para obtener la potencia deseada se deberá incrementar la potencia nominal un 10%, ya que a voltaje nominal sólo suministrará dicho banco de capacitores el 90% de su potencia nominal (por la relación al cuadrado del voltaje nominal entre el voltaje especificado).

✚ Dimensionamiento del banco de capacitores

$$\text{No. de Grupos Serie por Fase} = \frac{1.05 (\text{Voltaje Nominal del Sistema})}{(\sqrt{3})(\text{Voltaje Nominal de Unidades Capacitoras})}$$

$$(\text{No. de Unidades Capacitoras de cada Grupo Serie}) = \frac{\frac{\text{Capacidad del Banco Trifásico}}{(3)(\text{No. de Grupos Serie por Fase})}}{\text{Capacidad de las Unidades Capacitoras Seleccionadas}}$$

Se elige la capacidad de unidades capacitoras de tal manera que cuando opera un fusible de una unidad capacitora de un grupo serie, el voltaje de las unidades restantes (V_{C1}) sea menor a 1.1 el voltaje nominal de las mismas $\left(\frac{V_{C1}}{V_n} \right)$.

El Voltaje en Unidades Capacitoras restantes del grupo serie fallado:

$$V_{C1} = \frac{3(V_{LG})(P)}{3S(P - F_1) + 2F_1}$$

El Voltaje de grupos serie sanos de la misma fase donde fallo alguna Unidad Capacitora de un grupo serie:

$$V_{C2} = \frac{3V_{LG}(P - F_1)}{3S(P - F_1) + 2F_1}$$

El Voltaje de neutro a tierra física:
$$V_{NG} = \frac{V_{LG} * F_1}{3S(P - F_1) + 2F_1}$$

En donde:

V_{LG} = Voltaje de línea a tierra.

S = Número de grupos serie.

P = Número de unidades capacitoras del grupo serie.

F_1 = Número de unidades falladas.

Ya teniendo la localización y capacidad del banco de capacitores, es necesario tener la corriente o potencia de corto-circuito trifásico y monofásico, la relación X/R y calcular la frecuencia de resonancia paralelo entre el sistema y dicho banco de capacitores.

$$\bar{f} = \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVAR_C}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_S}} \quad (\text{pu})$$

Si la frecuencia de resonancia ocurre a una frecuencia característica o cercana a ella (3ª, 5ª, 7ª, 11ª y 13ª), se estima y se calcula la distribución de corrientes

armónicas, así como la distorsión armónica individual y total de corrientes y voltajes armónicos, cuidando que éstos valores sean menores a los límites que establece la norma L000045 de CFE o la IEEE Std 519 y además verificar que los diferentes equipos soporten la distorsión armónica presente en el sistema.

Corriente y voltaje RMS:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_h^2} \quad V_{\text{RMS}} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_h^2}$$

Distorsión armónica individual de corriente y voltaje:

$$\% \text{HDi} = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad \% \text{HDv} = \frac{V_h}{V_1} \times 100$$

Distorsión armónica total de corriente y voltaje:

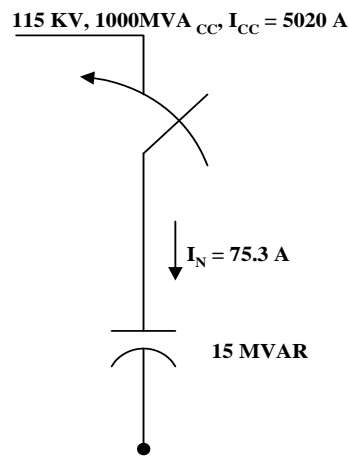
$$\% \text{THDi} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad \% \text{THDv} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

En caso de no cumplir con lo establecido por la norma, se tendrá que disminuir la capacidad del banco de capacitores o incrementar la capacidad de corto-circuito del sistema o dimensionar un filtro en lugar de un banco de capacitores o colocar un reactor de choque o aplicar la Norma L000045 de CFE referente a la inyección de corrientes armónicas por parte de los usuarios, Etc.

En caso de resultar dos bancos de capacitores, se tendrá que instalar en uno de ellos un reactor de amortiguamiento ($0.5 \leq L \leq 5 \text{ mH}$) para limitar la corriente de inrush al energizar un banco estando el otro conectado y para limitar la corriente de inrush para una falla externa.

🚧 CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE INRUSH

1.- Al energizarse un banco de capacitores de 15 MVAR en 115 KV, teniendo una capacidad de corto circuito trifásico de 1000 MVA_{CC} .



$$I_{\text{INRUSH MÁX}} (\text{A}) = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{CC} \cdot I_N}$$

$$= \sqrt{2} \cdot \sqrt{5020 (75.3)}$$

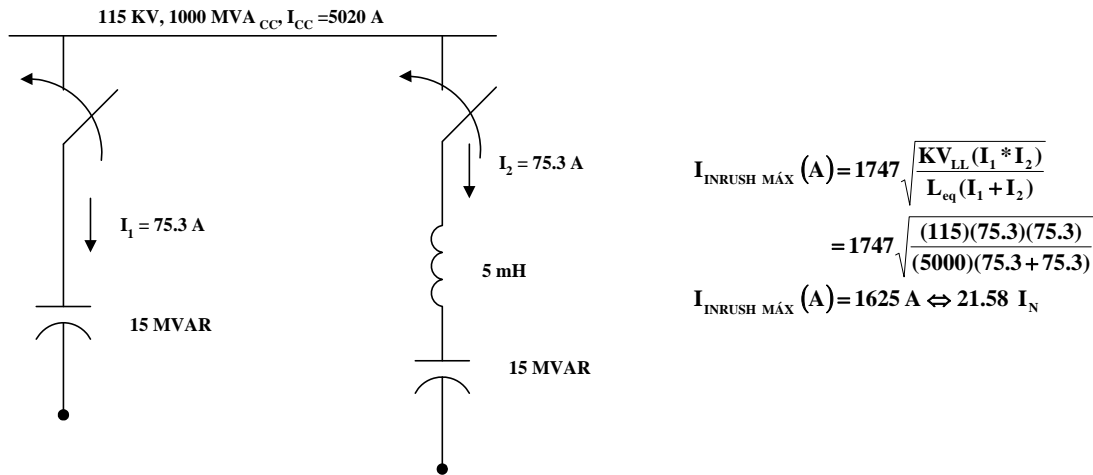
$$I_{\text{INRUSH MÁX}} (\text{A}) = 869.5 \text{ AMP'S}$$

Frecuencia de la corriente de INRUSH.

$$\bar{f} = \sqrt{\frac{I_{CC}}{I_N}} = \sqrt{\frac{5020}{75.3}} = 8.165 \Leftrightarrow 490 \text{ Hz}$$

EL PERÍODO $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{490 \text{ Hz}} = 2 \text{ mS}$

2.- Al energizarse un banco de capacitores de 15 MVAR, 115 KV, con reactor de amortiguamiento de 5 mH, estando otro energizado de las mismas características.



Frecuencia de la corriente de INRUSH:

$$f (\text{KHz}) = 9.5 \sqrt{\frac{f_s \text{ KV}_{\text{LL}} (I_1 + I_2)}{L_{\text{eq}} (I_1 * I_2)}}$$

$$f (\text{KHz}) = 9.5 \sqrt{\frac{(60)(115)(75.3 + 75.3)}{(5000)(75.3)(75.3)}} = 1.818 \text{ KHz}$$

El período de la corriente de INRUSH

$$T(\text{seg}) = \frac{1}{f} = \frac{1}{1818} = 5.5 \text{ E} - 4 \text{ Seg} \Leftrightarrow 0.55 \text{ mS}$$

🚧 **Guía para la protección de bancos de capacitores de potencia conectados en estrella flotante.**

En el dimensionamiento de los bancos de capacitores se consideraron unidades capacitoras de fusibles externos de diferentes capacidades y voltajes nominales

de 13.8 kV conectados en estrella flotante, resultando 5 grupos serie para bancos conectados en sistemas de 115 kV y de 3 grupos para 69 kV.

Los criterios de protección son asegurar un daño mínimo al banco en caso de una falla interna, removiéndolo del sistema antes que el daño sea severo. Cuando una unidad capacitadora falle, se aislará sin causar problemas a unidades adyacentes.

El esquema de protecciones considera lo siguiente:

1.- Sobrecorrientes por fallas en el bus del banco de capacitores: Al ocurrir una falla entre el interruptor y el banco de capacitores opera rápidamente el relevador 50F/51F.

2.- Sobrecorrientes por falla de alguna unidad capacitadora: Al corto-circuitarse una unidad capacitadora opera rápidamente el fusible individual, sacándola de operación previniéndose así la ruptura de la caja que causaría daño a unidades adyacentes. Podrá salir una unidad capacitadora de un grupo serie continuando la operación del banco de capacitores ya que el sobrevoltaje de las unidades restantes del grupo no rebasa el 10% permitido (enviando sólo una alarma el relevador 64N). Cuando fallan y salen de operación 2 unidades capacitadoras de un grupo serie el sobrevoltaje de las unidades restantes del mismo grupo rebasa el 10% permitido, el 64N lo sensa y envía alarma y disparo a interruptor del banco de capacitores, podría darse el caso en el que saliendo de operación 2 unidades capacitadoras de un grupo serie, el sobrevoltaje en las unidades restantes del mismo grupo no rebasa el 10% permitido, por lo tanto el 64N enviará alarma y disparo en cuanto salgan de operación 3 unidades capacitadoras de un grupo serie.

Está diseñado el esquema de protecciones de tal manera que cuando falle la operación del fusible, opere el relevador 64N mucho antes de la ruptura de la caja.

3.- Sobre-voltajes continuos en unidades capacitoras: No se permiten sobrevoltajes continuos superiores al 10 % del nominal (debido a las condiciones normales o anormales de operación del sistema o por fallas internas del banco de capacitores), ya que operará indirectamente después de un tiempo el relevador 51F y/o directamente el 59B.

4.- Que al corto-circuitarse una unidad capacitadora de un grupo serie, se tenga una baja magnitud de corriente total de descarga suministrada por las unidades capacitoras sanas del mismo grupo: para lograrlo, en el dimensionamiento del banco de capacitores se deben evitar capacidades de grupos serie superiores a 4650 KVAR.

5.- Corrientes de inrush durante la energización del banco de capacitores: se consideran las corrientes de inrush para determinar la capacidad y tipo del fusible individual de las unidades capacitoras. La corriente máxima de inrush dividida entre el número de unidades en paralelo del grupo serie, proporciona la corriente de inrush que circula por cada unidad capacitadora durante 0.1 seg., la cual no debe alcanzar la curva de operación característica del fusible (mínimum melting time)

6.- Fallas de arco en y entre racks de bancos de capacitores: Las corrientes por éste tipo de fallas son relativamente bajas y son detectadas por el relevador 51F,

el cuál debe tener una característica inversa de tiempo corto para que opere rápidamente antes que el daño sea severo.

7.- Sobrecorrientes por falla interna de fase a tierra: Son corrientes de baja magnitud que son detectadas por el relevador 51N (conectado residualmente), el cuál libra la falla muy rápidamente y el 64N opera como respaldo.

8.- Sobrevoltajes transitorios en el sistema: Se aplican apartarrayos de capacidad adecuada para atenuarlos.

✚ Criterios para determinar la capacidad del fusible y ajustes de los relevadores para la protección del banco de capacitores, conectado en estrella flotante.

1.- Potencia reactiva 3ϕ suministrada por el banco de capacitores al voltaje nominal del sistema.

Nota: Para formar los grupos serie del banco de capacitores se consideran unidades capacitoras de 13.8 kV nominales.

$$Q_{3\phi} = \left(\frac{V_N}{13.8(S)} \right)^2 (Q_N)$$

Donde:

V_N = Voltaje Nominal del Sistema entre fases en kV

S = Número de grupos serie

Q_N = $Q_{Nominal}$ del banco de capacitores

2.- Corriente de operación (I_{OP}) del banco de capacitores al voltaje nominal del sistema.

$$I_{OP} = \frac{Q_{3\phi}}{\sqrt{3} (V_N)}$$

3.- Capacidad de los fusibles externos "Tipo K" de las unidades capacitoras (I_f)

$$I_f = I_{OP}$$

Se toma el valor de la capacidad del fusible igual ó el inmediato superior.

4.- Cálculo de la Relación de Transformación de los TC's que alimentan a los relevadores 50F/51F ($I_{prim.} / 5 A$)

$$I_{prim.} = 2 I_{OP}$$

$$I_{cc3\phi} \leq 20 I_{prim.}$$

La relación de transformación seleccionada debe cumplir con ambas igualdades.

5.- Cálculo de ajuste del relevador 51F (con característica inversa de tiempo corto).

5.1 Corriente mínima de puesta de operación del Relevador

$$I_{PICKUP} = \frac{1.1 I_{OP}}{RTC}$$

5.2 El Dial ó la Palanca se selecciona de tal manera que la curva de operación característica quede ligeramente arriba del tiempo de libramiento total del fusible (Total clearing time).

6.- Cálculo del ajuste del Relevador Instantáneo (50F).

6.1 Instantáneo = $3 I_{OP}$

6.2 Tiempo de retardo = 0.1 Seg.

7.- Cálculo del ajuste del 51N (Característica de operación de tiempo inverso)

7.1 Corriente mínima de puesta en operación del Relevador

$$I_{PICKUP} \cong 0.15 I_{OP}$$

7.2 El Dial ó la Palanca se selecciona para la corriente de falla a tierra mínima, donde el tiempo de operación es de 0.2 seg aproximadamente.

8.- Cálculo de ajustes del relevador que protege contra desbalance del neutro del banco de capacitores (64N).

8.1 Alarma por pequeño desbalance

$$V_{AJUSTE} \cong 0.80 V_{NG1} ;$$

Tiempo de operación = 5 Seg.

V_{NG1} = Voltaje de neutro a tierra cuando sale de operación una unidad capacitadora de un grupo serie.

8.2 Alarma y disparo por desbalance del banco de capacitores.

$$V_{AJUSTE} \cong 0.80 V_{NG2}$$

Tiempo de operación = 5 Seg.

V_{NG2} = Voltaje de neutro a tierra cuando salen de operación 2 unidades capacitoras de un grupo serie.

8.3 Alarma y disparo por severo desbalance del banco de capacitores.

$$V_{AJUSTE} \cong 2.0 V_{NG2}$$

Tiempo de operación: Para la corriente (I_{CC1}) cuando se cortocircuita una unidad capacitadora, se selecciona un tiempo ligeramente arriba de la curva del tiempo de libramiento total del fusible (total clearing time) individual de la unidad capacitadora:

$$0.5 \leq \text{Tiempo de Ajuste} \leq 0.8 \text{ Seg.}$$

9. – Cálculo de Ajustes del relevador de bajo y alto voltaje 27B/59B.

9.1 Ajuste del relevador de bajo voltaje 27B.

$$V_{AJUSTE} \cong 0.8 V_{FT} / RTP$$

V_{FT} = Voltaje nominal de fase a tierra

RTP= Relación de transformación del transformador de potencial

9.2 Ajuste del elemento de alto voltaje 59B.

$$V_{AJUSTE} \cong 1.13 V_{FT} / RTP$$

Tiempo de retardo sugerido = 2 Seg.

Notas:

1. Es muy importante que el Banco de Capacitores quede balanceado (que las capacitancias de las fases sean iguales dentro de lo posible), para tener una corriente residual secundaria menor al 10% y el voltaje de neutro que tienda a cero.
2. En caso de salir de operación el Banco de Capacitores por falla externa, es conveniente analizar la situación y subir Dial ó tiempo de timer's de los dispositivos de protección.

Esquemas de medición, control y protección de los bancos de capacitores

El banco de capacitores debe contar con el siguiente equipo:

I.- El equipo de medición del banco de capacitores debe medir los siguientes parámetros como mínimo:

1. Voltajes instantáneos RMS de fase y entre fases (V_a , V_b , V_c , V_{ab} , V_{bc} y V_{ca}) considerando los voltajes armónicos presentes

2. Corrientes instantáneas RMS de fase y de neutro (I_a , I_b , I_c e I_n), I_n calculada de $I_a + I_b + I_c$ también considerando las corrientes armónicas
3. Grabación simultánea de la forma de onda de todos los canales de voltaje y corriente durante un segundo (opcional).
4. Potencia reactiva por fase y trifásica (MVAR a, b, c y 3F)
5. Factor de potencia por fase y trifásico (FP a, b, c y 3F)
6. Frecuencia (FREC Hertz)
7. Alimentación de voltaje de directa en el equipo (si lo requiere el equipo)
8. Medición de la distorsión armónica individual y total de corriente y voltaje, que muestre el espectro armónico en su display
9. Medición de sag's, swell's, transitorios e interrupciones, graficados sobre la curva CBEMA (opcional)
10. Medición de componentes simétricas magnitud y ángulo de fase para todas las corrientes y voltajes de entrada (opcional)
11. El equipo de medición debe estar equipado con al menos 2 MB de memoria no volátil para almacenar la información histórica referente a la calidad de la energía, ajustes de alarmas, Etc. (opcional)
12. El equipo de medición debe estar equipado con 4 entradas digitales y 4 salidas digitales, además de 2 salidas analógicas (opcional)

II.- Registrador de eventos que almacene en su memoria no volátil los últimos 30 ciclos de la corriente, voltaje y frecuencia para el análisis de algún disturbio (existen equipos de medición que ya tienen integrada ésta función).

III.- El banco de capacitores debe contar con un control programable de potencia reactiva y factor de potencia para su operación automática.

III.1.- Debe implementarse un Timer en el circuito de control del interruptor del Banco de Capacitores, para evitar la re-energización de dicho banco, este Timer se debe ajustar a 5 minutos que es el tiempo suficiente para que se descargue el banco.

IV.- El fabricante del banco de capacitores deberá suministrar las curvas de operación de fusibles externos seleccionados para la protección individual de las unidades capacitoras

V.- Relevador digital de sobrecorriente 50F/ 51F que traiga integrada la conexión residual del 51N y 1 timer para la salida de disparo del 50F.

V.1.- El instantáneo 50F debe tener un rango de ajuste de 1 a 100 A, con pasos de 0.1 A (5 A nominal).

➤ El rango de ajuste del timer deberá ser de 0.0 a 60 ciclos con pasos de 1 ciclo.

V.2.- El relevador de sobrecorriente de tiempo inverso (51F) debe contar con las siguientes características seleccionables: de tiempo definido, tiempo largo, inversa, muy inversa, extremadamente inversa y de tiempo corto, ésta última es la que se utilizará para la protección de bancos de

capacitores, por lo tanto, es indispensable que el relevador traiga ésta característica.

- El rango de ajuste del tap debe ser como mínimo de 0.5 a 16 A, con pasos de 0.01 A (5 A nominal)
- El rango del dial debe ser de 0.50 a 15 con pasos de .01 (US) o de 0.05 a 1 con pasos de 0.01 (IEC).

V.3.- El relevador de sobrecorriente de tiempo inverso (51N) debe contar con las siguientes características seleccionables: de tiempo definido, tiempo largo, inversa, muy inversa, extremadamente inversa y de tiempo corto, la de tiempo inverso es la que se utilizará para la protección de bancos de capacitores, por lo tanto, es indispensable que el relevador traiga ésta característica.

- El rango de ajuste del tap debe ser como mínimo de 0.5 a 16 A, con pasos de 0.01 A (5 A nominal)
- El rango del dial debe ser de 0.50 a 15 con pasos de .01 (US) o de 0.05 a 1 con pasos de 0.01 (IEC).

VI.- Relevador de sobrevoltaje de neutro (64N), debe tener 3 niveles de ajuste de voltaje con salida para alarma o disparo independiente a través de un timer para cada nivel.

- El rango de ajuste para los tres niveles debe ser de 0 a 150 volts, con pasos de 0.1 volt.

- El rango de ajuste para los tres timer's deberá ser de 0.0 a 10 Seg. con pasos de 0.1 Seg.
- Relevador 64N con compensación de voltaje en el neutro (opcional)

VII.- Relevador de bajo y alto voltaje (27B/59B) los cuales energizan un timer y después de un tiempo envían el disparo del interruptor del banco de capacitores, en muchos relevadores digitales de sobrecorriente está integrado el 27B/59B.

- El rango de ajuste para los dos niveles de voltaje debe ser de 0 a 150 volts, con pasos de 0.1 V.
- El rango de ajuste para los dos timer's deberá ser de 0.0 a 10 Seg. con pasos de 0.1 Seg.

¿Qué hacer cuando opera una protección del banco de capacitores?

1. Anotar que protecciones operaron, a qué hora sucedió, consultar registrador de eventos, si coincidió con alguna falla externa o con alguna energización de un equipo, Etc.
2. Inspeccionar visualmente al banco de capacitores: Algún conductor que provocó alguna falla, flameo de aisladores, fusión de algún fusible externo, unidades capacitores infladas o con fuga del dieléctrico.

3. Al cortocircuitarse una unidad capacitadora opera su fusible externo y cinco segundos después el 64N acciona una alarma que indica: que hubo un pequeño desbalance del banco de capacitores y que en las unidades restantes del grupo fallado se tiene un sobre-voltaje (menor al 110% del nominal) que es tolerable por dichas unidades. El personal de mantenimiento debe esperar el momento adecuado para desenergizar el banco de capacitores (demanda media o mínima), esperar 5 minutos para que se descarguen los capacitores y cerrar cuchilla de puesta a tierra, enseguida medir la capacitancia de la unidad capacitadora “fallada” la cuál debe ser menor al 115% de la nominal y en caso contrario, se debe cambiar por una nueva, medirle su capacitancia, cambiar el fusible de la misma capacidad, abrir cuchillas de puesta a tierra, re-energizar el banco de capacitores y medir el voltaje de neutro a tierra que debe tender a cero (10 o 20 volts es correcto).

4. Si opera el relevador 50F es porque hubo una falla de gran magnitud y por lo tanto, se debe analizar el registrador de eventos e inspeccionar el banco de capacitores, encontrar cuál fue la causa de la operación, corregir el problema y re-energizar dicho banco de capacitores.

5. Cuando hay una falla de fase a tierra dentro del banco de capacitores opera rápidamente el relevador 51N y de respaldo operan el 51F y 64N, por lo tanto, se debe analizar el registrador de eventos, inspeccionar el banco de capacitores y corregir el problema antes de re-energizarlo.

6. Cuando se tiene una falla entre rack's opera el relevador 51F, el cuál debe tener una característica inversa de tiempo corto, para librar la falla lo más pronto posible, por lo tanto, se debe analizar el registrador de eventos, inspeccionar el banco de capacitores y corregir el problema antes de re-energizarlo.

7. Cuando sucede un cierre de dos fases, opera el relevador 64N, por lo tanto, se debe analizar el registrador de eventos y así determinar la causa principal de operación ya que el 64N podría operar por falla en unidad capacitadora (cuando se tiene una mala coordinación de protecciones entre el fusible externo y el tiempo de operación para desbalance severo del 64N), o cuando fallan dos unidades capacitadoras de un mismo grupo serie.

8. Cuando se presenta un sobrevoltaje de frecuencia fundamental por rechazo de carga, opera el relevador 59B y energiza un timer el cuál 2 segundos después envía el disparo del interruptor del banco de capacitores, por lo tanto, se debe analizar el registrador de eventos para determinar la causa de la operación, esperar 5 minutos después de la apertura del interruptor y cuando se tengan las condiciones adecuadas re-energizar el banco.

Cuando se presenta una falla externa monofásica (en la fase fallada habrá una caída de voltaje y en las fases sanas un sobrevoltaje), opera protección

primaria del equipo fallado antes de que el relevador 27B/59B envíe el disparo del interruptor de dicho banco de capacitores.

✚ Ejemplos de coordinación de protecciones de bancos de capacitores, conectados en estrella flotante.

Ejemplo 1 Coordinación de protecciones del banco de capacitores de 7.5 MVAR, en 115 kV, conectado en estrella flotante, con una capacidad de corto-circuito trifásica de $909 \text{ MVA}_{\text{CC}3\phi} \Leftrightarrow 4565 \text{ A}$ en el bus de 115 kV.

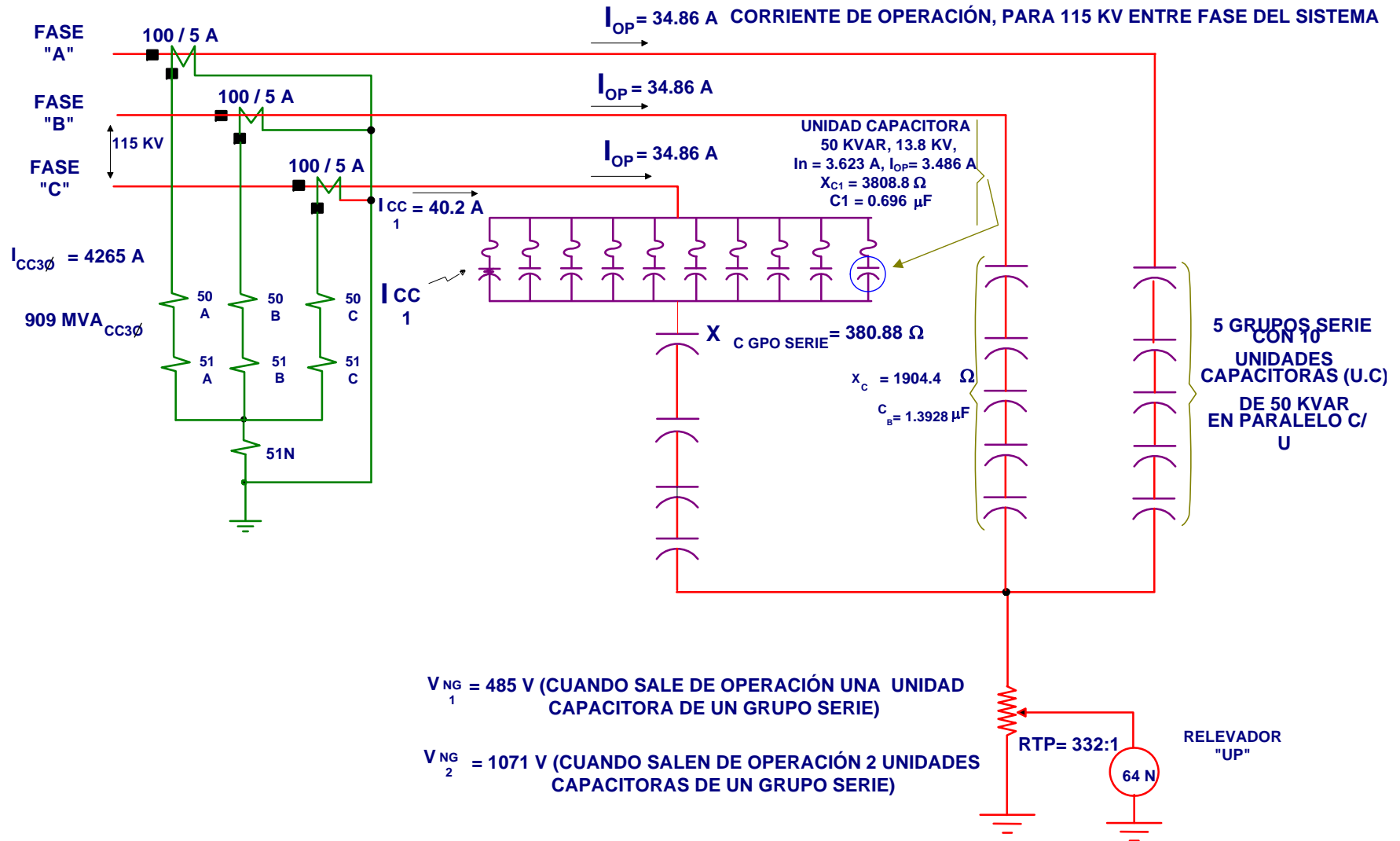
(Banco de Capacitores formado por 5 grupos serie con 10 unidades capacitoras de 50 kVAR y 13.8 kV nominales c/u).

Ejemplo 2. Coordinación de protecciones del banco de capacitores de 15 MVAR, en 115 kV, conectado en estrella flotante, con una capacidad de corto circuito trifásica de $846 \text{ MVA}_{\text{CC}3\phi} \Leftrightarrow 4250 \text{ A}$ en el bus de 115 kV.

(Banco de Capacitores formado por 5 grupos serie con 11 unidades capacitoras de 100 kVAR y 13.8 kV nominales c/u).

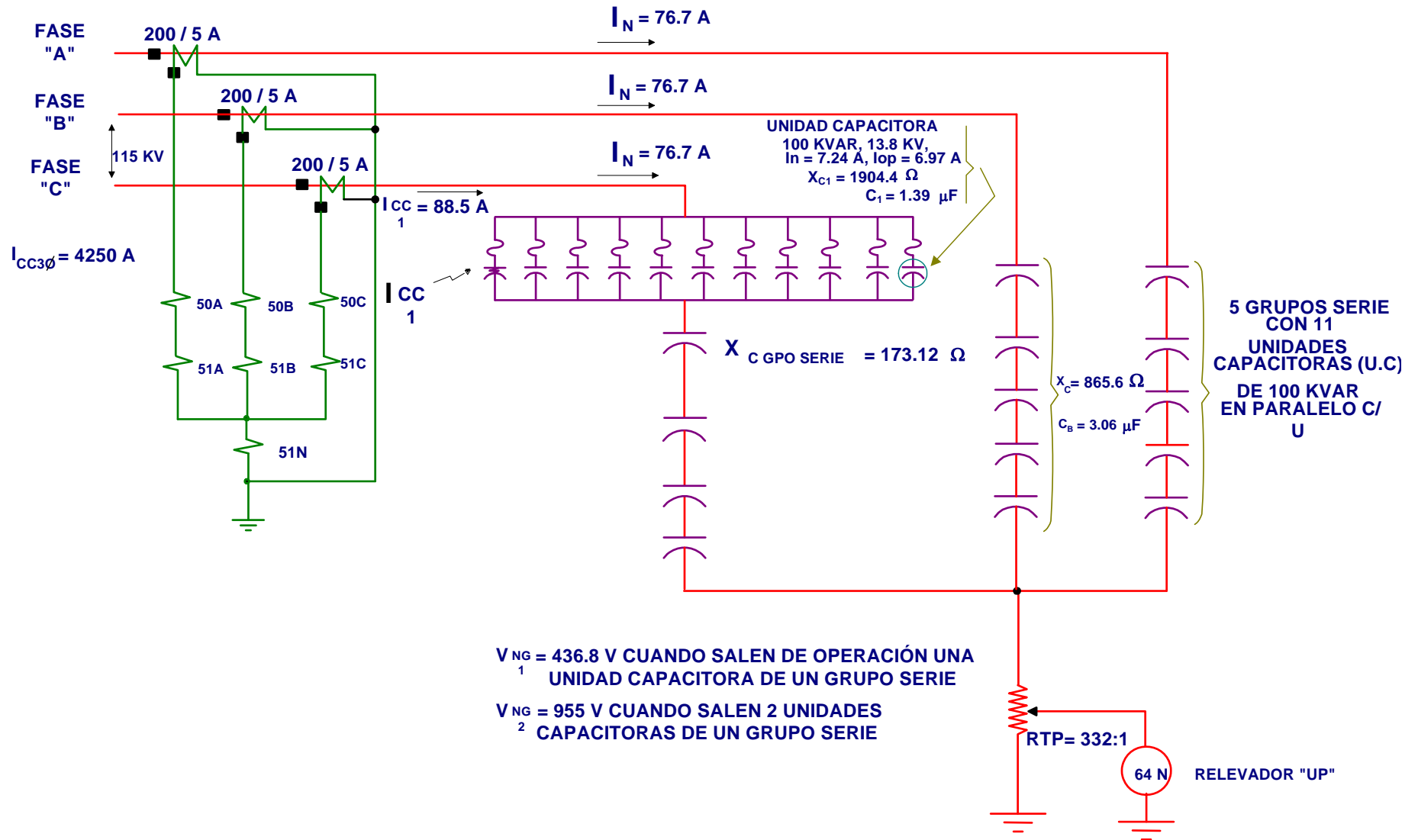
Ejemplo 1: Esquema de protecciones del banco de capacitores de 7.5 MVAR, en 115 KV, conectado en estrella flotante, con una capacidad de corto-circuito trifásica de $909 \text{ MVA}_{cc} \Leftrightarrow 4565 \text{ a}$, en el bus de 115 KV.

Banco de capacitores formado por 5 grupos serie con 10 unidades capacitoras de 50 KVAR y 13.8 KV nominales

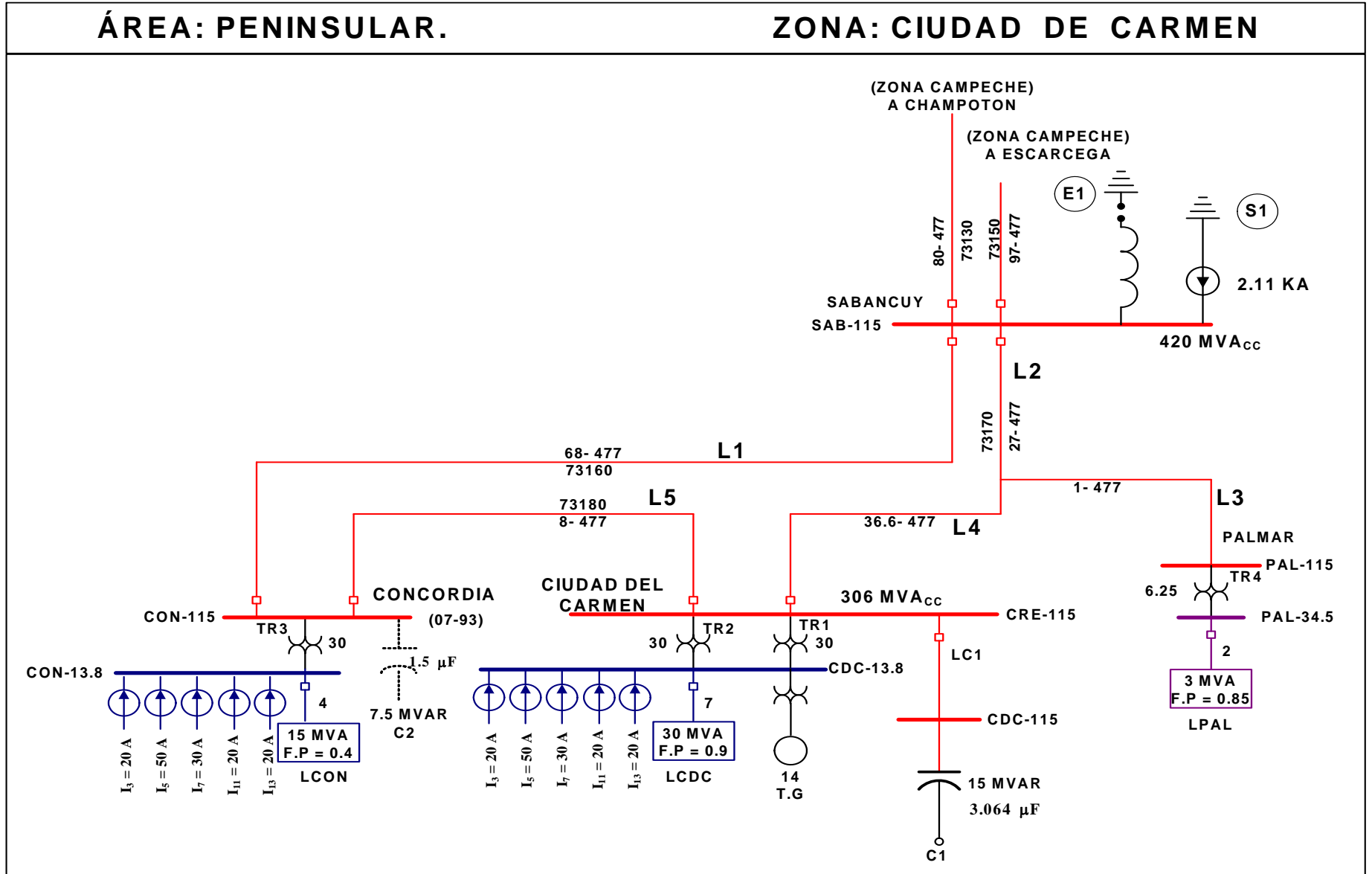


Ejemplo 2: Esquema de protecciones del banco de capacitores de 15 MVAR, en 115 KV, conectado en estrella flotante, con capacidad de corto circuito trifásica de $846 \text{ MVA}_{cc} \Leftrightarrow 4250 \text{ a}$, en el bus de 115 KV.

Banco de capacitores formado por 5 grupos serie con 11 unidades capacitoras de 100 kvar y 13.8 kv nominales



CAPÍTULO V DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA



CAPÍTULO VI

ANÁLISIS ARMÓNICO DE LA ZONA CIUDAD DEL CARMEN, ÁREA PENINSULAR

El análisis armónico se debe realizar cada vez que se vaya a instalar un banco de capacitores (para cualquier capacidad y nivel de voltaje), ya que éste entra en resonancia con el sistema de potencia y podrían amplificarse algunas corrientes armónicas existentes, dando como resultado altos voltajes armónicos que podrían dañar el dieléctrico de los propios bancos de capacitores y al aislamiento del resto del equipo. También dichas corrientes y voltajes armónicos podrían causar ruido en las comunicaciones, sobrecalentamiento de cables y transformadores, mala operación de protecciones y tener errores en la medición de energía eléctrica.

El estudio surgió por la necesidad de conocer que sucederá desde el punto de vista armónico, con la incorporación al sistema de 115 KV de los bancos de capacitores de 7.5 MVAR en la subestación CONCORDIA y 15 MVAR en la subestación CIUDAD DEL CARMEN.

Se modeló el sistema de acuerdo a la información de la red eléctrica, simulándose los siguientes casos:

CDC: Sistema con demanda media, generación de armónicas en las subestaciones CONCORDIA y CIUDAD DEL CARMEN y sin Bancos de Capacitores.

CDC20: Sistema con demanda media, con generación de armónicas en las subestaciones CONCORDIA y CIUDAD DEL CARMEN y solo con el Banco de 7.5 MVAR de la subestación CONCORDIA.

CDC21: Sistema con demanda media, con generación de armónicas en las subestaciones CONCORDIA y CIUDAD DEL CARMEN y solo con el Banco de 15 MVAR de la subestación CIUDAD DEL CARMEN.

CDC22: Sistema con demanda media, con generación de armónicas en las subestaciones CONCORDIA y CIUDAD DEL CARMEN, con Bancos de 7.5 y 15 MVAR conectados.

FACTORES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE Y CORRIENTES

CASO	VOLTAJE DE OPERACIÓN (KV _{RMS})		% DE DISTORSIÓN ARMÓNICO TOTAL DE VOLTAJE EN BUSES		% DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE CORRIENTE EN LÍNEA (Alimentador del banco de capacitores).
	CON-115	CRE-115	CON-115	CRE-115	LC1
CDC20	61.0	60.9	6.73	6.44	—
CDC21	62.5	62.5	6.42	6.76	36.2
CDC22	64.0	64.0	4.51	4.61	23.6

NORMAS IEEE - 519 LÍMITES DE DISTORSIÓN DE VOLTAJE.

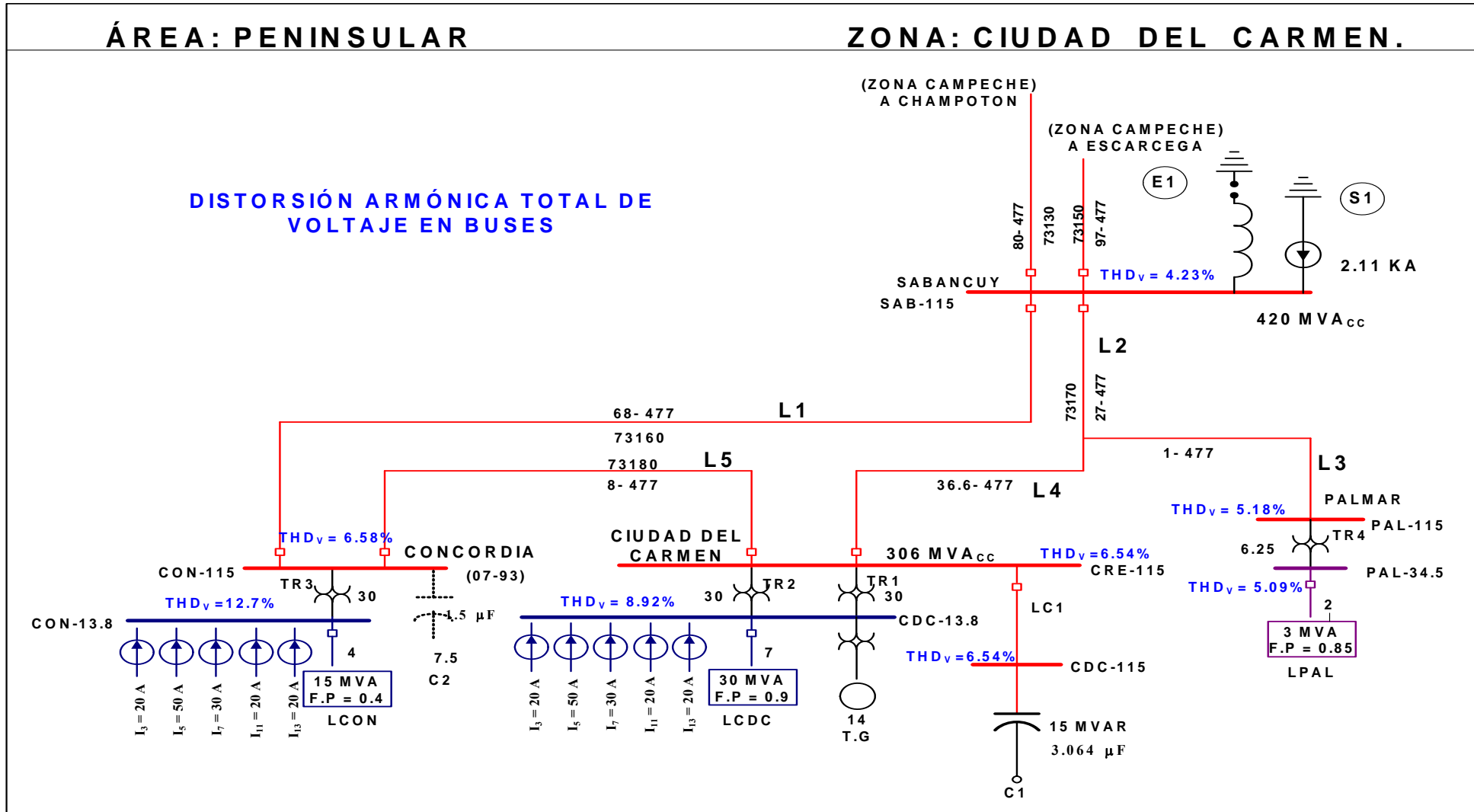
Voltaje del bus en PCC	HDv (%)	THDv (%)
Inferiores a 69 KV	3.0	5.0
69.001 KV hasta 161 KV	1.5	2.5
Superiores a 161 KV	1.0	1.5

HDv = Distorsión de voltaje armónico individual.

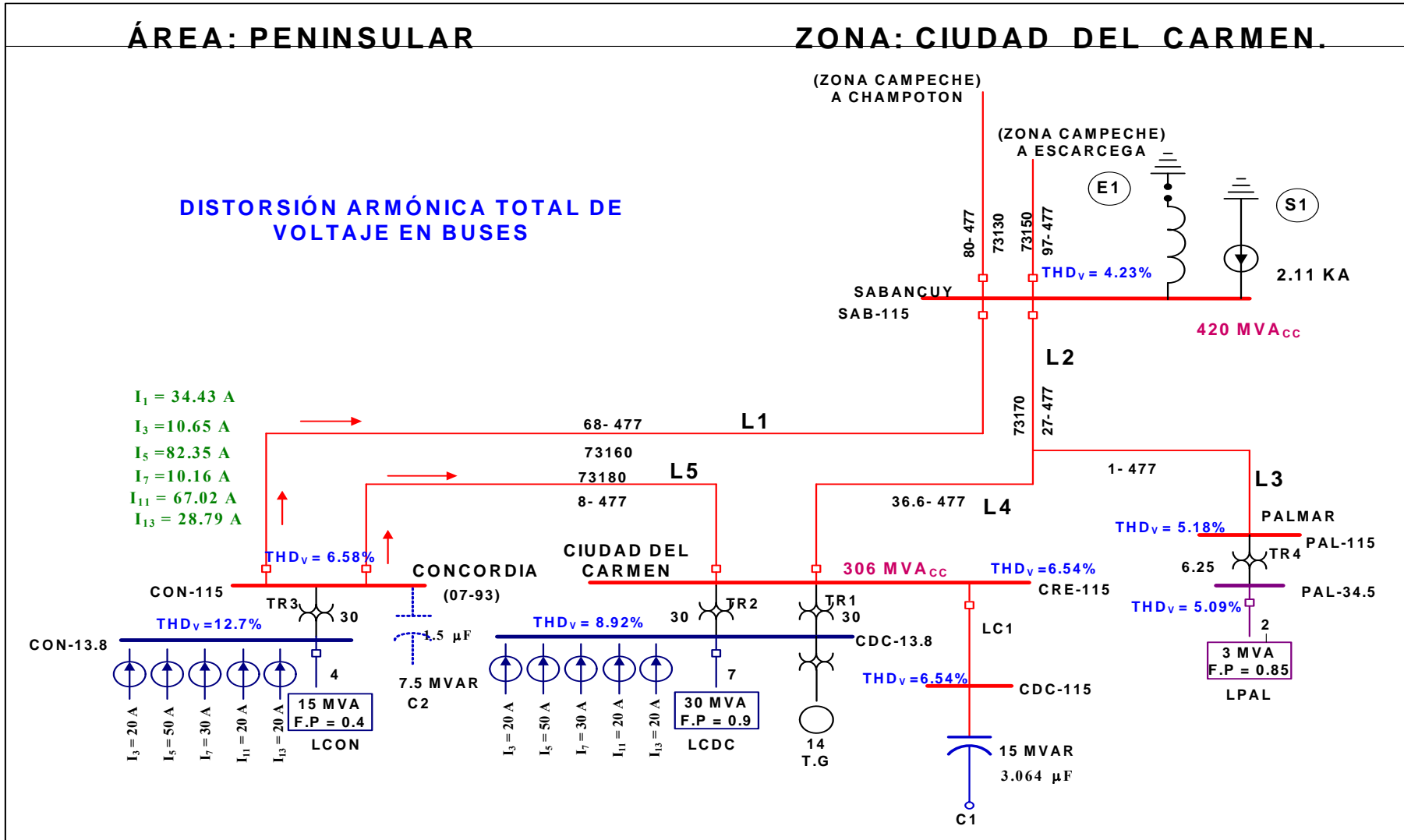
IEEE - 519 LIMITES MÁXIMOS (%) DE DISTORSIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS IMPARES PARA SISTEMAS DE SUBTRANSMISIÓN GENERAL (DESDE 69,001 VOLTS HASTA 161,000 VOLTS)

I_{sc} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	THD
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.0	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

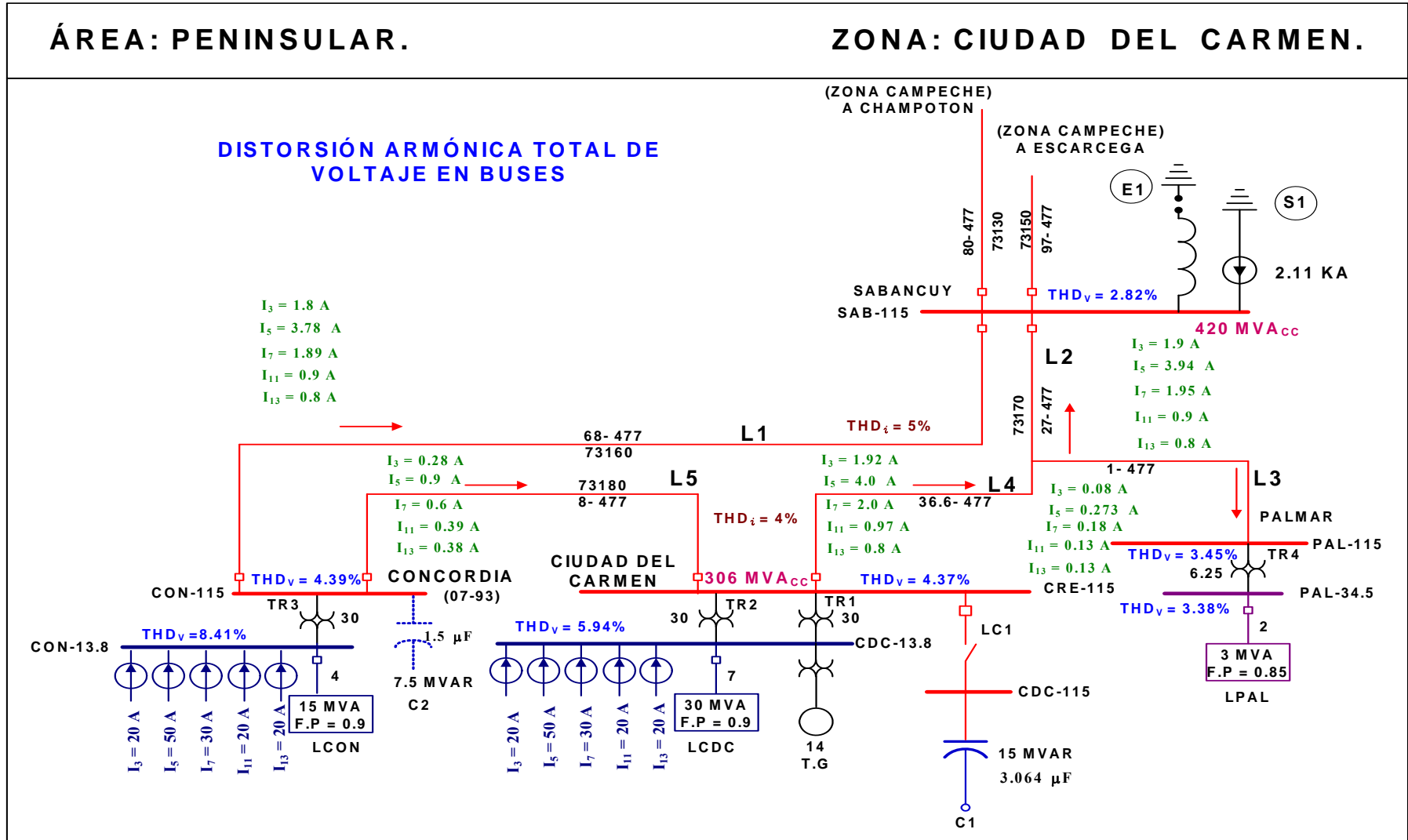
CDC TIF. Sistema con demanda media, con muy alta generación de armónicas en las Subestaciones Concordia y Ciudad del Carmen y sin banco de capacitores.



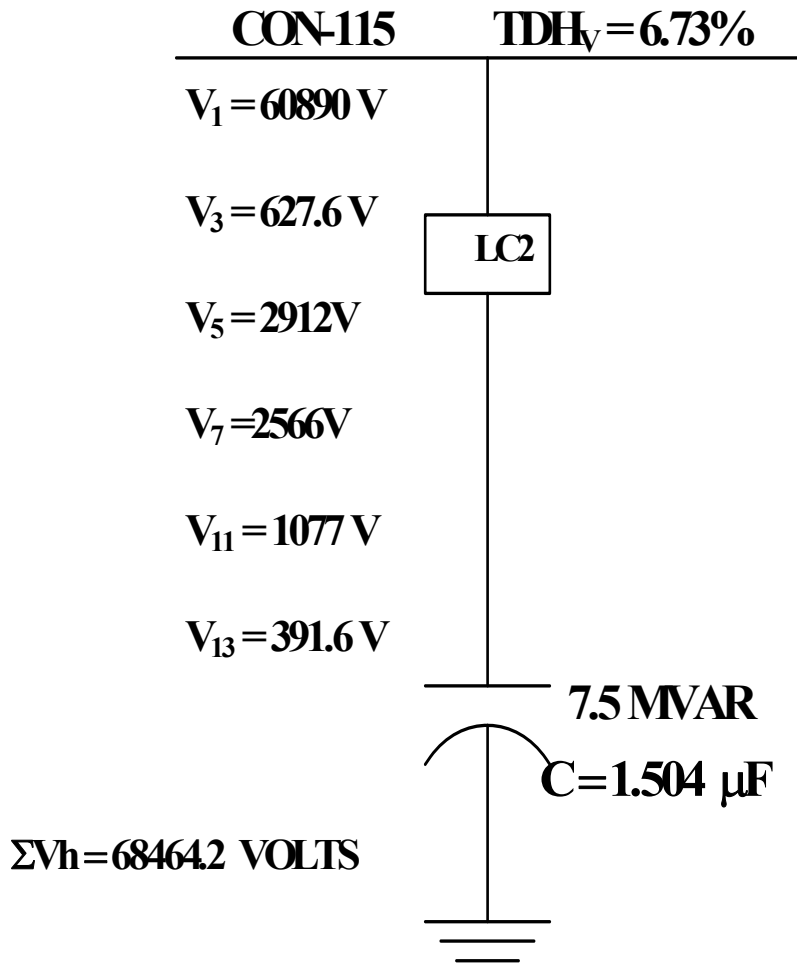
CDC 20: Sistema con demanda media, con generación de armónicas moderadas en las Subestaciones Concordia y Ciudad del Carmen y solo con el Banco de 7.5 MVAR en la Subestación Concordia.



Voltajes y corrientes de operación del banco de capacitores. (considerando las armónicas).CDC: sistema con demanda media, con generación de armónicas en las Subestaciones Concordia y Ciudad del Carmen y sin bancos de capacitores.



CDC20. Sistema con demanda media, con generación de armónicas moderada en las subestaciones Ciudad del Carmen y solo con banco de 7.5 MVAR de la Subestación Concordia.



SI CONSIDERAMOS EL VOLTAJE DE OPERACIÓN NOMINAL DE 66395 V, ENTONCES:

$$\Sigma V_h = 73969.2 \text{ V}$$

$$\Delta V = \frac{73969.2}{66395} = 1.11 \text{ Vn}$$

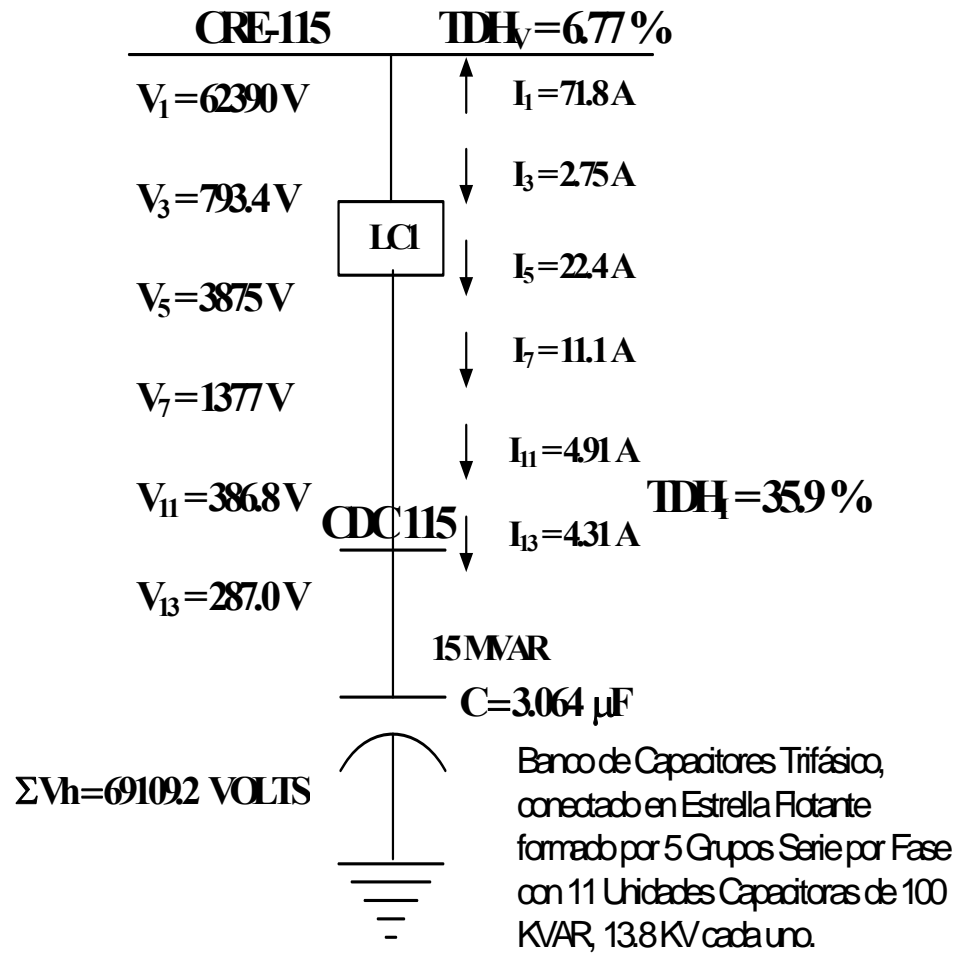
Las unidades capacitoras fabricadas con base a la norma IEEE STD 18, soportan el 10% de sobrevoltaje sin disminuir su vida útil.

Si se dimensiona el banco de capacitores de 7.5 MVAR con unidades capacitoras de 13.8 kV; el voltaje de operación de las unidades capacitoras es:

$$\frac{73969.2}{69000} = 1.072 \text{ PU's}$$

Inclusive podría operar el sistema a 1.03 PU'S de voltaje y el banco de capacitores operará correctamente.

CDC21. Sistema con demanda media, con generación de armónicas moderada en las Subestaciones Concordia y CD. del Carmen y solo con el banco de 15 MVAR de la Subestación CD. del Carmen.



SI CONSIDERAMOS EL VOLTAJE DE OPERACIÓN NOMINAL DE 66395V, ENTONCES:

$$\Sigma V_h = 73114.2 \text{ V}$$

$$\Delta V = \frac{73114.2}{66395} = 1.10 \text{ Vn}$$

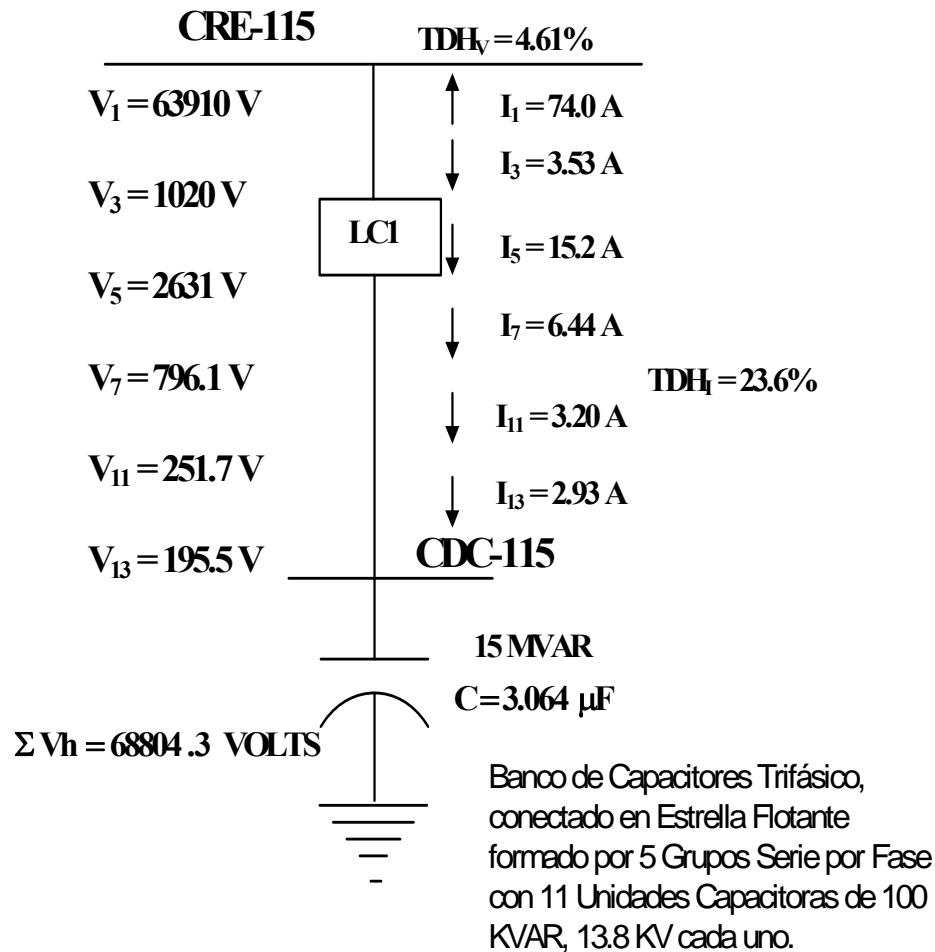
Las unidades capacitoras fabricadas con base a la norma IEEE STD 18, soportan el 10% de sobrevoltaje sin disminuir su vida útil.

Si se dimensiona el banco de capacitores de 15 MVAR con unidades capacitoras de 13.8 kV; el voltaje de operación de las unidades capacitoras es:

$$\frac{73114.2}{69000} = 1.059 \text{ PU's}$$

Inclusive podría operar el sistema a 1.04 PU'S de voltaje y el banco de capacitores operará correctamente.

CDC22. Sistema con demanda media, con generación de armónicas moderada en las S.E´S Concordia y CD. del Carmen, con bancos de 7.5 MVAR y 15 MVAR conectados.



SI CONSIDERAMOS EL VOLTAJE DE OPERACIÓN NOMINAL DE 66395 V, ENTONCES:

$$\Sigma V_h = 71289.8 \text{ V}$$

$$\Delta V = \frac{71289.8}{66395} = 1.073 \text{ Vn}$$

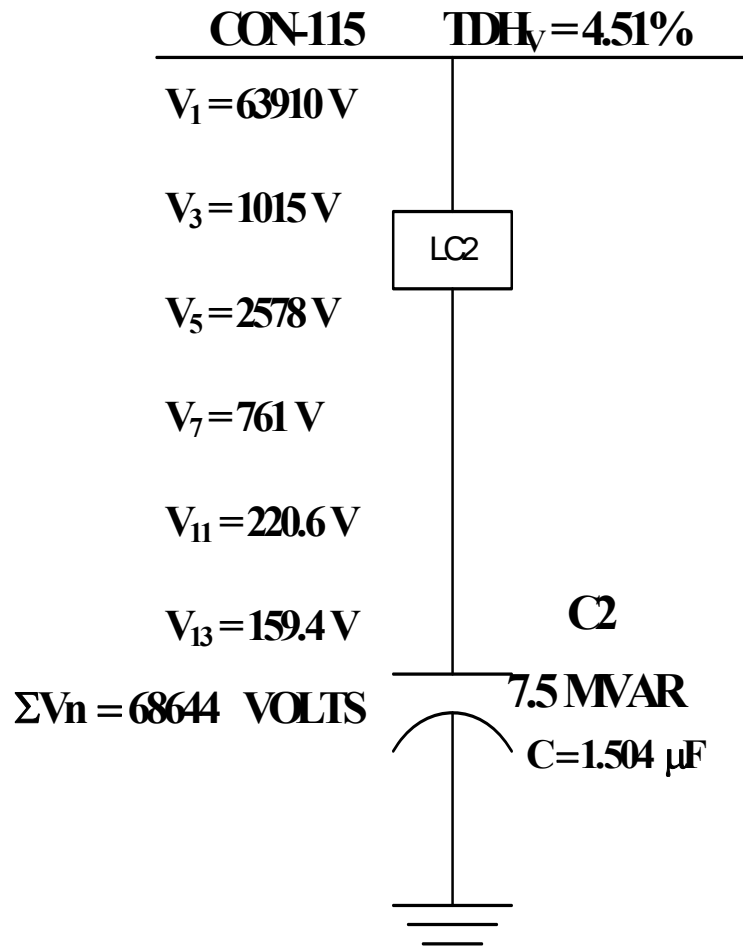
Las unidades capacitoras fabricadas con base a la norma IEEE STD 18, soportan el 10% de sobrevoltaje sin disminuir su vida útil.

Si se dimensiona el banco de capacitores de 15 MVAR con unidades capacitoras de 13.8 kV; el voltaje de operación de las unidades capacitoras es:

$$\frac{71289.8}{69000} = 1.033 \text{ PU's}$$

Inclusive podría operar el sistema a 1.05 PU'S de voltaje y el banco de capacitores operará correctamente.

CDC22. Sistema con demanda media, con generación de armónicas moderada en las S.E´S concordia y CD. del Carmen, con bancos de 7.5 MVAR y 15 MVAR conectados.



SI CONSIDERAMOS EL VOLTAJE DE OPERACIÓN NOMINAL DE 66395 V, ENTONCES:

$$\Sigma V_h = 71129 \text{ V}$$

$$\Delta V = \frac{71129}{66395} = 1.07 \text{ V}_n$$

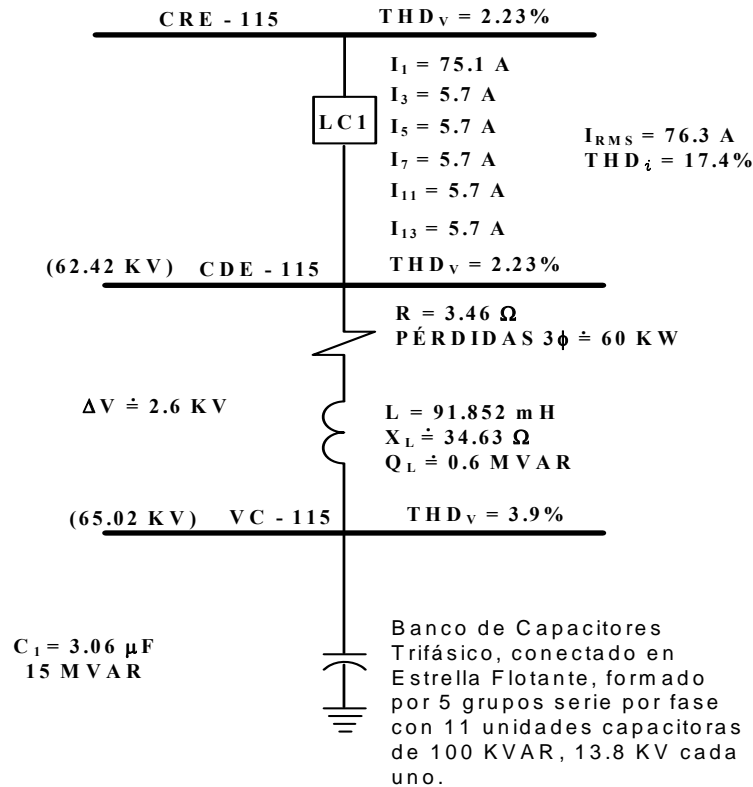
Las unidades capacitoras fabricadas con base a la norma IEEE STD 18, soportan el 10% de sobrevoltaje sin disminuir su vida útil.

Si se dimensiona el banco de capacitoras de 7.5 MVAR con unidades capacitoras de 13.8 kV; el voltaje de operación de las unidades capacitoras es:

$$\frac{71129}{69000} = 1.03 \text{ PU's}$$

Inclusive podría operar el sistema a 1.05 PU's de voltaje y el banco de capacitoras operará correctamente.

CDC22: Sistema con demanda media, con generación de armónicas en las Subestaciones Concordia y Ciudad del Carmen con banco de capacitores de 15 MVAR por filtro de 5ª armónica y $q = 50$.



Voltaje aplicado al banco de capacitores (V_C).

$$PARA \quad V_1 = 65.395 \text{ KV}$$

$$V_C = V_1 + V_3 + V_5 + V_7 + V_{11} + V_{13}$$

$$V_1 = (66.395 + 2.642) \text{ KV}$$

$$V_3 = 1.650 \text{ KV}$$

$$V_5 = 1.849 \text{ KV}$$

$$V_7 = 0.493 \text{ KV}$$

$$V_{11} = 0.135 \text{ KV}$$

$$V_{13} = 0.098 \text{ KV}$$

$$\Sigma V_n = 73.262 \text{ KV}$$

Voltaje de operación de unidades capacitoras

$$V_{OP} = \frac{73.262}{69.0} = 1.06 \text{ P.U.'S}, \text{ se tendría que utilizar unidades capacitoras de } 100 \text{ KVAR y}$$

$$V_n = 14.4 \text{ kv.}$$

RESULTADOS OBTENIDO DEL ANÁLISIS ARMÓNICO

CDC.TIF: Sistema con demanda media, con muy alta generación de armónicas en las S.E´S Concordia y CD. del Carmen y sin bancos de capacitores.

```

-----VOLTAGE KVT TIF & HDF, and RMS(kv) REPORT:

```

BUS_NAME	KVT	TIF	HDF (%)	RMS
CRE-115	0.380E+04	64.0	6.54	59.5
CDC-13.8	554.	80.4	8.92	6.89
SAB-115	0.258E+04	41.6	4.23	62.1
CON-115	0.390E+04	65.4	6.58	59.6
DER-115	0.309E+04	50.7	5.18	60.9
PAL-115	0.308E+04	50.7	5.18	60.9
CON-13.8	0.106E+04	152.	12.7	6.93
PAL-34.5	870.	48.6	5.09	17.9

MAXIMUM HDF at:CON-13.8 (12.7 %)

CDC20.TIF: Sistema con demanda media, con generación de armónicas moderada en las S.E´S Concordia y CD. del Carmen y solo con el banco de 7.5 MVAR de la S.E. Concordia.

```

===== FREQ.= 60.00 Hz =====
---- FILTERS REPORT:
Filter:#C2 (Type=FILTR_ST ) at bus CON-115 :
V= 60.89 KV 83.01deg I= 0.3443E-01 KA 173.01deg
P=-0.3240E-08 MW Q= -2.096 MVAR
===== FREQ.= 180.00 Hz =====
---- FILTERS REPORT:
Filter:#C2 (Type=FILTR_ST ) at bus CON-115 :
V= 0.6276 KV 53.05deg I= 0.1065E-02 KA 143.05deg
P= 0.5323E-11 MW Q=-0.6682E-03 MVAR
===== FREQ.= 300.00 Hz =====
---- FILTERS REPORT:
Filter:#C2 (Type=FILTR_ST ) at bus CON-115 :
V= 2.912 KV 25.17deg I= 0.8235E-02 KA 115.17deg
P=-0.8916E-10 MW Q=-0.2398E-01 MVAR
===== FREQ.= 420.00 Hz =====
---- FILTERS REPORT:
Filter:#C2 (Type=FILTR_ST ) at bus CON-115 :
V= 2.566 KV -16.69deg I= 0.1016E-01 KA 73.31deg
P=-0.7147E-10 MW Q=-0.2607E-01 MVAR
===== FREQ.= 660.00 Hz =====
---- FILTERS REPORT:
Filter:#C2 (Type=FILTR_ST ) at bus CON-115 :
V= 1.077 KV -93.77deg I= 0.6702E-02 KA -3.77deg
P=-0.1103E-10 MW Q=-0.7221E-02 MVAR
===== FREQ.= 780.00 Hz =====
---- FILTERS REPORT:
Filter:#C2 (Type=FILTR_ST ) at bus CON-115 :
V= 0.3916 KV -109.42deg I= 0.2879E-02 KA -19.42deg
P= 0.9020E-11 MW Q=-0.1127E-02 MVAR
=====

```

```

-----VOLTAGE KVT TIF & HDF, and RMS(kv) REPORT:

```

BUS_NAME	KVT	TIF	HDF (%)	RMS
CRE-115	0.298E+04	49.0	6.44	60.9
CDC-13.8	210.	29.9	6.50	7.04
SAB-115	0.210E+04	33.4	4.27	63.0
CON-115	0.330E+04	54.0	6.73	61.0
DER-115	0.246E+04	39.7	5.17	62.0
PAL-115	0.246E+04	39.7	5.17	62.0
CON-13.8	564.	79.9	8.15	7.07
PAL-34.5	698.	38.3	5.09	18.2

MAXIMUM HDF at:CON-13.8 (8.15 %)

CDC21.TIF: Sistema con demanda media, con generación de armónicas moderada en las S.E'S Concordia y CD. del Carmen y solo con el banco de 15 MVAR de la S.E. CD. del Carmen.

```

=====  FREQ.=  60.00 Hz  =====
----- CURRENT REPORT:
Line:#LC1      (LIN_RL      ) curr. & power flows From CDC-115      To CRE-
115
  I=0.718E-01KA      -7.6deg.                      P=-.114E-01MW  Q= 4.48
MVAR
----- FILTERS REPORT:
Filter:#C1      (Type=FILTR_ST  ) at bus CDC-115      :
V= 62.39      KV  82.54deg  I= 0.7207E-01 KA  172.54deg
P=-0.1456E-07 MW      Q= -4.497      MVAR
=====  FREQ.=  180.00 Hz  =====
----- CURRENT REPORT:
Line:#LC1      (LIN_RL      ) curr. & power flows From CRE-115      To CDC-
115
  I=0.275E-02KA      134.8deg.                      P=-.281E-06MW  Q=-.219E-
02MVAR
----- FILTERS REPORT:
Filter:#C1      (Type=FILTR_ST  ) at bus CDC-115      :
V= 0.7934      KV  44.79deg  I= 0.2749E-02 KA  134.79deg
P= 0.1590E-10 MW      Q=-0.2182E-02 MVAR
=====  FREQ.=  300.00 Hz  =====
----- CURRENT REPORT:
Line:#LC1      (LIN_RL      ) curr. & power flows From CRE-115      To CDC-
115
  I=0.224E-01KA      63.9deg.                      P=-.235E-04MW  Q=-.867E-
01MVAR
----- FILTERS REPORT:
Filter:#C1      (Type=FILTR_ST  ) at bus CDC-115      :
V= 3.875      KV  -26.13deg  I= 0.2238E-01 KA  63.87deg
P=-0.1456E-08 MW      Q=-0.8671E-01 MVAR
=====  FREQ.=  420.00 Hz  =====
----- CURRENT REPORT:
Line:#LC1      (LIN_RL      ) curr. & power flows From CRE-115      To CDC-
115
  I=0.111E-01KA      8.5deg.                      P=-.108E-05MW  Q=-.153E-
01MVAR
----- FILTERS REPORT:
Filter:#C1      (Type=FILTR_ST  ) at bus CDC-115      :
V= 1.377      KV  -81.50deg  I= 0.1113E-01 KA  8.50deg
P= 0.4750E-10 MW      Q=-0.1532E-01 MVAR

```

```

===== FREQ.= 660.00 Hz =====
----- CURRENT REPORT:
Line:#LC1      (LIN_RL      ) curr. & power flows From CRE-115      To CDC-
115
I=0.491E-02KA   -24.3deg.                P=0.145E-06MW   Q=-.190E-
02MVAR
----- FILTERS REPORT:
Filter:#C1      (Type=FILTR_ST  ) at bus CDC-115      :
V= 0.3868      KV -114.33deg I= 0.4914E-02 KA  -24.33deg
P=-0.3200E-10 MW      Q=-0.1901E-02 MVAR
===== FREQ.= 780.00 Hz =====
----- CURRENT REPORT:
Line:#LC1      (LIN_RL      ) curr. & power flows From CRE-115      To CDC-
115
I=0.431E-02KA   -32.6deg.                P=-.159E-07MW   Q=-.124E-
02MVAR
----- FILTERS REPORT:
Filter:#C1      (Type=FILTR_ST  ) at bus CDC-115      :
V= 0.2870      KV -122.63deg I= 0.4309E-02 KA  -32.63deg
P=-0.1911E-11 MW      Q=-0.1237E-02 MVAR
=====
-----VOLTAGE KVT TIF & HDF, and RMS(kv) REPORT:
BUS_NAME      KVT      TIF      HDF (%)      RMS
CDC-115      0.180E+04  28.9      6.76      62.5
CRE-115      0.180E+04  28.8      6.76      62.5
CDC-13.8      283.      39.1      5.84      7.23
SAB-115      0.111E+04  17.3      4.32      64.1
CON-115      0.150E+04  24.0      6.42      62.5
DER-115      0.140E+04  22.1      5.34      63.3
PAL-115      0.140E+04  22.1      5.34      63.3
CON-13.8      651.      90.1      6.31      7.23
PAL-34.5      398.      21.4      5.28      18.6
MAXIMUM HDF at: CDC-115      ( 6.76      %)
I-HDF, kIT, ITIF and I-RMS REPORT:
Line #LC1      (CRE-115 -CDC-115      ) Type=LIN_RL
Sending      End I-HDF%,kIT,ITIF & I-RMS:  36.2      20.3      265.
0.764E-01

```

CDC22.TIF: Sistema con demanda media, con generación de armónicas moderada en las S.E'S Concordia y CD. del Carmen, con bancos de 7.5 MVAR y 15 MVAR conectados.

```

===== FREQ.= 60.00 Hz =====
----- CURRENT REPORT:
Line:#LC1      (LIN_RL      ) curr. & power flows From CDC-115      To CRE-
115
I=0.740E-01KA   -8.0deg.                P=-.107E-01MW   Q= 4.73
MVAR
----- FILTERS REPORT:
Filter:#C1      (Type=FILTR_ST  ) at bus CDC-115      :
V= 63.91      KV  82.17deg I= 0.7382E-01 KA  172.17deg
P=-0.1883E-07 MW      Q= -4.717      MVAR
Filter:#C2      (Type=FILTR_ST  ) at bus CON-115      :
V= 63.95      KV  82.26deg I= 0.3616E-01 KA  172.26deg
P=-0.9447E-08 MW      Q= -2.312      MVAR
===== FREQ.= 180.00 Hz =====

```

```

----- CURRENT REPORT:
Line:#LC1      (LIN_RL      ) curr. & power flows From CRE-115      To CDC-
115
I=0.353E-02KA   122.9deg.                P=-.176E-05MW   Q=-.360E-
02MVAR
---- FILTERS REPORT:
Filter:#C1      (Type=FILTR_ST  ) at bus CDC-115      :
V= 1.020      KV   32.83deg I= 0.3535E-02 KA  122.83deg
P=-0.2098E-10 MW                Q=-0.3606E-02 MVAR
Filter:#C2      (Type=FILTR_ST  ) at bus CON-115      :
V= 1.015      KV   33.18deg I= 0.1721E-02 KA  123.18deg
P=-0.2923E-11 MW                Q=-0.1747E-02 MVAR
===== FREQ.= 300.00 Hz =====
----- CURRENT REPORT:
Line:#LC1      (LIN_RL      ) curr. & power flows From CRE-115      To CDC-
115
I=0.152E-01KA   24.0deg.                P=-.713E-05MW   Q=-.400E-
01MVAR
---- FILTERS REPORT:
Filter:#C1      (Type=FILTR_ST  ) at bus CDC-115      :
V= 2.631      KV  -65.99deg I= 0.1520E-01 KA  24.01deg
P= 0.4288E-09 MW                Q=-0.3999E-01 MVAR
Filter:#C2      (Type=FILTR_ST  ) at bus CON-115      :
V= 2.578      KV  -65.41deg I= 0.7289E-02 KA  24.59deg
P=-0.2342E-10 MW                Q=-0.1879E-01 MVAR
===== FREQ.= 420.00 Hz =====
----- CURRENT REPORT:
Line:#LC1      (LIN_RL      ) curr. & power flows From CRE-115      To CDC-
115
I=0.644E-02KA   -6.3deg.                P=0.107E-06MW   Q=-.513E-
02MVAR
---- FILTERS REPORT:
Filter:#C1      (Type=FILTR_ST  ) at bus CDC-115      :
V= 0.7961     KV  -96.31deg I= 0.6437E-02 KA  -6.31deg
P= 0.4248E-11 MW                Q=-0.5125E-02 MVAR
Filter:#C2      (Type=FILTR_ST  ) at bus CON-115      :
V= 0.7612     KV  -95.48deg I= 0.3013E-02 KA  -5.48deg
P=-0.2970E-11 MW                Q=-0.2294E-02 MVAR
===== FREQ.= 660.00 Hz =====
----- CURRENT REPORT:
Line:#LC1      (LIN_RL      ) curr. & power flows From CRE-115      To CDC-
115
I=0.320E-02KA   -28.6deg.                P=-.383E-07MW   Q=-.805E-
03MVAR
---- FILTERS REPORT:
Filter:#C1      (Type=FILTR_ST  ) at bus CDC-115      :
V= 0.2517     KV -118.57deg I= 0.3199E-02 KA  -28.57deg
P= 0.4679E-11 MW                Q=-0.8052E-03 MVAR
Filter:#C2      (Type=FILTR_ST  ) at bus CON-115      :
V= 0.2206     KV -117.17deg I= 0.1372E-02 KA  -27.17deg
P= 0.2918E-11 MW                Q=-0.3028E-03 MVAR
===== FREQ.= 780.00 Hz =====
----- CURRENT REPORT:
Line:#LC1      (LIN_RL      ) curr. & power flows From CRE-115      To CDC-
115

```

I=0.293E-02KA -35.4deg. P=0.192E-07MW Q=-.573E-03MVAR

---- FILTERS REPORT:

Filter:#C1 (Type=FILTR_ST) at bus CDC-115 :
V= 0.1955 KV -125.44deg I= 0.2935E-02 KA -35.44deg
P=-0.3853E-11 MW Q=-0.5737E-03 MVAR
Filter:#C2 (Type=FILTR_ST) at bus CON-115 :
V= 0.1594 KV -123.63deg I= 0.1172E-02 KA -33.63deg
P= 0.9350E-12 MW Q=-0.1867E-03 MVAR

-----VOLTAGE KVT TIF & HDF, and RMS(kv) REPORT:

BUS_NAME	KVT	TIF	HDF (%)	RMS
CDC-115	0.117E+04	18.3	4.62	64.0
CRE-115	0.117E+04	18.3	4.61	64.0
CDC-13.8	300.	40.6	3.48	7.40
SAB-115	750.	11.5	3.02	65.1
CON-115	0.106E+04	16.5	4.51	64.0
DER-115	925.	14.3	3.69	64.5
PAL-115	925.	14.3	3.69	64.5
CON-13.8	666.	90.0	4.25	7.40
PAL-34.5	263.	13.9	3.65	19.0

MAXIMUM HDF at: CDC-115 (4.62 %)

I-HDF, kIT, ITIF and I-RMS REPORT:

Line #LC1 (CRE-115 -CDC-115) Type=LIN_RL
Sending End I-HDF%,kIT,ITIF & I-RMS: 23.6 13.4 176.
0.760E-01

CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ARMÓNICO

1.- En todos los casos simulados la distorsión armónica total de voltaje y de corriente son superiores a los límites recomendados por las normas.

1.1.- El banco de capacitores existente de 7.5 MVAR de la Subestación Concordia estaría operando con un sobrevoltaje (sí es que fue dimensionado con unidades capacitoras de 13.28 kV) por las armónicas existentes; se recomienda operar el sistema de 115 kV a un voltaje menor (110 ó 112 kV).

1.2.- El banco de capacitores de 15 MVAR de la subestación Ciudad del Carmen, operará correctamente si se dimensiona dicho banco con unidades capacitoras de 13.8 KV nominales fabricadas bajo la norma IEEE std 18.

1.3.- Cuando opere el sistema sólo con el banco de capacitores de 15 MVAR de Ciudad del Carmen la resonancia paralelo de ésta subestación con el sistema ocurre muy cerca de la 5ª armónica (habiendo amplificación de la 5ª y 7ª armónicas), pero aún así el banco de capacitores operará correctamente si se dimensiona como se recomienda.

2.- Al insertar el banco de 15 MVAR de la subestación Ciudad del Carmen se incrementará el voltaje un 4.9 % (por norma se prefiere máximo un 3%).

3.- Se recomienda dimensionar el banco de capacitores con unidades de 13.8 kV nominales.

Especificación: Banco de Capacitores trifásico, conectado en estrella flotante, formado por 5 grupos serie por fase con 11 unidades capacitoras de 100 KVAR y 13.8 kV cada uno.

Conclusiones generales

- 1 Ha quedado de manifiesto que una buena especificación de las características técnicas de un Banco de Capacitores, redundará en una operación adecuada del mismo. Lo anterior, en beneficio del Sistema Eléctrico y por consiguiente del País.
- 2 En la determinación de la especificación del Banco de Capacitores, se debe considerar la posible existencia de distorsión armónica en la subestación en la que se instalará el Banco de Capacitores.

ANEXO

NORMATIVIDAD DE VOLTAJES Y CORRIENTES ARMÓNICAS

Los límites de distorsión armónica de voltaje y corrientes permitidos por la norma IEEE Std.519-1992, están dados en las siguientes tablas.

Tabla 1 IEEE - 519 Límites de Distorsión de Voltaje.

Voltaje del Bus en PCC	HD (%)	THDV (%)
Inferiores a 69 kV	3.0	5.0
69.001 kV hasta 161 kV	1.5	2.5
Superiores a 161 kV	1.0	1.5

HDv = Distorsión de voltaje armónico individual.

Tabla 2 IEEE- 519 Límites máximos (%) de distorsión de corrientes armónicas impares para sistemas de distribución en general, (desde 120 volts hasta 69,000 volts).

I_{sc} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n \leq 17$	$17 \leq n \leq 23$	$23 \leq n \leq 35$	$35 \leq n$	THD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabla 3 IEEE - 519 Límites máximos (%) de distorsión de corrientes armónicas impares para sistemas de subtransmisión general (desde 69,001 volts hasta 161,000 volts)

I_{sc} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n \leq 17$	$17 \leq n \leq 23$	$23 \leq n \leq 35$	$35 \leq n$	THD
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.0	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Tabla 4 IEEE - 519 Límites máximos (%) de distorsión de corrientes armónicas impares para sistemas de alto voltaje con generación dispersa y cogeneración (desde 161,000 volts y mayores)

I_{sc} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n \leq 17$	$17 \leq n \leq 23$	$23 \leq n \leq 35$	$35 \leq n$	THD
<50*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

BIBLIOGRAFÍA

1. R.C. Durgan, W. T. Jewell and D. J. Roesler.
“Armonic and Reactiva Power From Line-Conmutated Inverters in Proponed Photovoltaic Subdivisión”.
IEEE Transactions Sept. 1983.
2. A. A. Mahmoud and R. D. Shultz.
“A Method for Analyzing Armonic Distribution in A. C. Power Systems”.
IEEE Transaction. Junio de 1982.
3. Damian A. González and John C. Mcall
“Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems”.
IEEE Transitions on Power Apparatus and Systems, 1985.
4. Y. H, Yan, C. S. Moo y C. T. Hsu.
“Harmonic Analysis for Industrial Customers.
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 2, 1994
5. IEEE Standard 519-1981
IEEE .Guide for Harmonic Control and Reactive Power Compensation of Static Power Converter, 1981, pag. 15.

6. D. J. Pilegga, N. H. Chandra and A. E. Emanuel.

“Prediction of Harmonics Voltages in Distribution Systems”.

IEEE Transactions. Marzo de 1981.

7. J. Arrillaga, D. A. Bradley and P. S. Bodger, Power System Harmonics.

John Wiley & Sons. 1985.