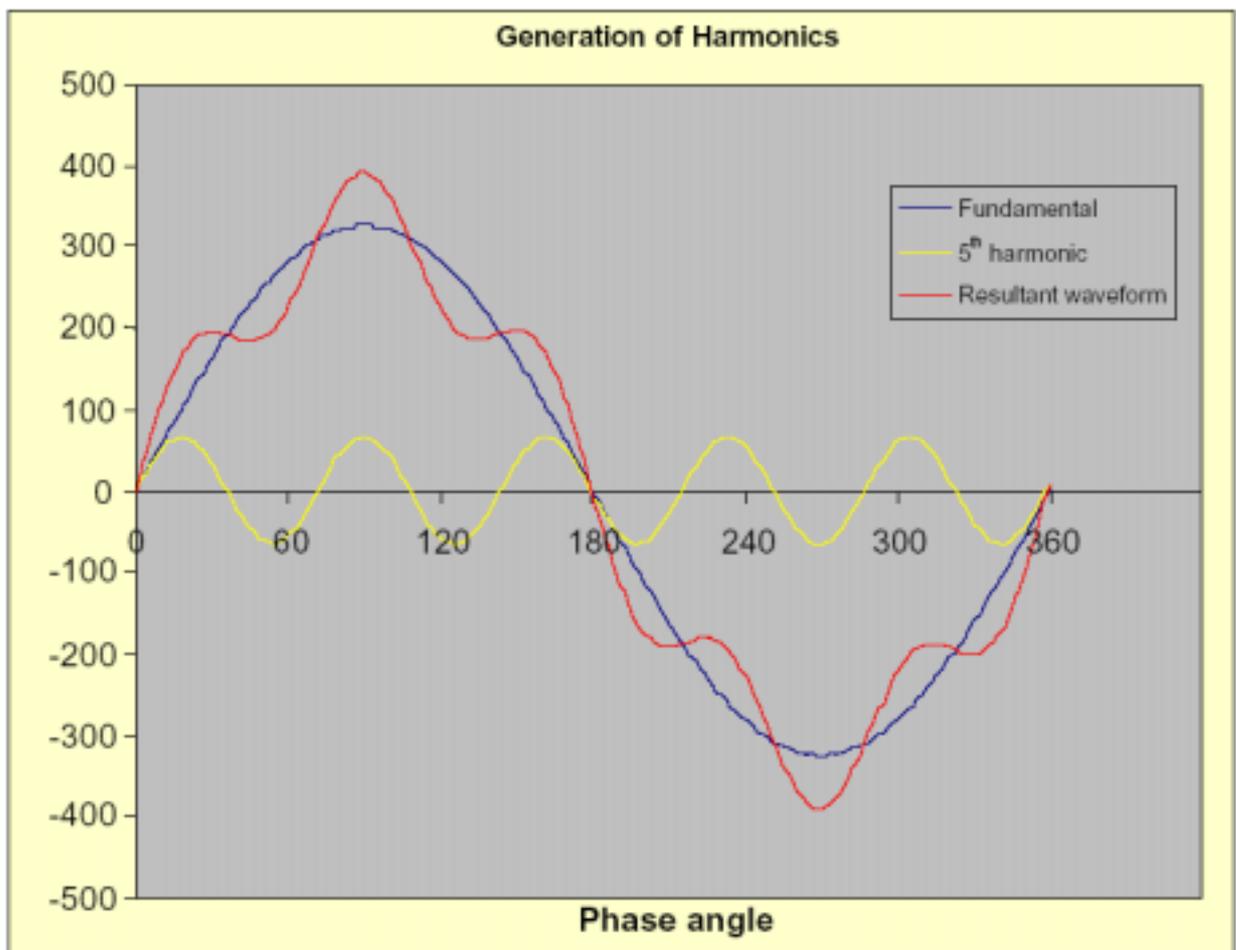


ARMONICAS Y CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA



Contenido

- 1 ELECTRÓNICA DE POTENCIA MODERNA**
- 2 ORIGEN DE LAS ARMÓNICAS**
 - 2.1 CARGAS NO LINEALES
 - 2.2.1.1.1 Electrónica de Potencia
 - 2.2.1.1.2 Aparatos Ferromagnéticos
 - 2.2.1.1.3 Aparatos de Arco
- 3 ANALISIS DE LAS ARMÓNICAS**
- 4 EFECTO DE LAS ARMÓNICAS**
 - 4.1 Disparo de interruptores y fusibles
 - 4.2 Sobrecarga de transformadores
 - 4.3 Sobrecarga de capacitores
 - 4.4 Pérdidas en equipos de distribución
 - 4.5 Excesiva corriente en el conductor de Neutro
 - 4.6 Mal funcionamiento de controles electrónicos y computadoras
 - 4.7 Errores de medición en sistemas de medición
- 5 RESONANCIA**
 - 5.1 RESONANCIA SERIE
 - 5.1.1 Como ocurre la resonancia serie en sistemas de potencia ?
 - 5.2 RESONANCIA PARALELO
 - 5.2.1 Como ocurre la resonancia paralelo en sistemas de potencia ?
- 6 SOLUCIONES**
 - 6.1 CIRCUITOS DE FILTRO
 - 6.2 FILTROS DESINTONIZADOS
 - 6.3 ABSORCIÓN DE ARMÓNICAS
 - 6.4 CALCULO DE BANCOS DE CAPACITORES DESINTONIZADOS
 - 6.5 CALCULO DEL AUMENTO DE LA TENSION POR EL REACTOR SERIE
 - 6.5.1 Cálculo de la potencia requerida del capacitor
 - 6.5.2 Cálculo de la inductancia del reactor
 - 6.6 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR DEL CIRCUITO DE FILTRO
 - 6.6.1 I_{LIN} Límite de la linealidad del núcleo
 - 6.6.2 $I_{Térmica}$
 - 6.7 CLASE DE TEMPERATURA, PERDIDAS, COSTOS DE ENERGÍA
 - 6.7.1 Carga armónica
 - 6.8 QUE ES EL FACTOR DE DESINTONIA
 - 6.9 SELECCION DEL FACTOR DE DESINTONIA
 - 6.10 PROTECCION DE BANCOS DE CAPACITORES Y OTROS EQUIPOS DE LA RESONANCIA

Abreviaturas

ω_R	Frecuencia angular de resonancia
C	Capacitancia
e_k	Impedancia en % de la tensión nominal
f	Frecuencia
f_{res}	Frecuencia de resonancia
I	Corriente
I_L	Corriente total de todas las armónicas
I_{LIN}	Límite de la linealidad del núcleo
I_{RMS}	Corriente eficaz
I_V	Corriente de la armónica número v
k	Constante natural
L	Inductancia
L_N	Valor de fase de la inductancia
N_C	Potencia total del banco
n_R	
n_P	Número de pulsos
P	Potencia Activa
p	Factor de desintonía
Q_C	Potencia del capacitor crítica
Q_{CL}	Potencia de compensación fija en el secundario del transformador
S''_K	Potencia de cortocircuito en el punto de conexión de la carga armónica
S_N	Potencia nominal del transformador
S_T	Potencia del transformador
U	Tensión
U_C	Aumento de tensión
u_S	Tensión de cortocircuito del transformador en %
U_N	Tensión nominal del suministro
v	Orden de la armónica
V_R	
X_C	Reactancia capacitiva
X_L	Reactancia inductiva
Z	Impedancia de la red

1 Electrónica de Potencia Moderna

El progreso en el campo de la Electrónica de Potencia ha traído una revolución a la industria moderna. Estos avances son el resultado de continuos desarrollos en el campo de los semiconductores, así como en las tecnologías de diseño de convertidores, las cuales van de la mano.

Con estos rápidos desarrollos, más y más sistemas convencionales están siendo reemplazados por modernos sistemas de potencia electrónicos, trayendo una gran cantidad de ventajas a los clientes.

Ejemplos clásicos son modernos sistemas de manejo de motores, fuentes ininterrumpidas de alimentación, arrancadores suaves, sistemas de realimentación de energía y muchos más.

Esta tendencia va a prevalecer en el desarrollo industrial en el futuro.

Como la tecnología de los convertidores está ganando terreno rápidamente en las plantas industriales modernas, los sistemas de suministro de energía están contaminados y la forma de onda de tensión y corriente senoidal ideal se encuentra raramente.

Sin embargo, estos sistemas electrónicos de potencia modernos están generando un creciente número de problemas, especialmente en el contexto de los temas de calidad de energía.

Por lo tanto, vale la pena discutir los efectos de estos equipos en las redes de alimentación y en otros equipos, especialmente en capacitores para corrección del factor de potencia.

2 Origen de las Armónicas

2.1 Cargas Lineales

Las cargas que tienen una característica tensión-corriente lineal son llamadas cargas lineales. Cuando son conectadas a un suministro senoidal provocan corrientes senoidales. La corriente puede tener una diferencia de fase con respecto a la tensión.

Ejemplos de cargas lineales son resistencias de calefacción, capacitores, máquinas de inducción, lámparas de filamento, etc.

2.2 Cargas No Lineales

Las cargas que tienen una característica tensión-corriente no lineal son llamadas cargas no lineales. Cuando son conectadas a un suministro senoidal provocan corrientes no senoidales.

Los aparatos no lineales que producen armónicas se pueden clasificar bajo las siguientes tres grandes categorías:

2.2.1 Electrónica de Potencia

Esta categoría de generadores de armónicas es una de las principales razones para creciente preocupación por la distorsión armónica en sistemas de energía. Las aplicaciones de electrónica de potencia como rectificadores, variadores de velocidad, sistemas UPS e inversores están creciendo continuamente. Además de ser la más importante fuente de armónicos en el sistema, este equipamiento también puede ser muy sensible a la distorsión armónica de la forma de onda de tensión.

2.2.2 Aparatos ferromagnéticos

Los transformadores son los elementos más importantes en esta categoría. Los transformadores generan armónicas como resultado de características magnetizantes no lineales. El nivel de armónicas aumenta sustancialmente cuando la tensión aplicada aumenta por sobre los valores nominales del transformador.

2.2.3 Aparatos de arco

Los aparatos de arco generan armónicas debido a las características no lineales del arco en sí mismo. Sin embargo, la iluminación fluorescente tiene básicamente las mismas características y es mucho más predominante en la carga del sistema de energía.

3 Análisis de armónicas

La distorsión armónica de la forma de onda de corriente y tensión se pueden analizar por medio del análisis de la serie de Fourier.

Fourier descubrió que cualquier función periódica se puede descomponer en un número de oscilaciones senoidales de diferentes amplitudes, frecuencias y fases. La distorsión causada por el uso de convertidores depende de la configuración del convertidor.

La siguiente ecuación se aplica a la generación de armónicas

$$v = n_p \cdot k \pm 1$$

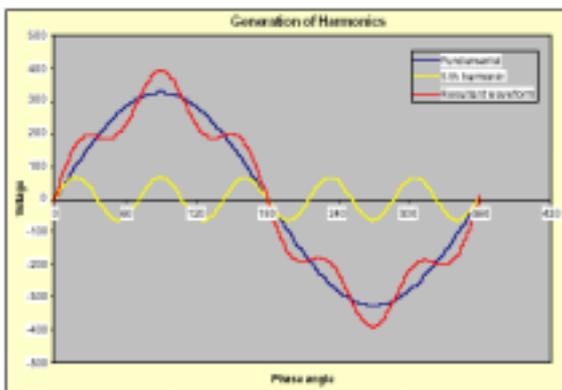
El número de orden v indica el múltiplo de la frecuencia fundamental al cual la armónica ocurre.

Como convertidores de 6 pulsos son ampliamente usados en aplicaciones industriales, las siguientes armónicas ocurren en adición a la forma de onda de frecuencia fundamental de 50 Hz (60Hz) .

Así para un convertidor de 6 pulsos, comúnmente usado en la industria, se generarán armónicas 5th, 7th, 11th, 13th .. La raíz cuadrática media de la suma de la corriente de 50 Hz (60Hz) y el total de las armónicas dará el total de la corriente I_L . Para un forma de onda distorsionada e idealizada de convertidor esta suma RMS de la fundamental y las corrientes armónicas resulta en una forma de onda cuadrada.

$$I_L = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots + I_v^2}$$

La siguiente figura ilustra como las armónicas causan la distorsión de la forma de onda senoidal. El efecto de la distorsión de la 5th armónica se muestra en la figura.



La amplitud de las corrientes armónicas para la corriente de un rectificador idealmente suavizada (forma de onda cuadrada) se puede calcular por medio de la siguiente ecuación.

$$I_v = \frac{1}{v} \cdot I_1$$

Como en la práctica corriente de forma de onda cuadrada no ocurre en la operación del rectificador pero si en cambio corrientes de forma de onda extremadamente distorsionadas, los siguientes valores se pueden emplear con adecuada exactitud para la amplitud de las corrientes armónicas.

$$\begin{aligned} I_5 &= 0.25 \times I_1 \\ I_7 &= 0.13 \times I_1 \\ I_{11} &= 0.09 \times I_1 \\ I_{13} &= 0.07 \times I_1 \end{aligned}$$

Las amplitudes de frecuencias más altas son generalmente de pequeña importancia. La determinación precisa de las armónicas sólo puede ser hecho con un detallado análisis de la red.

4 Efecto de las Armónicas

La distorsión armónica se puede dividir en dos aspectos: la distorsión de tensión y la de corriente.

Los sistemas electrónicos de control, los capacitores y los motores pueden ser perjudicialmente afectados por niveles de distorsión de tensión significantes. Los controles eléctricos son potencialmente las partes más sensibles, ya que muchos controles se basan en una forma de onda senoidal limpia para sincronización o propósitos de control. Los bancos de capacitores son afectados por los picos de la forma de onda. La aislación puede ser degradada si la distorsión armónica es excesiva. Los motores y transformadores sufren mayor calentamiento en presencia de armónicas. En general la distorsión armónica de tensión debería ser limitada al 5%.

Las corrientes armónicas son una preocupación en la interferencia de comunicaciones. También causan aumento de pérdidas en líneas y transformadores y pueden causar respuestas incorrectas de relays.

Los efectos de interferencia de las armónicas en los sistemas de energía y en las cargas conectadas, son generalmente apreciadas por los usuarios solo después de la ocurrencia de una salida de servicio y un costoso trabajo de reparación.

En general se observan los siguientes efectos debido a la presencia de armónicas en los sistemas de energía.

4.1 Disparo de interruptores y fusibles

Debido a efectos de resonancia, los niveles de corriente pueden incrementarse muchas veces provocando el disparo de interruptores y quemando fusibles. Esta situación causa serios problemas en industrias que dependen de la calidad de energía para la operación de sus procesos sensibles.

4.2 Sobrecarga de Transformadores

Los transformadores son diseñados para entregar energía a la frecuencia de red (50/60Hz). Las pérdidas en el hierro están compuestas por las pérdidas de la corriente circulante (que aumenta con el cuadrado de la frecuencia) y las pérdidas de histéresis (que aumentan linealmente con la frecuencia). Con frecuencias mayores las pérdidas aumentan, causando un calentamiento adicional al transformador.

4.3 Sobrecarga de Capacitores

La corriente a través de los capacitores se calcula de la siguiente forma.

$$I = \frac{U}{X_C}$$

$$I = U \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C$$

La reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia. Hasta las más pequeñas amplitudes de tensiones armónicas causan altas corrientes que perjudican a los capacitores.

4.4 Pérdidas en equipos de distribución

Las armónicas agregadas a la fundamental causan pérdidas adicionales en los cables, fusibles y barras de distribución.

4.5 Excesiva corriente de Neutro

En condiciones de carga balanceada sin armónicas, las corrientes de fase se cancelan en el neutro, resultando en una corriente de neutro nula. Sin embargo en un sistema de 4 hilos con cargas monofásicas no lineales, los múltiplos impares de la 3° armónica (3°, 9°, 15°) no se cancelan, sino que se suman en el conductor de neutro.

En sistemas con cantidades importantes de cargas no lineales monofásicas, las corrientes de neutro pueden alcanzar niveles altamente peligrosos. Hay una posibilidad de excesivo calentamiento del conductor de neutro ya que no hay interruptores en el neutro así como lo hay en las fases.

4.6 Mal funcionamiento de controles electrónicos y computadoras

Los controles electrónicos y computadoras requieren una calidad de energía para su operación confiable. Las armónicas causan distorsión en las formas de onda, corrientes en el neutro y sobretensiones que afectan la performance de estos equipos.

4.7 Errores de medición en sistemas de medición.

La exactitud de los sistemas de medición se ve afectada por la presencia de armónicas. Los medidores de energía activa registran exactamente la dirección del flujo de energía a las frecuencias armónicas, pero tienen errores de magnitud que aumentan con la frecuencia.

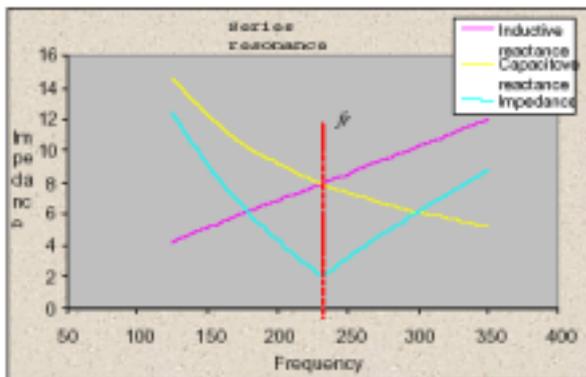
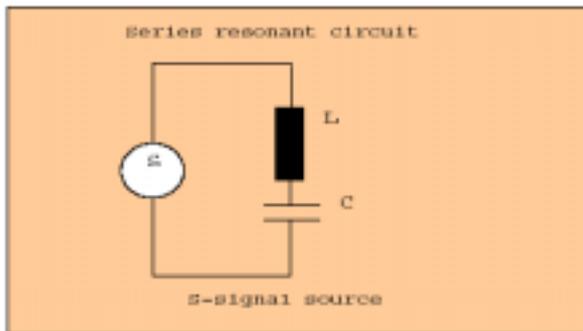
La exactitud de los medidores de demanda y de los medidores de energía reactiva es aun menor en presencia de armónicas.

5 Resonancia

Como se explicó anteriormente las condiciones de resonancia causan sobrecorrientes y sobretensiones. Hay dos posibilidades de condiciones de resonancia como se explica a continuación.

5.1 Resonancia Serie

La combinación de reactancias inductiva y capacitiva en serie forma un circuito resonante serie. El comportamiento de la impedancia de este circuito se ilustra en la figura. Se observa que a una frecuencia llamada frecuencia de resonancia, la impedancia se reduce a un valor mínimo el cual es muy bajo y de naturaleza resistiva. El circuito ofrece una impedancia muy baja a esta frecuencia lo cual causa un aumento en muchas veces de la corriente.



5.1.1 Como ocurre la resonancia serie en sistemas de potencia.

En muchos casos, las armónicas están presentes en lado primario del transformador. El transformador junto con los capacitores en el lado secundario de baja tensión actúan como un circuito resonante serie para el lado de alta tensión. Si la frecuencia de resonancia de la combinación L y C coincide con una frecuencia armónica existente puede sobrecargarse el equipo. Este circuito resonante serie provee un paso de baja impedancia a las armónicas en este caso. La cantidad de absorción dependerá de la posición relativa de la frecuencia de resonancia con respecto a la frecuencia de la armónica. Esta corriente armónica impone una carga adicional al transformador y especialmente a los capacitores. La tensión del lado de baja tensión del sistema se distorsiona como resultado de la resonancia.

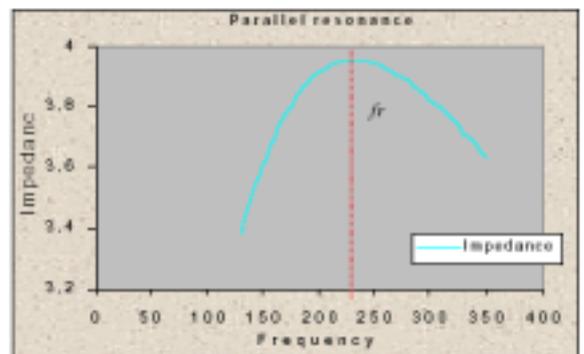
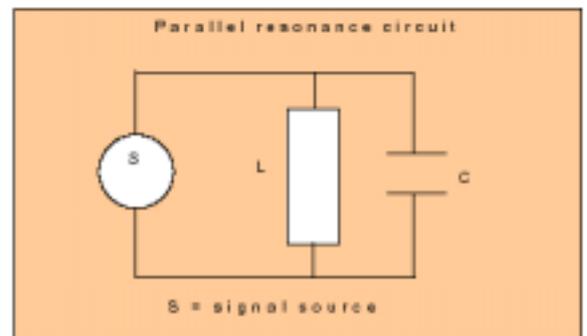
El punto de resonancia serie se calcula con la siguiente fórmula

$$v_R = \sqrt{S_N \cdot \frac{100}{Q_{C1} \cdot e_K}}$$

Se debe tener en cuenta el aumento de tensión sobre el lado secundario.

5.2 Resonancia Paralelo

Una combinación en paralelo de reactancia inductiva y una capacitiva forma un circuito resonante paralelo. El comportamiento de la impedancia de este circuito se muestra en la siguiente figura. A la frecuencia de resonancia la reactancia inductiva iguala a la capacitiva. La impedancia resultante del circuito aumenta a valores muy altos a la frecuencia de resonancia. La excitación de un circuito resonante paralelo causa una tensión muy alta sobre las impedancias y corrientes circulantes dentro del lazo muy altas.



5.2.1 Como ocurre la resonancia paralelo en sistemas de potencia.

Muchos de los sistemas de energía están equipados con capacitores para corrección del factor de potencia. La capacitancia forma un circuito resonante paralelo con las impedancia de la carga y del transformador. En consecuencia el generador de armónicas encuentra una aumentada reactancia de red. Consecuentemente la corriente armónica causa una tensión armónica aumentada comparada con la red no compensada (X_L) la cual puede ser acompañada por distorsión de la fundamental.

Entre la red y el capacitor fluyen corrientes iguales que pueden llegar a sumar un múltiplo de la corriente armónica. Los transformadores y capacitores son cargados adicionalmente lo cual puede causar la sobrecarga de los mismos.

Este circuito resonante se caracteriza por una frecuencia de resonancia dada por

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L_N \cdot C}}$$

Sin embargo, es difícil calcular el valor de L_N ya que depende de la carga conectada a la red. La frecuencia de resonancia se puede aproximar por la siguiente fórmula.

$$v_R = \sqrt{\frac{S_K''}{Q_{C1}}}$$

ó

$$Q_C = \frac{S_K''}{v_R^2}$$

En la mayoría de los casos S_K'' no se conoce y por lo tanto la siguiente fórmula se puede usar para cálculos iniciales.

$$Q_C < \frac{S_T \cdot 100}{v_R^2 \cdot u_S}$$

Para evitar la condición de resonancia la potencia de salida de los capacitores debería ser menor que la potencia crítica calculada por la fórmula de anterior. La correspondiente frecuencia de resonancia se puede calcular por

$$f_R = 50 \cdot \sqrt{\frac{S_T \cdot 100}{Q_C \cdot u_K}}$$

Ejemplo:

Transformador $S_T=630$ kVA, $u_K=5\%$
Capacitor $Q_C=250$ kVar

$$f_R = 50 \cdot \sqrt{\frac{630 \cdot 100}{250 \cdot 5}} = 355 \text{ Hz}$$

La frecuencia de resonancia es crítica para la 7^o armónica y el banco de capacitores debe ser menor a 250 kVar.

El punto de resonancia paralelo depende de la inductancia de la red y de la potencia capacitiva.

Por lo tanto es posible ubicar el punto de resonancia de manera de asegurar la menor perturbación. En realidad la impedancia de la red no permanece constante todo el tiempo porque está determinada por la potencia de cortocircuito de la red y de las cargas conectadas a ellas. La potencia de cortocircuito de la red varía con el estado de conexión y el punto de resonancia paralelo se mueve con la configuración de la red. Por lo tanto el fenómeno puede ser más complicado cuando el equipo de corrección del factor de potencia varía por pasos.

En general, es evidente que la ocurrencia de resonancia serie o paralelo puede causar sobretensiones y sobrecorrientes de niveles peligrosamente altos. Las armónicas que crean una posibilidad de resonancia no sólo sobrecargan los componentes del sistema sino también deterioran la calidad de energía en términos de distorsión y caídas de tensión.

6 Soluciones

Las armónicas son elementos no deseados debido a sus efectos no deseados sobre el sistema eléctrico. Las siguientes soluciones se pueden tomar para reducir el efecto de las armónicas y proteger a los equipos.

- Limitar la potencia de las fuentes generadoras de armónicas.
- Limitar el número de fuentes generadoras de armónicas que operan simultáneamente.
- Conectar en forma equilibrada cargas monofásicas en sistemas trifásicos.
- Agregar conductores de neutro extras.
- Tener la tierra aislada separada de la puesta a tierra.
- Circuitos de filtros sintonizados
- Circuitos de filtros desintonizados
- Usar equipos con rectificadores con mayor número de pulsos.
- Filtros Activos de armónicas

Sin embargo, en el alcance de esta nota de aplicación limitaremos la discusión a filtros sintonizados y desintonizados.

6.1 Circuitos de filtro

El capacitor junto con un reactor forma un circuito resonante serie. Este filtro puede ser sintonizado a una de las frecuencias armónicas que estén en la red.

Si la frecuencia de resonancia del circuito está desviada de la frecuencia de la armónica entonces se lo llama circuito de filtro desintonizado.

Por el contrario si la frecuencia de sintonía se ajusta próximo a la frecuencia de la armónica entonces se lo llama circuito de filtro sintonizado.

Es importante estudiar el comportamiento de la impedancia de un circuito resonante serie entender la construcción del filtro.

Reactancia de un reactor

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

(La reactancia inductiva aumenta con el incremento de la frecuencia)

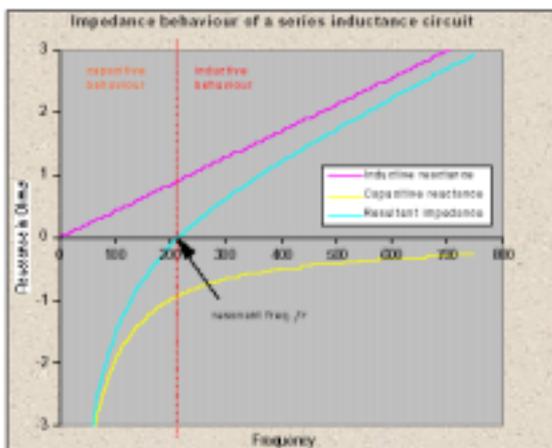
Reactancia de un capacitor

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

(La reactancia capacitiva disminuye con el incremento de la frecuencia)

Impedancia de la red

$$Z = X_L - X_C$$



El diagrama previo muestra el comportamiento de las reactancia inductiva y capacitiva, y de la impedancia resultante del circuito resonante serie.

- $f < f_{RES} \quad (Z = X_L - X_C) < 0$

La reactancia del circuito resonante serie es de naturaleza capacitiva en este rango de frecuencias. El circuito filtro es capaz de proveer la potencia reactiva capacitiva para la compensación de la energía reactiva a 50 Hz. También siendo de naturaleza capacitiva; el filtro forma un circuito resonante paralelo con las impedancias de la red y de la carga. La frecuencia de resonancia de este circuito resonante paralelo es menor que la frecuencia de resonancia propia del circuito de filtro. No se observan efectos de resonancia si no existen armónicas en este rango de frecuencias.

- $f = f_{RES} \quad (Z = X_L - X_C) = 0$

La reactancia capacitiva e inductiva son iguales. La impedancia del circuito es de naturaleza ohmica y muy pequeña en magnitud. Aún hasta pequeñas tensiones armónicas causarían muy grandes corrientes de inserción a esta frecuencia.

- $f > f_{RES} \quad (Z = X_L - X_C) > 0$

La reactancia del circuito resonante serie es de naturaleza inductiva para frecuencias por encima de f_{RES} . El filtro siendo de naturaleza inductiva no forma ningún circuito resonante con las impedancias de la red ni de la carga. De esta manera la posibilidad de resonancia más allá de la frecuencia de resonancia está inhibida.

6.2 Filtros desintonizados

Cuando la frecuencia de resonancia de un circuito de filtro resonante serie está ubicada a una frecuencia a las armónicas existentes en el sistema, el circuito de filtro se denomina filtro desintonizado. La filosofía de los filtros desintonizados se explica en el siguiente ejemplo.

Consideremos un filtro resonante serie conectado en una red con convertidores de 6 pulsos. Las armónicas que aparecerán en el sistema están dadas por:

$$v = 6 \cdot k \pm 1$$

Las armónicas que se generaría son 5°, 7°, 11°, 13° y así sucesivamente. La frecuencia armónica más baja que aparecería es la 5° (250 Hz). Si el circuito resonante serie está sintonizado a una frecuencia de 213 Hz, entonces a todas las frecuencias armónicas presentes el filtro actúa como un componente inductivo y se elimina la posibilidad de resonancia a la 5° armónica.

La impedancia ofrecida a la 5° armónica es menor que la del capacitor solo. Esto significa que el filtro resonante serie absorberá cierta parte de la 5° armónica.

La factor de desintonía $p(\%)$ refleja la relación entre la reactancia del reactor y la reactancia del capacitor a la frecuencia fundamental. La frecuencia de resonancia de un circuito filtro resonante serie se indica indirectamente por p .

Ejemplo:

$$p = 7\% \quad f_R = 189 \text{ Hz}$$

$$p = 5.67\% \quad f_R = 210 \text{ Hz}$$

La relación entre p y f_R está dada por:

$$f_R = f_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{p}}$$

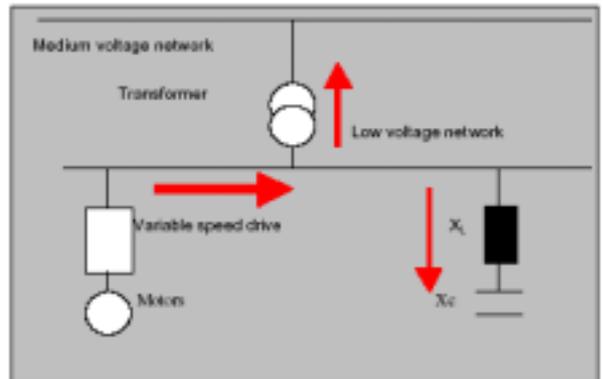
Ejemplo:

$$p = 7\% \quad f_1 = 50 \text{ Hz}$$

$$f_R = 50 \cdot \frac{1}{\sqrt{0.07}} = 189 \text{ Hz}$$

La siguiente tabla muestra una comparación para varias combinaciones a frecuencia fundamental de 50 Hz.

Frecuencia de resonancia f_R	Frecuencia de resonancia relativa	Reactor / Capacitor Factor p
134	2.67	14
189	3.78	7
210	4.20	5.67
250	5.00	4



6.3 Absorción armónica

Los capacitores desintonizados absorben corrientes armónicas. El grado de absorción de las armónicas está determinado por la frecuencia de resonancia del circuito resonante serie. El grado de absorción de corriente armónica aumenta a medida que la frecuencia se corre hacia la armónica vecina. La figura anterior muestra la distribución de la corriente armónica en función del circuito oscilante serie y del transformador.

Cuanto menor sea la impedancia del circuito oscilante serie, mayor será el grado de absorción de la corriente armónica. La carga del sistema por corrientes armónicas se reduce en la misma proporción.

6.4 Cálculo de bancos de capacitores desintonizados

Los siguientes son los puntos importantes en el diseño de bancos de filtros de capacitores desintonizados.

- Cálculo y definición de la potencia capacitiva total y la potencia por paso.
- Selección del grado de desintonía.

Varios aspectos relacionados a los puntos antes mencionados se describen en detalle.

6.5 Cálculo del aumento de la tensión por el reactor serie.

Los reactores conectados en serie con los capacitores causan un aumento de la tensión sobre el capacitor, por lo tanto estos deben tener una tensión nominal mayor que la tensión nominal de la red.

El aumento de tensión sobre los capacitores se calcula por

$$U_C = U_N \cdot \frac{100}{100 - P}$$

Seleccionar la tensión nominal disponible del capacitor inmediatamente superior al valor calculado.

Ejemplo:

$U_N = 400 \text{ V}$, $p = 7\%$, resulta $U_C = 430 \text{ V}$
Se debe seleccionar un capacitor de 440 V de tensión nominal.

Esta es la razón por la cual los capacitores de bancos standard no pueden ser usados para construir filtros desintonizados y tienen que ser reemplazados por otros con mayor tensión nominal de servicio.

6.5.1 Cálculo de la potencia requerida del capacitor.

$$Q_C = \left(1 - \frac{7}{100}\right) \cdot \frac{U_C^2}{U_N^2} \cdot N_C$$

$$C = N_C \cdot \frac{\left(1 - \frac{P}{100}\right)}{U_N^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}$$

6.5.2 Cálculo de la inductancia del reactor

$$L = \frac{P}{100 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot C}$$

6.6 Dimensionamiento del reactor del circuito de filtro.

6.6.1 I_{LIN} Límite de la linealidad del núcleo

Los reactores con núcleo de hierro de los circuitos de filtro tienen un riesgo de saturación con el aumento de la magnetización.

I_{LIN} es un parámetro importante para el dimensionamiento del reactor.

Un standard bien probado es:

$$I_{LIN} = 1,2 \cdot (I_1 + I_3 + I_5 + I_7)$$

Con $L = 0,95 \cdot L_N$

La saturación magnética del reactor causa una disminución en la constante de permeabilidad magnética y provoca la disminución de la inductancia del reactor. Con la disminución de la inductancia la frecuencia de desintonía aumentará de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$f_R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Consideremos un filtro desintonizado con un factor de desintonía del 7%. La reducción de la inductancia debido a la saturación provocaría que la frecuencia de sintonía se aproximara en forma cercana a la 5° armónica. Debido a una menor impedancia ofrecida una gran cantidad de 5° armónica sería tomada de la red. Podría provocar una sobrecarga del equipamiento resultando en el disparo de interruptores o quizás dañando al equipamiento. La alta corriente circulante debido a la 5° armónica mantendrá constantemente al reactor en saturación.

Por lo tanto los reactores deben ser dimensionados de forma tal que con la suma aritmética de todas las corrientes máximas existentes (corriente nominal, armónicas, control remoto por audio frecuencias) las características magnéticas del reactor todavía se mantengan en la zona lineal.

Si $I > I_{LIN}$, las características tensión – corriente del reactor ya no son lineales y el reactor mismo producirá armónicas.

6.6.2 $I_{Térmica}$

$I_{Térmica}$ es un parámetro importante para el dimensionamiento eléctrico del reactor.

El standard industrial es $I_{TH} = 1,05 \cdot I_{RMS}$

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots} = \text{Corriente Eficaz}$$

En términos de pérdidas es importante saber que frecuencias y amplitudes se usan. Mayores frecuencias causan pérdidas mucho mayores comparado con la corriente de 50 Hz.

6.7 Clase de temperatura, pérdidas, costos de energía.

Los reactores de bajo costo causan mayores pérdidas y por lo tanto disipación a alta temperatura y altos costos de energía. El costo adicional de reactores más caros se amortiza en poco tiempo por la reducción de costos de energía. Pero lo más importante son los aspectos térmicos.

La siguiente tabla compara las clases de temperatura T40/H y T40/B.

	T40/H	T40/B
Dimensiones	Menores	Mayores
Peso	Menor	Mayor
Precio	Menor	Mayor
Pérdidas eléctricas	Mayores	Menores
Temperatura	Mayor	Menor
Costos de energía	Mayor	Menor
Expectativa de vida	Menor	Mayor

6.7.1 Carga armónica.

El standard industrial especifica la carga armónica de los reactores.

$$U_{H3} = 0.5\% \text{ superpuesto a } V_N \quad (100\% \text{ duty cycle})$$

$$U_{H5} = 5\% \text{ superpuesto a } V_N \quad (100\% \text{ duty cycle})$$

$$U_{H7} = 5\% \text{ superpuesto a } V_N \quad (100\% \text{ duty cycle})$$

Estos valores standard son suficientes para la mayoría de las aplicaciones, sin embargo depende de las aplicaciones individuales y tienen que ser chequeados cuidadosamente.

- Dimensionamiento de los capacitores.
- Sobrecorriente.
- Sobretensión.
- Temperatura / ventilación.

6.8 Que es el factor de desintonía.

El factor de desintonía se define de la siguiente forma.

$$p = \left(\frac{f}{f_{RES}} \right)^2 \cdot 100$$

El factor de desintonía p (en %) es la relación entre las reactancia del reactor y del capacitor.

$$p = 100 \cdot \frac{X_L}{X_C} = 100 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L \cdot C$$

Los filtros son generalmente diseñados para un factor de desintonía de 7%. Para 5° armónica 7% corresponde una frecuencia de resonancia serie de 189 Hz. La razón para la popularidad del factor de desintonía 7% es la efectividad de costo obtenida por la optimización de componentes a esta frecuencia de resonancia, y buena protección del equipamiento, así como también un cierta reducción de las armónicas.

6.9 Selección del factor de desintonía.

Debido a la continua variación de las condiciones de carga el punto de resonancia paralelo se mueve constantemente. Si la frecuencia de resonancia del circuito de filtro iguala la frecuencia de una armónica presente, provocaría la sobrecarga de los capacitores. Para evitar tal condición el filtro se sintoniza por debajo de la menor armónica presente en el sistema. El rango de armónicas presentes en sistema determina el grado de desintonía a usar.

Como se explicó, los filtros desintonizados absorben armónicas en los sistemas de energía. Menor factor de desintonía significa mayor absorción de armónicas.

6.10 Protección de bancos de capacitores y otros equipos de la resonancia.

- Microswitch térmico en el núcleo del reactor

Los inductores para la aplicación de filtros son diseñados para una clase de temperatura particular. Esta clase de temperatura determina la máxima temperatura permisible del reactor. La temperatura del reactor se mantiene dentro de límites seguros con la ayuda del correcto dimensionamiento en la fase de diseño y la correcta ventilación durante la operación. Sin embargo debido a mayores temperaturas ambiente y a la carga de armónicas la temperatura puede subir a mayores niveles. Para detectar esta temperatura y evitar daños eléctricos y accidentes un microswitch térmico se coloca dentro del bobinado del inductor que se puede conectar en serie con la bobina del

contactor para desconectar el circuito de filtro en caso de sobretensión.

- Relays de sobrecorriente térmica.
- Fusibles
- Dispositivos de ventilación
- Desconectores de seguridad

Instalación de bancos de capacitores desintonizados

- Verificar igual que bancos de capacitores standard.
- Ajustar los relays de sobrecorriente a $1.3 I_N$.
- Ajustar el termostato a 35°C para comienzo de la operación de la ventilación, y luego a 55°C para la desconexión completa del banco.
- Medición de la corriente fundamental de los capacitores.
- Medición de las corrientes armónicas de los capacitores:
Las corrientes armónicas deberían ser menores a los niveles de corrientes armónicas especificados para el reactor. Ejemplo: HvM standard 0.5% para 3° , 5% para 5° y 7° respectivamente. La medición se debe realizar bajo altas condiciones de carga. Esta medición mostrará la carga del banco de capacitores.

Como se explicó, los filtros desintonizados absorben armónicas en los sistemas de energía. Menor factor de desintonía significa mayor absorción de armónicas.

- Medición de tensión y corriente en los cables de alimentación al tablero general de alimentación incluyendo las armónicas. Esta medición se debería realizar antes y después de la instalación del banco de capacitores. Esta comparación mostrará la reducción o incremento de los niveles de armónicas.