
Análisis para el diseño de un filtro pasivo de armónicas

En un sistema eléctrico de potencia, las corrientes armónicas originadas por las cargas no lineales al interactuar con la impedancia del sistema distorsionan la forma de onda de tensión, donde no hay altas magnitudes de corrientes armónicas no se requiere filtro y si la distorsión de tensión es alta (aún sin la existencia de corrientes armónicas), es necesario investigar dónde se está distorsionando la forma de onda de tensión y corregirla.

A partir del requerimiento de potencia reactiva y del espectro armónico existente en una línea o alimentador principal de una subestación, aunado a las tensiones armónicas presentes en los buses, se determina el requerimiento de un filtro o sólo la aplicación de un banco de capacitores. Se debe realizar el análisis armónico del sistema de potencia para determinar las resonancias serie-paralelo, los flujos de corrientes armónicas y las tensiones armónicas así como las distorsiones.

5.1 Consideraciones para el diseño del filtro de armónicas

El objetivo del filtro de armónicas es desviar algunas de las corrientes armónicas de la carga al filtro; en consecuencia, se reduce la cantidad de corriente armónica que fluye hacia el sistema de potencia. El tipo más simple de filtro de armónicas es un circuito inductivo-capacitivo en serie.

Algunas consideraciones importantes que deben tomarse en cuenta para el diseño de un filtro de armónicas son:

- Estudio de la interacción entre el sistema y la carga
- Requerimientos de potencia reactiva y máximas magnitudes de corrientes armónicas existentes
- Límites permisibles de corrientes y tensiones armónicas
- Condiciones normales de operación del sistema incluyendo armónicas
- Condiciones normales de operación del filtro de armónicas
- Condiciones de contingencia del sistema incluyendo armónicas
- Condiciones de contingencia del filtro de armónicas
- Características de un filtro sintonizado

El criterio de desempeño se relaciona a las condiciones de operación esperadas e incluyen requerimientos de potencia reactiva capacitiva, limitaciones de armónicas, condiciones normales de operación del sistema y del filtro de armónicas. El criterio de evaluación se relaciona a las condiciones inusuales que pueden imponer un desempeño más severo al equipo. Estas condiciones inusuales incluyen condiciones de contingencia del sistema y del filtro de armónicas.

5.1.1 Estudio de la interacción entre el sistema y las cargas no lineales

La relación de corto circuito.

La relación de corto circuito (SCR) es una medida de tamaño de la fuente armónica con respecto a la habilidad del sistema para absorber la corriente armónica.

Este es un parámetro importante para la determinación de su efecto en la red.

Esto se calcula de la siguiente manera:

$$SCR = \frac{S_{cc}}{S_{carga}}$$

Si la SCR baja indicara que habrá problemas si existe una resonancia en paralelo cercana a una de las armónicas características.

Las caídas de tensión

La variación del nivel de carga o el switcheo de elementos en el sistema, provocara en una caída también en los reactores en derivación, mientras que los bancos de capacitores al suministrar potencia reactiva, podrían provocar el aumento de la tensión en casos de baja carga.

La magnitud de estas caídas de tensión dependerá de la capacidad del elemento switcheado ya sea en potencia reactiva o aparente respecto a la capacidad de corto circuito de la red.

Generalmente al conocer la carga y el nivel de corto circuito del sistema en MVAs, pero no las impedancias respectivas a la carga, sin embargo estas se encuentran directamente relacionados de tal manera que podemos tener un cálculo muy aproximado mediante la siguiente expresión:

$$caida = \frac{MVA_{carga}}{MVA_{carga} + MVA_{sc}} \times 100$$

Esto puede afectar considerablemente la tensión de las cargas cercanas a cierta planta industrial.

Impedancia vs Frecuencia

El cálculo de la impedancia del sistema en cualquier punto de la red sobre un rango de frecuencias, especialmente en los buses donde se generen corrientes armónicas.

Por lo general los programas de flujos de carga armónica son los encargados de estimar la distorsión armónica total del voltaje y de las corrientes que pasan a través de cierto punto de la red.

Para poder realizar un estudio completo por medio de un software que analice los buses que se encuentran en un sistema industrial es necesario:

- Hacer un barrido de un amplio rango de frecuencias, para poder identificar las frecuencias resonantes que podrían estar cerca de las armónicas generadas por las cargas no lineales. Por lo general esta solución deberá ser obtenida en rangos de 5 o 6 hz.
- Los elementos de la red son: generadores, transformadores, líneas de transmisión, reactores, capacitores, motores etc., los cuales tienen impedancias que cambian con la frecuencia.
- Si la red incluye impedancias o cargas desbalanceadas, una sola representación de secuencia positiva no sería suficiente para ya que los efectos de armónicas triples o de desbalance no son tomados en cuenta.

Este tipo de programas utiliza la matriz de admitancias en relación a un punto de la red, por lo que a esta matriz de admitancia nodal será evaluada en un rango muy amplio de frecuencias, mientras que se inyectan corrientes armónicas debidas a la carga no lineal como datos de entrada.

La impedancia en el punto de interés es la información más importante para el diseño de filtros, siendo el equivalente, la capacidad de corto circuito del sistema industrial a cada frecuencia.

$$I_h = Y_h V_h$$

Mientras:

I_h corresponde a la corriente armónica.

Y_h corresponde a la admitancia armónica.

V_h voltaje armónico

En las frecuencias de resonancia en paralelo, habrá un cambio de reactancia positiva a negativa, mientras que si la reactancia cambia de negativa a positiva conforme aumenta la frecuencia, hay un punto de resonancia serie.

Si un punto resonante en paralelo se origina a cierta armónica existente en la carga, esta se inyectara al sistema, provocando una distorsión armónica más severa.

Al compensar con potencia reactiva los buses que alimentan la carga no lineal el punto de resonancia cambia muy rápidamente con respecto a la frecuencia por lo que no necesariamente, debe de coincidir con la frecuencia resonante con las armónicas generadas por las cargas no lineales, para implicar un aumento considerable en la distorsión armónica en dicho bus.

5.1.2 Potencia reactiva capacitiva del filtro

Los principales componentes de un filtro de armónicas diseñado para lograr un control de armónicas aceptable, generalmente son capacitores, reactores y en algunos casos, resistencias. El filtro de armónicas suministra potencia reactiva capacitiva al sistema y al mismo tiempo absorbe corriente armónica, disminuyendo así las distorsiones de tensión. Los requerimientos de potencia reactiva y control de tensión pueden determinar que el filtro de armónicas sea conmutado en paso.

5.1.3 Límites permisibles de corrientes y tensiones armónicas

Los límites permisibles de corrientes y tensiones armónicas están definidos en términos de las condiciones del sistema y de la capacidad de aguante de los equipos.

Límites del sistema

Los límites permisibles de tensiones armónicas en el sistema generalmente se definen para asegurar que el equipo no funcione mal o falle debido a distorsión armónica excesiva. En el anexo A se indican las desviaciones máximas permisibles indicadas en la especificación CFE L0000-45, aplicables tanto al suministrador como a los consumidores que se encuentren conectados a la red eléctrica de CFE.

Capacidad de aguante del equipo

La norma IEEE Std C57.12.00-2000 establece que cuando los transformadores están operando a su carga nominal, la distorsión armónica total de corriente deberá limitarse al 5.0%. El IEEE Std C57.110-1998 define el método para el derrateo de transformadores de potencia cuando alimentan cargas no-lineales y el UL 1561 y 1562 –1999 define el factor K de los transformadores que son destinados para alimentar grandes capacidades de cargas no-lineales.

La norma IEEE Std 18-2002 establece que los capacitores son diseñados para operar en o debajo de su tensión nominal. Los capacitores deberán ser capaces de operar continuamente bajo contingencias del sistema, solo si, ninguno de los siguientes límites es excedido:

- 110% de la tensión nominal rms
- 120% de la tensión pico nominal
- 180% de la corriente rms nominal
- 135% de la potencia nominal

Los fusibles de protección de capacitores deben soportar la corriente y la tensión incluyendo armónicos. El límite de 135% de la potencia nominal mencionado en la norma IEEE Std 18-2002 está basado en el calentamiento del dieléctrico a frecuencia fundamental y se sustenta en pruebas de estabilidad térmica.

5.1.4 Condiciones normales de operación del sistema

Las condiciones normales de operación del sistema se evalúan generalmente para asegurar que el diseño del filtro de armónicas reúna los requerimientos de desempeño armónico y potencia reactiva requeridos. Estas condiciones normales de operación son:

- Todas las corrientes y tensiones armónicas
- Variación de tensión del sistema
- Variación de frecuencia del sistema
- Configuraciones del sistema de potencia
- Condiciones de carga
- Desbalance de tensión en el sistema

5.1.5 Condiciones normales de operación del filtro

Los filtros son rara vez sintonizados a sus valores exactos calculados. Es necesario considerar las variaciones de los siguientes parámetros cuando se evalúa el funcionamiento del filtro de armónicas.

- Tolerancias de los componentes
- Variaciones de la temperatura ambiente
- Fallas en unidades capacitivas

5.1.6 Condiciones de contingencia del sistema

Las condiciones de contingencia del sistema se evalúan generalmente para asegurar que el diseño del filtro de armónicas sea capaz de controlar adecuadamente estas condiciones, a pesar de que los límites de distorsión del sistema puedan ser excedidos. Estas condiciones son las siguientes:

- Aplicación de filtros sintonizados a la misma frecuencia
- Variación de frecuencia del sistema
- Configuraciones del sistema de potencia
- Armónicas características y no características
- Fuentes de armónicas desconocidas

5.1.7 Condiciones de contingencia del filtro

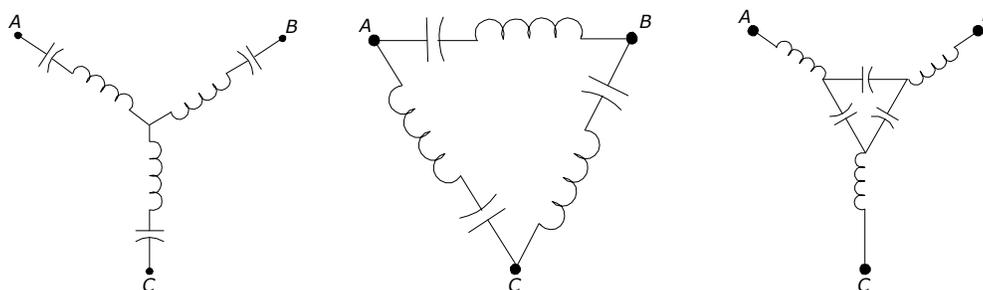
Al evaluar los componentes del filtro de armónicas, se usan los mismos factores que en condiciones normales de operación del filtro, pero con rangos más amplios. Además, cuando se aplican filtros de armónicas múltiples en la misma ubicación, se considera la salida de un filtro para verificar la capacidad de los elementos de otros filtros.

5.1.8 Ubicación del filtro

Los filtros de armónicas pueden ser ubicados en buses de cargas individuales o en un bus común que alimente varias cargas. Estos pueden ser ubicados en baja o alta tensión. Las alternativas en una aplicación deben ser evaluadas en la búsqueda de distorsiones de tensiones y corrientes armónicas aceptables y el efecto de los flujos de carga armónica resultante en los equipos y conductores afectados.

5.1.9 Configuración del filtro

Para filtros no aterrizados o con neutro flotante, la misma efectividad de filtrado puede lograrse con una variedad de configuraciones delta y/o estrella. La evaluación y la capacidad de las herramientas disponibles con frecuencia dictan la selección de la configuración. La siguiente figura muestra configuraciones diferentes con filtrado idéntico.



5.2 Filtros de armónicas para sistemas de media y alta tensión

Los filtros de armónicas para sistemas de media y alta tensión se instalan en buses con tensión arriba de 1 [kV]. Los filtros de armónicas son expuestos a muchos de los mismos esfuerzos a los cuales los bancos de capacitores están expuestos; Sin embargo, los esfuerzos son normalmente más intensos en un filtro.

El desempeño de los componentes que forman un filtro de armónicas está relacionado a las temperaturas de operación de los diferentes componentes y al nivel de estrés debido a la tensión, especialmente en el dieléctrico de los capacitores.

5.2.1 Consideraciones de sobrecarga armónica

Generalmente, los filtros de armónicas son diseñados para suministrar compensación de potencia reactiva a cargas inductivas y para el control de corrientes y tensiones armónicas. Es recomendable diseñar un filtro con un margen en la especificación de su desempeño, debido a que se agregan cargas no lineales al sistema de potencia a las ya consideradas. Las corrientes armónicas adicionales pueden incrementar la corriente a través del filtro y causar sobrecalentamiento. Se sugiere un margen mínimo del 10% arriba del desempeño máximo anticipado de todas las fuentes consideradas.

Para propósitos de diseño, se recomienda proporcionar los espectros de corriente a través de cada rama del filtro para los peores casos de sobrecarga de tiempo corto resultantes del switcheo o de una contingencia.

5.2.2 Especificación de los principales componentes

Los principales componentes del filtro para armónicas son: capacitores, reactores, resistores (algunas veces), relevadores de protección, cuchillas, apartarrayos y el interruptor principal. Las capacidades normales de este equipo deben ser especificadas con los requerimientos adicionales de los espectros de corriente armónica y tolerancias adecuadas en los parámetros de los componentes, particularmente capacitancias, inductancias y resistencias.

La tensión máxima se evalúa considerando las peores condiciones de operación; es decir, la máxima tensión del sistema junto con la elevación máxima de tensión a través del reactor y del capacitor.

Capacitores

En condiciones normales de operación, el banco de capacitores deberá ser dimensionado para que la tensión y potencia reactiva no excedan el 100% de los datos nominales de placa de las unidades capacitoras del filtro. La norma IEEE Std 18 y 1036-1992 da límites de operación continua que exceden la capacidad nominal de placa referida; sin embargo, estos límites son capacidades de sobrecarga y deberán ser reservados solo para operación en contingencias.

La siguiente información referente a los capacitores debe considerarse para el ensamble del capacitor en el filtro.

a) Capacidades de sobrecarga

Las capacidades de sobrecarga se usan generalmente para condiciones de contingencia, las cuales incluyen sobretensiones del sistema y condiciones de desbalance del filtro de armónicas.

b) Especificación del elemento

La especificación del banco de capacitores para un filtro de armónicas debe incluir:

- La tensión máxima de operación entre fases del sistema
- Frecuencia fundamental del sistema de potencia
- El BIL del sistema
- La potencia reactiva capacitiva efectiva trifásica total (MVAR) a tensión nominal
- La frecuencia de sintonía del filtro
- Tipo de instalación (interior, exterior, en tablero)
- Condiciones ambientales (rango de temperatura ambiente, requerimientos de distancia de fuga, contaminación industrial, máxima velocidad del viento, carga por nieve, requisitos sísmicos, mayor altitud que 1800 msnm)
- Capacitancia del banco de capacitores del filtro y tolerancia
- Picos de tensiones armónicas individuales aplicadas al capacitor o corrientes armónicas individuales a través de los capacitores, incluyendo la fundamental, durante las diferentes condiciones en las cuales el filtro operará (estado estable y contingencia)
- Picos de tensiones transitorias y dinámicas por operaciones de switcheo (re-encendido del arco en el interruptor durante la desenergización del filtro, energización de transformadores)
- Ciclo de trabajo esperado o capacidad de repetición y duración de las corrientes y tensiones de los dos puntos anteriores
- Configuración del banco de capacitores del filtro (estrella aterrizada, estrella flotante o delta)

c) Tensión nominal

La tensión a frecuencia fundamental en estado estable mas las tensiones debidas a las corrientes armónicas a través de los capacitores deberán calcularse mediante la suma aritmética de las tensiones a frecuencia fundamental y armónicas como se muestra en las ecuaciones.

$$V_r = \sum_{h=1}^{\infty} I(h)X_C(h)$$

Donde:

- V_r – Tensión rms nominal del capacitor
- h – Orden de la armónica
- $I(h)$ – Corriente armónica considerada a través del capacitor
- $X_C(h)$ – Reactancia capacitiva a la armónica considerada

Si la corriente fundamental a través del capacitor no es especificada, la tensión puede calcularse como:

$$V_r = V_C(1) + \sum_{h=2}^{\infty} I(h)X_C(h)$$

Donde:

$$V_C(1) = V_S \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right)$$

- $V_C(1)$ – Tensión rms máxima a 60 Hz aplicada al capacitor, incluyendo la elevación de la tensión por el reactor de sintonía
- V_S – Tensión máxima del sistema aplicada al capacitor, sin incluir la elevación de la tensión por el reactor de sintonía
- h – Orden armónico de sintonización del filtro (1.9, 2.9, 3.9, 4.9, 6.9... etc.)

d) Configuración del banco

Para armónicas de secuencia positiva y negativa, cualquiera que sea, estrella aterrizada, estrella flotante o delta no afecta el desempeño. Las armónicas de secuencia cero deben ser controladas por un banco configurado en estrella aterrizada.

La capacitancia de dicho filtro se basa en la potencia reactiva necesaria para mejorar el factor de potencia de la carga.

$$MVAR = \frac{V^2}{X_C}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Debemos de tomar en cuenta que el banco de capacitores esta impuesto voltajes pico los cuales se traducen en grandes esfuerzos dieléctricos, por lo que el voltaje pico a través del capacitor será justamente la suma aritmética de los voltajes pico de la frecuencia fundamental y la sintonizada.

Para calcular el voltaje máximo a través del filtro, de fase a tierra se tiene que:

$$V_{L-N} = \frac{(1.05)V_{L-L}}{\sqrt{3}}$$

La corriente absoluta a través del capacitor será:

$$I_{c_1} = \frac{V_{L-N}}{X_c - X_l}$$

Por lo que el voltaje del capacitor a la frecuencia fundamental será:

$$V_{c_1} = X_{c_1} I_{c_1}$$

Mediante el estudio de la interacción que tiene el sistema con las cargas podemos, saber la cantidad de corriente armónica que deberá fluir por el filtro para mantener el total de distorsión armónica en niveles dentro de la norma.

Por lo que al obtener esa corriente podremos obtener el voltaje de la armónica sintonizada de la siguiente forma:

$$V_{c_5} = X_{c_5} I_{c_5}$$

Por lo tanto, el voltaje pico a través del capacitor es:

$$V_{\max} = \sqrt{2}V_{c_1} + \sqrt{2}V_{c_n} = \sqrt{2}(V_{c_1} + V_{c_n})$$

De acuerdo con los estándares industriales, los capacitores están diseñados para soportar 120 % del voltaje nominal, por lo que se tendrá que mantener sobre este límite.

La selección del filtro consiste en seleccionar básicamente un reactor para que resuene en serie con el banco de capacitores del filtro.

$$X_c = X_l$$

$$X_l = \omega l = \frac{1}{\omega C}$$

Reactores

No existen estándares ANSI o IEEE específicos para la aplicación de reactores a filtros de armónicas. El estándar IEEE C57.16-1996 incluye un anexo que suministra guías para la aplicación de reactores con núcleo de aire tipo seco para filtros, el cual los divide en tres categorías:

- Reactores núcleo de aire, tipo seco. Se usan generalmente en aplicaciones de media y alta tensión.
- Reactores núcleo de acero, tipo seco. Se usan generalmente en aplicaciones de baja y media tensión.
- Reactores núcleo de acero, rellenos de fluido. Se usan generalmente en aplicaciones de media tensión.

Los reactores núcleo de acero trifásicos para filtros de armónicas deben evitarse en situaciones donde el desempeño del filtro en la red es crítico. Es muy difícil ajustar la inductancia de una fase sin afectar la inductancia en las otras dos fases. Además si la inductancia de las tres fases se ajusta a la frecuencia fundamental, no hay garantía de que se mantenga constante si se incrementa la frecuencia.

La información relativa a la aplicación de reactores en filtros para armónicas se presenta a continuación.

a) Especificación del elemento

La especificación de reactores para filtros de armónicas debe incluir lo siguiente:

- Tensión máxima de operación del sistema entre fases
- Frecuencia fundamental del sistema
- BIL del sistema
- Frecuencia de sintonía del filtro
- Tipo de instalación (interior, exterior, dentro del tablero)
- Condiciones ambientales (rango de temperatura ambiente, distancia de fuga, contaminación industrial, velocidad máxima del viento, carga por nieve, requerimientos sísmicos, altitud mayor a 1800 msnm)
- Inductancia del reactor, tolerancia de la inductancia y taps si se requieren
- La calidad del filtro a la frecuencia de sintonía
- Corriente de corto circuito máxima y su duración a través del reactor
- Corrientes armónicas individuales a través del reactor, incluyendo la fundamental durante las diferentes condiciones en las cuales el filtro operará (estado estable, normal y contingencia)
- Picos de tensiones transitorias y dinámicas por operaciones de switcheo (reencendido del arco en el interruptor durante la desenergización y energización de transformadores)
- Ciclo de trabajo esperado o repetición y duración de tensiones y corrientes de los dos puntos anteriores
- BIL nominal a través de la bobina y a tierra
- Dimensiones preestablecidas de la bobina y arreglo del montaje
- Límite de ruido audible (si se aplica)

b) Tensión nominal

La tensión nominal en estado estable se calcula como la suma aritmética de la fundamental y las armónicas, similar a los de los capacitores.

$$V_r = \sum_{h=1}^{\infty} I(h)X_R(h)$$

Donde:

- V_r – Tensión rms nominal del reactor
- h – Orden de la armónica
- $I(h)$ – Corriente armónica considerada a través del reactor
- $X_C(h)$ – Reactancia inductiva a la armónica considerada

c) Inductancia y factor de calidad

La inductancia y el factor de calidad (Q) para el reactor del filtro deben especificarse a la frecuencia de sintonía. La tolerancia en la inductancia deberá seleccionarse para asegurar el desempeño adecuado del filtro con la red; usualmente se considera de $\pm 3\%$ ó de $+0\%$ a 0.6% . La tolerancia en el factor de calidad es típicamente de $\pm 20\%$.

d) Taps del reactor

Los taps del reactor son frecuentemente incluidos para proporcionar una sintonía final en campo y para acomodar cambios en la capacitancia del banco de capacitores del filtro.

e) Espectro de corrientes armónicas

El espectro de corrientes armónicas debe ser definido tanto para condiciones continuas como temporales o de contingencia. Las condiciones transitorias deben considerarse en aplicaciones donde el filtro es expuesto a transitorios frecuentes tales como energización de transformadores.

Es indispensable para asegurar que el núcleo no se sature y para determinar sus pérdidas. La selección del conductor ayuda a minimizar las pérdidas por resistencia, corrientes parásitas y de fuga.

f) Corriente de corto circuito

Se debe especificar la corriente de corto circuito máxima disponible para el reactor del filtro y el tiempo que el reactor debe aguantar esta corriente. La corriente de falla a través del reactor se minimiza cuando el reactor se conecta en el lado del neutro del banco de capacitores del filtro.

g) Montaje

El punto de conexión del reactor se determina en base a la configuración y aplicación del filtro.

Para aplicaciones de media tensión, el filtro de armónicas generalmente se conecta en estrella flotante con el reactor localizado en el lado de la fuente. La conexión del neutro generalmente se hace en el equipo del banco de capacitores del filtro. Si el reactor del

filtro se localiza en el lado fuente, puede limitar la corriente de falla disponible para una falla en el banco de capacitores del filtro. Sin embargo, los reactores con núcleo de acero no pueden limitar corrientes de falla si estos se saturan. Los reactores con núcleo de aire o núcleo de acero localizados en el lado del neutro del capacitor no disminuyen el nivel de corriente de falla fase a fase o fase a neutro en el banco de capacitores del filtro.

Para aplicaciones de alta tensión, el filtro de armónicas puede ser conectado en estrella con el reactor del filtro localizado en el lado del neutro. Esta ubicación del reactor permite que reactores pesados sean montados convenientemente en una elevación baja. Para filtros en estrella aterrizada, esta ubicación puede también permitir que el BIL del reactor sea menor que el BIL del sistema. En este caso, debe ubicarse un apartarrayos a través del reactor del filtro.

El reactor debe ser capaz de manejar la corriente rms total, incluyendo armónicas sin sobrecalentarse.

Por lo que la I_{rms} del reactor es:

$$I_L = \sqrt{(I_{L1})^2 + (I_{LN})^2}$$

Resistencias

Una resistencia suministra un amortiguamiento adicional al filtro; por ejemplo, en aplicaciones de filtros pasivos de sintonización sencilla que requieren la atenuación de más de una armónica, la inserción de una resistencia suministra ese amortiguamiento.

Como en el caso del reactor del filtro, no existen normas específicas relacionadas a las resistencias de los filtros. La norma IEEE Std 32-1972 incluye algunas consideraciones para el uso de las resistencias en filtros de armónicas.

a) Especificación del elemento

Las especificaciones para la resistencia del filtro deben incluir:

- Tensión máxima de operación del sistema entre fases
- Frecuencia fundamental del sistema
- BIL del sistema
- Tipo de instalación (interior, exterior, dentro de un tablero)
- Condiciones ambientales (rango de temperatura ambiente, distancia de fuga, contaminación industrial, velocidad máxima del viento, carga por nieve, requerimientos sísmicos, altitud mayor a 1800 msnm)
- Resistencia y su tolerancia
- Inductancia máxima permitida (si se requiere baja inductancia)
- Variación de la resistencia máxima permitida con la temperatura (si la variación de la resistencia con la temperatura es crítica)
- Magnitud y duración de la corriente de corto circuito máxima a través de la resistencia
- Magnitud de las corrientes armónicas individuales a través de la resistencia, incluyendo la fundamental, durante diferentes condiciones de operación del filtro (estado estable y contingencias)

- Picos de tensiones transitorias y dinámicas por operaciones de switcheo (reencendido del arco en el interruptor durante la desenergización y energización de transformadores)
- Ciclo de trabajo esperado o repetición y duración de tensiones y corrientes de los dos puntos anteriores
- Energía nominal del resistor (máxima capacidad de energía, opcional solo para cargas fluctuantes)
- BIL mínimo requerido a través de la resistencia y el BIL mínimos requeridos para las terminales de alta y baja tensión a tierra de la resistencia
- Dimensiones preestablecidas y arreglo del montaje

b) Tensión nominal

La tensión nominal de la resistencia se calcula de la misma forma que se hace para el reactor del filtro.

c) Espectro de corrientes armónicas

Este espectro determina las consideraciones del calentamiento, pérdidas, vibración y ruido.

d) Corriente de corto circuito

Los requerimientos de corto circuito máximo para la resistencia son similares a los requerimientos presentados para el reactor del filtro.

Sin embargo este los filtros de sintonización tienen una resistencia que aunque suele tener valores muy pequeños, este tiene gran importancia en el diseño de los filtros, lo que se le conoce como calidad del filtro (Q) este es un factor que nos indica la cantidad de perdidas en el filtro.

Este también provee un ancho de banda adecuado para evitar los efectos de la desintonización que pueden ser originados por los siguientes casos:

- La frecuencia del sistema no se encuentra siempre a 60 hz ya que el sistema tiene un comportamiento dinámico.
- Las tolerancias de fabricación de los componentes dan como resultado, valores de reactancia distintos.
- La fusión de fusibles da como resultado la perdida de unidades capacitoras por lo que hay un aumento en la reactancia capacitiva.
- Cambio de impedancia en el sistema con el que se planifico el estudio.

Para poder calcular las perdidas en el filtro están dadas por:

$$P = R \left(\frac{MVARc}{V_s} \right)^2 = RI^2$$

Interruptor

Las normas generalmente recomiendan que el dispositivo deba ser capaz de switchear corrientes capacitivas y que deba tener una capacidad nominal de al menos 135% de la corriente nominal del capacitor basada en la potencia reactiva y tensión nominales. Con corrientes armónicas altas, la capacidad de corriente necesita ser seleccionada basada en la corriente fundamental y armónica, continua y en contingencia.

El incremento de tensión fundamental a través del reactor resulta en tensiones de recuperación mayores en el interruptor que cuando se switchea un banco de capacitores sin reactores de sintonía. Además, algunos interruptores pueden tener dificultades al interrumpir corrientes armónicas altas del filtro debido a los altos picos y los posibles cruces por cero.

Las especificaciones para interruptores usados en aplicaciones de filtros de armónicas deben incluir:

- Tensión máxima de operación del sistema entre fases
- Aterrizamiento del banco de capacitores del filtro de armónicas (no aterrizado, aterrizado, aterrizado a través de una impedancia)
- El aterrizamiento del sistema (efectivamente aterrizado, aterrizado a través de una impedancia o flotante)
- Frecuencia fundamental del sistema
- BIL del sistema
- Tipo de instalación (interior, exterior, dentro de un tablero)
- Condiciones ambientales (rango de temperatura ambiente, distancia de fuga, contaminación industrial, velocidad máxima del viento, carga por nieve, requerimientos sísmicos, altitud mayor a 1800 msnm)
- Máxima corriente de corto circuito simétrica, asimétrica, momentánea y de interrupción
- La magnitud y ciclo de trabajo o la capacidad de repetición y duración de las corrientes armónicas individuales a través del interruptor, incluyendo la fundamental, durante diferentes condiciones de operación del filtro
- BIL del interruptor
- Ciclo de trabajo de operación del interruptor (número y frecuencia)
- Trabajo de switcheo del filtro de armónicas o banco de capacitores
- Frecuencia natural del reactor de sintonía del filtro de armónicas. Esta frecuencia natural afecta la relación máxima de la tensión de recuperación a través del interruptor para una falla en el filtro de armónicas

Conductores

Los conductores pueden estar sometidos a calentamiento por efecto piel o corrientes parásitas generadas por las corrientes armónicas. Por ello, el dimensionamiento de los conductores debe estar basado en la corriente fundamental y corrientes armónicas continuas y de tiempo corto.

Cuchillas de puesta a tierra y bloqueos

Para servicio y mantenimiento del equipo, se incluyen cuchillas trifásicas de puesta a tierra cuando se usan capacitores en media y alta tensión. Además, se incluyen bloqueos o permisivos, las cuales se coordinan con la posición del interruptor principal y timers. Las

cuchillas de puesta a tierra sólo cerrarán cuando el interruptor esté abierto y el banco de capacitores descargado (cinco minutos después de la apertura del interruptor).

Apartarrayos

Los apartarrayos se usan en instalaciones de filtros de armónicas para prevenir fallas de los componentes del filtro y otros equipos del sistema durante el switcheo, limitan el riesgo de repetitivos restrikes en el interruptor y limitan las sobretensiones inducidas por descargas atmosféricas. La función de protección primaria del apartarrayos determinará su ubicación y capacidad.

Los apartarrayos conectados de fase a tierra en las terminales del filtro proporcionarán protección general al equipo de la subestación, pero no proporcionarán una reducción sustancial en los transitorios a través del capacitor o reactor del filtro de armónicas. Los apartarrayos conectados en los capacitores del filtro suministrarán protección al capacitor, sin embargo, están expuestos a altas tensiones en estado estable y pueden estar sujetos a energías de descargas mayores que los apartarrayos localizados en el bus.

a) Especificación del elemento

- Tensión máxima de operación del sistema fase a fase
- El aterrizamiento del sistema (efectivamente aterrizado, aterrizado a través de una impedancia o flotante)
- Condiciones ambientales (rango de temperatura ambiente, contaminación industrial, velocidad máxima del viento, carga por nieve, requerimientos sísmicos, altitud mayor a 1800 msnm)
- Máxima corriente de corto circuito disponible
- Tensión nominal y tensión máxima de operación continua (MCOV)
- Clase (distribución, intermedia o subestación)
- Arreglo del montaje

Selección del apartarrayos

Los apartarrayos localizados en las terminales de línea del filtro, en donde la distorsión de tensión armónica es pequeña, son aplicados de la misma manera que otros apartarrayos localizados en el sistema de potencia. Las capacidades del apartarrayos se seleccionan de tal manera que esté habilitado para aguantar la tensión nominal y tensión máxima de operación continua (MCOV), sobretensiones temporales (TOV) y absorción de energía por switcheo.

La tensión pico aplicada y el calentamiento por armónicas debe considerarse en la selección de las capacidades de los apartarrayos localizados en el filtro, en donde la distorsión de tensión puede ser sustancial. La tensión pico máxima esperada es igual a:

$$V_p = \sqrt{2} \sum_h V(h)$$

Para evitar picos de la onda de tensión lo suficientemente altos, por arriba del pico del MCOV, que causen operación y excesivo calentamiento, la capacidad del apartarrayos deberá seleccionarse de tal forma que:

$$MCOV \geq \sum_h V(h)$$

El calentamiento del apartarrayos debido a armónicas es proporcional al orden de la armónica y al cuadrado de la tensión de cada armónica, incluyendo la fundamental. Para que este calentamiento no exceda el calentamiento del mismo apartarrayos aplicado solo a frecuencia nominal, el MCOV del apartarrayos deberá ser seleccionado de la siguiente manera:

$$MCOV \geq \sqrt{\sum_h (hV(h)^2)}$$

El nivel de protección de sobretensión del apartarrayos seleccionado deberá ser coordinado con el nivel de aguante de sobretensión (BIL) del componente del filtro que está siendo protegido. Usualmente se requieren un margen mínimo del 15% para sobretensiones por switcheo y 20% por descargas atmosféricas entre el nivel de protección del apartarrayos y el nivel de aguante del equipo. Los métodos de cálculo de los márgenes de protección están contenidos en la norma IEEE Std C62.22-1997.

5.2.3 Control de switcheo para el filtro de armónicas

Los controles de switcheo típicos para filtros de armónicas son similares a los controles descritos en la norma IEEE Std 1036-1992 para instalaciones de capacitores estándar.

A diferencia de los capacitores, en aplicaciones para filtros de armónicas, las corrientes de inrush y outrush son tomadas en cuenta, aunque son típicamente bajas debido a la presencia del reactor del filtro.

Las condiciones de baja tensión generalmente no son críticas para el diseño del filtro, a menos que la tensión se pierda completamente. En este caso, generalmente el filtro deberá ser desconectado del sistema inmediatamente hasta que el sistema sea restablecido a su condición normal. La desconexión oportuna evita condiciones de sobretensiones dinámicas que pueden ocurrir cuando los capacitores son energizados con transformadores. Las sobretensiones dinámicas pueden también ocurrir cuando se energizan grandes transformadores después de que el filtro está en servicio.

Cuando un filtro pequeño de baja frecuencia se switchea con un filtro para armónicas de frecuencia mayor, la tensión transitoria en el filtro de menor frecuencia armónica puede ser excesiva, resultando fallas en el capacitor o reactor del filtro.

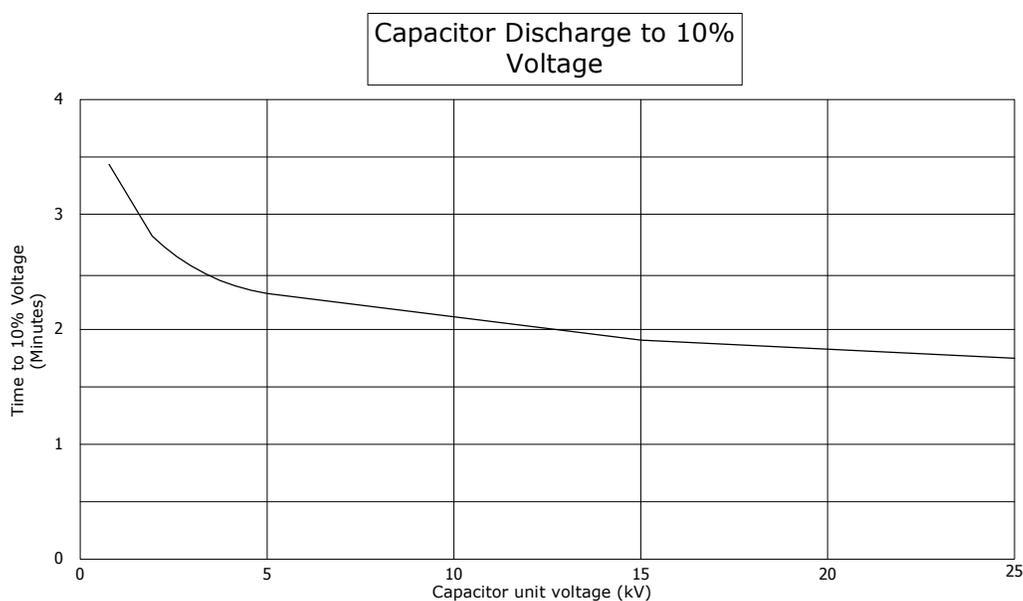
Las categorías para el control de switcheo para filtros de armónicas son:

- a) Control de tensión
- b) Control de corriente
- c) Control de corriente reactiva (control de vars)
- d) Control de tiempo
- e) Control de temperatura

El switcheo de filtros de armónicas por medio de control de tensión, corriente o vars, usualmente está basado en los requerimientos de potencia reactiva y tensión fundamental. Los controladores o relevadores deberán incorporar un filtrado adecuado de tal manera que la señal de switcheo este basada en la corriente y tensión a frecuencia fundamental y no en otros componentes armónicos.

El control de switcheo o el circuito de control asociado generalmente se ajustan a un retraso de cinco minutos entre la apertura y cierre. Este retraso permite que la carga atrapada en cada unidad capacitadora decaiga a 50 volts o menos, antes de que la tensión del bus sea superpuesta a este.

Una carga atrapada del 10% de la tensión de cresta nominal resulta en un incremento del 10% en la corriente de inrush y la sobretensión transitoria. Por ello, cuando el retraso es menor a cinco minutos, es deseable permitir que la carga atrapada decaiga a 10% de la tensión de cresta nominal de la unidad capacitadora.



Tiempo de descarga a 10% de la tensión nominal para unidades capacitadoras de media tensión teniendo 50 volts en 5 minutos.

5.2.4 Protección

El propósito de la protección de filtro de armónicas es aumentar su disponibilidad durante fallas menores, permitiendo que el filtro permanezca en servicio y disparando el banco para un desequilibrio mayor antes de que ocurra un daño severo. Las principales protecciones utilizadas son:

- a) Protección contra sobretensión
- b) Protección contra sobrecorriente
- c) Protección contra desbalance y desintonización
- d) Protección contra sobrecarga

5.2.5 Diseño del filtro de armónicas

El diseño del filtro de armónicas requiere información acerca del sistema de potencia y del ambiente en el cual el filtro será instalado. Esta información incluye configuraciones, impedancias de sus componentes (transformadores, líneas, fuentes, capacitores, filtros, reactores en derivación, cargas), tensiones nominal y máxima, capacidad de carga, factores de potencia, el BIL típico del equipo para el nivel de tensión del sistema y la frecuencia fundamental.

La generación local de corrientes armónicas es un dato importante. La medición de armónicas en el sitio es el medio más preciso para conocer ésta información, si las cargas están instaladas. De lo contrario, el fabricante del equipo no lineal deberá suministrar la generación de corrientes armónicas características.

Por último, se debe establecer la ubicación del equipo y restricciones de operación antes de iniciar el diseño.

I. Determinación de la capacidad del filtro en kVAR

Además del filtrado de corrientes armónicas, el filtro suministrará al sistema potencia reactiva capacitiva que mejorará el factor de potencia y ayudará a mantener la tensión durante la demanda máxima. Los requerimientos de potencia reactiva capacitiva para controlar la tensión y el factor de potencia, generalmente determinan la capacidad efectiva del filtro. La capacidad efectiva del filtro es siempre menor a la capacidad nominal del banco de capacitores del filtro por el efecto sustractivo del reactor y por el sobredimensionamiento del banco de capacitores.

Los factores que deberán ser considerados para el estudio de flujos de potencia y determinar los requerimientos de potencia reactiva capacitiva son:

- Número de pasos del filtro que serán switchados
- Rango de variación de tensión del sistema
- Rango de variación de carga
- Configuración normal y de contingencia del sistema, existente y planeado

II. Selección inicial de la sintonía del filtro

Basada en la generación de armónicas,¹ se hace una estimación inicial de la sintonía del filtro. La sintonía normalmente se designa para reducir la distorsión de corriente y tensión armónica. Para cumplir con este objetivo, el filtro de armónicas típicamente será sintonizado a la frecuencia menor de las armónicas más significativas.² Por ejemplo, si los niveles de corrientes armónicas más altos encontrados fueron para la 5^a y 7^a armónica, un solo filtro sintonizado cercano a la 5^a armónica puede ser suficiente para controlar la distorsión.

Normalmente, los filtros no son sintonizados a una frecuencia armónica exacta, este hecho tiene dos repercusiones importantes. En condiciones de resonancia, la baja impedancia puede ocasionar que todas las corrientes armónicas cercanas a esa frecuencia sean absorbidas por el filtro; entonces, el filtro requerido será más grande y más caro que el necesario para lograr el funcionamiento armónico adecuado.

Por otra parte, la interacción del filtro con la impedancia del sistema resultará en una resonancia paralelo a una frecuencia apenas menor que la frecuencia de sintonía. Si un filtro de armónicas es diseñado exactamente a una frecuencia armónica, una variación en los valores de impedancia del equipo a los considerados en el diseño, podría resintonizar el filtro y ubicar la frecuencia de resonancia paralelo muy cercana a la frecuencia armónica. Entonces, en lugar de baja impedancia, la combinación de la impedancia del sistema y el filtro se vuelve resonante a la frecuencia armónica sintonizada, los niveles de distorsión se harán inaceptables y la amplificación de tensiones podría generar daños severos.

El desplazamiento en la resonancia puede deberse frecuentemente a fallas en la unidad capacitadora del filtro, tolerancia de los componentes y variaciones en la configuración del sistema.

Resulta ventajoso sintonizar el filtro en un rango de aproximadamente 1 a 10% debajo de la frecuencia deseada. Esta sintonía suministrará suficiente filtrado armónico, pero también permitirá la desintonización del filtro.

Sin embargo, para algunas instalaciones con filtros de armónicas múltiples sintonizados a diferentes frecuencias, sintonizar los filtros de armónicas individuales debajo de la frecuencia armónica no resulta tan favorable. Se debe considerar el funcionamiento del filtro a través de un espectro de frecuencias completo en la ubicación del filtro bajo condiciones normales y de contingencia.

La reactancia del capacitor del filtro es determinada por los kVAR del filtro. La reactancia inductiva se selecciona para crear una resonancia en serie con el capacitor del filtro a la frecuencia de sintonía y suministrar de esta forma una trayectoria de baja impedancia al neutro para las armónicas en el sistema.

La reactancia inductiva y capacitiva, para un filtro sintonizado a la h armónica a la frecuencia del sistema son iguales a:³

$$X_L = \frac{X_C}{h^2}, \quad X_C = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) X_{eff}$$

y

$$X_{eff} = \frac{kV_{\varphi-\varphi S}^2}{Q_{eff} (MVAR)}$$

Donde:

- X_{eff} – Reactancia efectiva del filtro
- Q_{eff} – Potencia reactiva del filtro
- $V_{\varphi-\varphi S}$ – Tensión nominal del sistema de fase a fase
- X_C – Reactancia capacitiva del capacitor del filtro a frecuencia fundamental
- X_L – Reactancia inductiva del reactor del filtro a frecuencia fundamental
- h – Número de armónica a la cual el filtro será sintonizado (frecuencia de sintonía en PU)

Si la sintonía del filtro se selecciona ligeramente menor que la frecuencia de la armónica a filtrar o atenuar, el número de armónica (h) no será un múltiplo entero. Por ejemplo, h será igual a 4.7 para filtrar la 5ª armónica, por tanto, la sintonía será a 282 [Hz] en un sistema de 60 [Hz].

El objetivo de sintonizar el filtro también puede ser evitar las armónicas en vez de reducirlas. Esta alternativa se usa algunas veces, donde los niveles de distorsión no son críticos, pero se quiere evitar sobrecargar los capacitores del filtro con corrientes armónicas y crear resonancias armónicas en el sistema de potencia. En este caso, el filtro es con neutro flotante, para evitar la resonancia con el sistema en la 3ª armónica y sintonizado debajo de la 5ª armónica para evitar resonancias con armónicas características (5ª o 7ª).

III. Optimización de la configuración del filtro con guías de armónicas apropiadas

La norma IEEE Std 519-1992 proporciona guías para los límites de distorsión armónica. El filtro de armónicas debe limitar la distorsión de corriente y tensión sobre un rango de configuraciones normales del sistema, así como en condiciones anormales.

En sistemas sencillos pueden realizarse análisis con cálculos manuales. Sin embargo, normalmente, se requiere un programa de simulación armónica para evaluar adecuadamente cada una de las condiciones operativas posibles sobre el espectro de frecuencia de las cargas generadoras de armónicas.

Los estudios de armónicas determinarán el número, la sintonización y la ubicación del filtro de armónicas, basados en el cumplimiento de las normas. Los factores que deberán ser considerados en ellos son:

- Número de pasos del filtro que serán switchados
- Salida de un filtro, si existe más de uno
- Rango de variación de tensión del sistema
- Rango de variación de la carga
- Configuraciones normales y de contingencia del sistema de potencia
- Desintonización del filtro por variaciones de frecuencia en el sistema, rango de tolerancias de fabricación de los equipos, variación de la capacitancia con el cambio de temperatura y salidas por falla de unidades capacitoras del filtro
- Armónicas características y no características
- Armónicas presentes en el sistema

En algunos casos, a pesar de la inserción del filtro, los niveles de distorsión son aún demasiado altos, debido a que la presencia del filtro ha causado una nueva resonancia paralelo con el sistema, cercana a una de las frecuencias armónicas bajas. En este caso, será adecuado resintonizar el filtro a una frecuencia armónica menor. Si esto no es posible, entonces es necesario instalar varios filtros.

IV. Determinación de la capacidad de los componentes

Una vez que el desempeño del filtro ha sido optimizado, se determinan las características de los componentes.

Generalmente, las características del capacitor del filtro son lo primero que se determina, siguiendo respectivamente con el reactor, la resistencia y el interruptor. El cumplimiento armónico usado en el proceso de evaluación deberá ser los valores más altos determinados en el paso anterior.

5.3 Referencias

- ¹ DUGAN, Roger C. (et al). "*Electrical Power Systems Quality*". 2da. Ed., USA, Mc Graw Hill, 1996, p. 265
- ² Idem
- ³ Ibidem, p. 267