

Compensación de Potencia Reactiva por medio de Filtros de armónicos

4.1 Introducción

Una de las preocupaciones que existen en los sistemas eléctricos de potencia y sus cargas es la correcta identificación de los problemas que pueden afectar la calidad de la energía.

Es típico por ejemplo encontrar cargas industriales no lineales de gran tamaño tales como: hornos de arco eléctrico, fundidoras de inducción, molinos, ventiladores industriales y por lo general grandes motores que necesitan compensación de potencia reactiva, ya que pueden llegar a tener un factor de potencia atrasados y menores a 0.8, esto significa que requieren potencia real y reactiva para mantener un funcionamiento óptimo.

La compensación de potencia reactiva se refiere a la generación de la potencia reactiva cerca de las cargas que lo requieran, para mejorar la calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia.

Recordando que la potencia aparente es igual a:

$$S = VI^*$$

$$S = P + jQ$$

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{P + jQ}$$

Al consumir grandes cantidades de potencia reactiva implica una disminución del factor de potencia lo cual es indeseable para las empresas, ya que esta potencia no representa un trabajo útil en la misma, sin embargo esto representa un aumento considerable en la potencia aparente, mientras que el factor de potencia ideal sería el unitario ya que estaría aprovechando de la manera más eficiente el consumo de energía.

La compensación de potencia reactiva se basa en 3 objetivos principales:

1.- Corrección del Factor de Potencia.

En la práctica, los mecanismos de generadores de potencia reactiva, deben ser instalados lo más cerca de la carga que requiera dicha compensación, este debe de proveer la potencia reactiva suficiente que la carga necesite.

Mientras el consumo de potencia reactiva de estas cargas industriales sea muy grande, esto se provocara corrientes de carga mucho mayores que si se estuviera alimentando solo con potencia real.

Esto provoca pérdidas mayores en el sistema por el efecto joule en los cables de alimentación, mientras que las caídas de tensión serán mucho mayores.

2.- La Regulación de voltaje:

Cuando existen cargas en las cuales demanden potencia reactiva, en todos los casos esta demanda varia provocando una variación también en el voltaje en el punto de alimentación, lo cual puede afectar otras cargas a ese mismo punto.

El sistema es usualmente es obligado a mantener un voltaje de $\pm 5\%$ en promedio por un periodo de pocos minutos a horas dependiendo de qué tan crítica sea la variación de carga.

Por lo que generalmente es más económico dimensionar un sistema de potencia acorde a la demanda máxima de potencia real y manejar los reactivos por medio de bancos de capacitores u otros equipos capaces de generar potencia reactiva.

3.-Balance de la carga.

La operación desbalanceada en un sistema eléctrico de potencia, aumenta los componentes de corriente de secuencia negativa y cero, provocando efectos indeseables como son:

Perdidas adicionales en los motores y en unidades de generación, torques oscilatorios en maquinas de ac, aumento de rizo en rectificadores y excesos de corriente en el neutro.

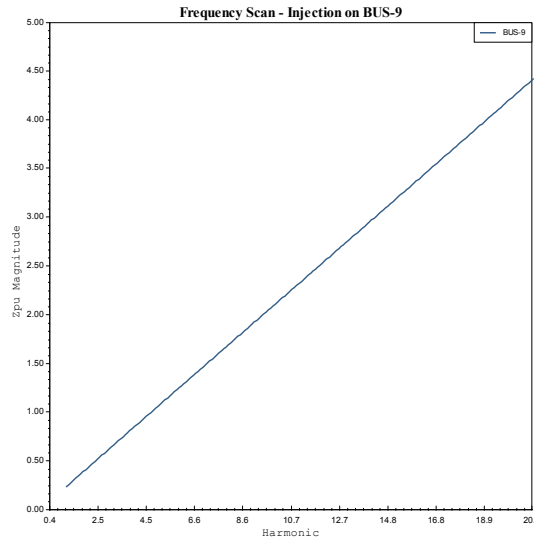
Sin embargo estos compensadores inherentemente incrementan las armónicas en el sistema, los cuales pueden ser suprimidos internamente o pueden ser filtrados esto se da por la siguiente razón:

Podemos hacer uso de programas de computo para predecir y analizar la distorsión armónica y el flujo de corriente armónica en los sistemas eléctricos de potencia.

Esto es posible utilizando la información acerca de la estructura y configuración de la red, junto con las corrientes armónicas generadas por las cargas conectadas a ese sistema eléctrico de potencia puede determinar la impedancia de la red a cada armónica.

Esto nos permite predecir la susceptibilidad que tenga un bus a entrar en resonancia, por lo que los niveles de corrientes armónicas podrían aumentar considerablemente.

Cuando no existe compensación de potencia reactiva en el bus de un sistema industrial donde se han conectado varios motores con su controlador de velocidad se tiene la siguiente impedancia vs frecuencia.



Por lo que al aumentar la frecuencia de operación en el bus aumentara linealmente la impedancia.

Mientras que al conectar un banco de capacitores para compensar la potencia reactiva que necesitan los motores, este entrara en resonancia en paralelo ya que el sistema donde se conecta el bus se comporta como un elemento inductivo por lo que se tendrá la siguiente respuesta:

$$X_l = \omega l$$

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

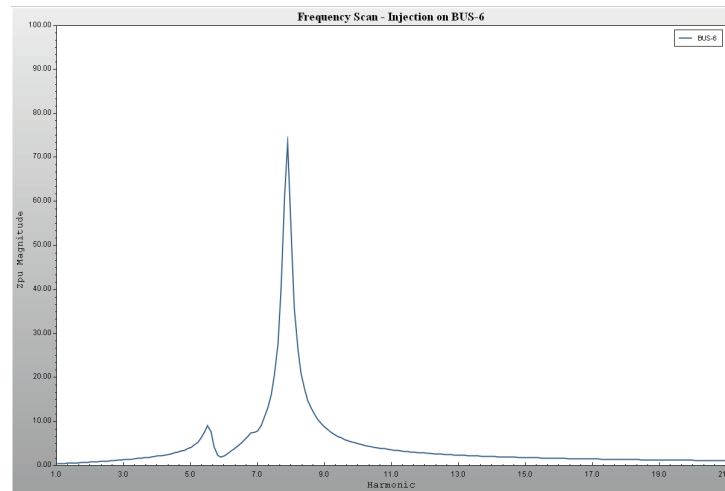
$$X_l \parallel X_c = \frac{(X_l)(X_c)}{X_l - X_c}$$

Por lo que cuando la reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva, la impedancia aumenta drásticamente generando voltajes y corrientes muy grandes en el bus donde se conecten los motores.

$$X_l = X_c = X$$

$$X_l \parallel X_c = \frac{X^2}{0} = \infty$$

Por lo que llegaría a alcanzar un valor infinito, sin considerar las pérdidas en el sistema ya que estas pérdidas son las encargadas de amortiguar el incremento excesivo generado por la resonancia en paralelo, por lo que tendremos una respuesta impedancia vs frecuencia de la siguiente forma.



Por lo que obtendremos una frecuencia de resonancia equivalente a:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

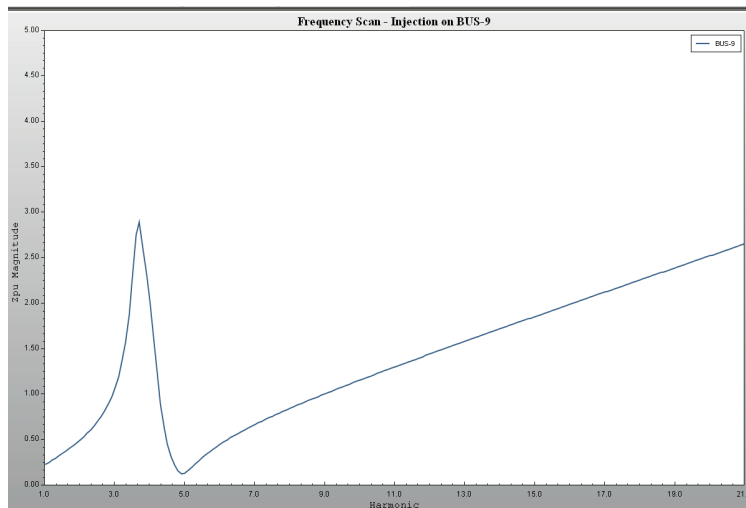
Donde la inductancia (L) representa la red equivalente, mientras la (C) representa la capacitancia equivalente del banco de capacitores, donde se conectan al bus por lo que podemos también calcular la frecuencia de resonancia con la siguiente expresión:

$$h_o = \sqrt{\frac{S_{cc}}{S_{bco}}}$$

Donde la S_{cc} se refiere a la potencia de corto circuito en el bus mientras que S_{bco} representa la capacidad real del Banco de Capacitores.

La justificación de la implementación de Filtros de Armónicos en el sistema se refiere a la disminución de la distorsión armónica total de voltaje en los buses de tal manera que se aprovecha el banco de capacitores para poder compensar con la potencia reactiva apropiada al bus, desviando el flujo de corrientes armónicas al sistema, por lo que es común conectar un reactor en serie para formar un filtro sintonizado con la armónica de mayor consumo en la carga.

Por lo que al sintonizar a la armónica de mayor tamaño reduciremos en gran medida, la distorsión total armónica en el bus, manteniéndolo a niveles dentro de la norma.



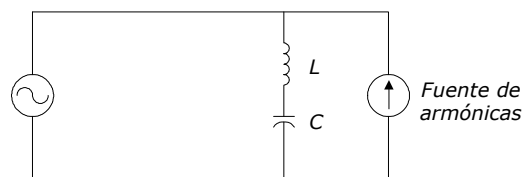
La aplicación de estos dispositivos cumple diferentes propósitos; unos son para bloquear el flujo de las corrientes armónicas hacia cargas sensibles, a pesar de seguir circulando por la red, mientras alimenta de potencia reactiva a la carga.

Otros absorben las armónicas, las cuales son confinadas para circular por zonas específicas del sistema, preferentemente cerca a la fuente emisora de las mismas.¹

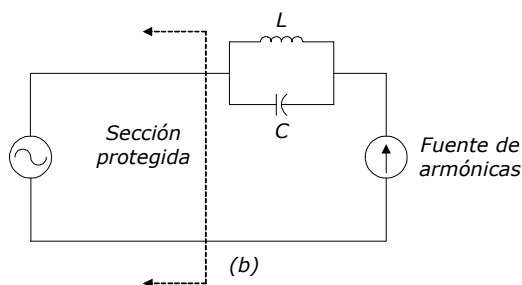
Por lo tanto, la aplicación de filtros no elimina corrientes armónicas, únicamente desvía o controla el flujo de corriente armónica en el sistema de potencia.

4.2 Filtros pasivos

Estos filtros tienen elementos pasivos (inductores, capacitores y resistores) configurados y sintonizados para controlar las armónicas. Son comúnmente utilizados y relativamente económicos comparados con otras formas de filtrar la distorsión armónica.² Según el propósito, pueden ser de dos tipos: filtros en derivación y serie.



(a)



(b)

(a) Filtro en derivación. (b) Filtro serie

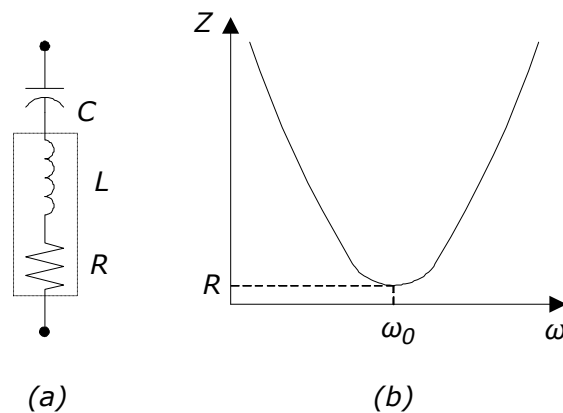
4.2.1 Filtros en derivación

Los filtros en derivación proveen un camino de baja impedancia para las frecuencias armónicas y consisten de una rama compuesta por elementos RLC conectada en paralelo con el sistema de potencia. Existen diferentes configuraciones para estos filtros, pero las más utilizadas son los filtros de una sintonía.

Filtro sintonizados

a) Filtro de una sintonía

El diseño más común de filtro pasivo en derivación es el sintonizado a una sola frecuencia. Presenta una baja impedancia a la frecuencia armónica que se desea eliminar;³ ya que, para esta frecuencia, las reactancias inductiva y capacitiva son iguales y por lo tanto se anulan, presentando una impedancia mínima, de valor aproximadamente igual a la resistencia del inductor.



(a) Filtro sintonizado simple (b) Comportamiento en frecuencia

Esto es debido a que la reactancia inductiva es equivalente a $X_l = j\omega l$ mientras que la reactancia capacitiva es $X_c = \frac{1}{j\omega C}$, esta reactancia se resta conforme a la reactancia inductiva debido a que:

$$X_c = \frac{1}{j\omega C} = \frac{j}{j} \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}$$

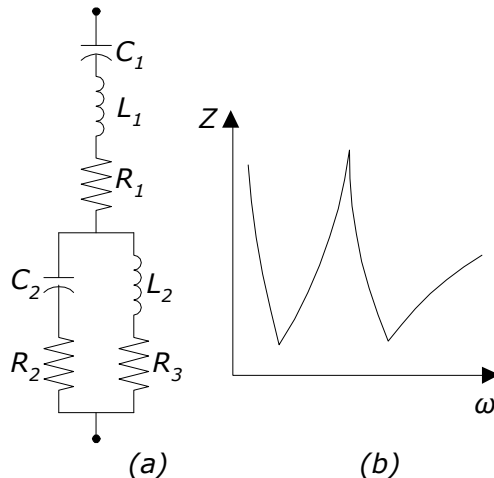
Por lo que al conectar en serie estas 2 reactancias se anulan, ya que estas tienen signos contrarios,

El factor de calidad Q del filtro, indica las pérdidas en los elementos que lo conforman; asimismo, determina la forma de la característica de impedancia y hace que sea más o menos estrecha, definiendo el paso banda del mismo.⁴

b) Filtros de doble sintonía

Un filtro de doble sintonía resulta de dos filtros de una sintonía conectados en paralelo; su impedancia equivalente es prácticamente igual a la del filtro de una sintonía. Tiene la ventaja de reducir las pérdidas de potencia a la frecuencia fundamental; sin embargo, la principal ventaja se tiene en aplicaciones de alta tensión, porque la reducción del número de inductores está sujeta a las tensiones de impulso pleno.⁵

También pueden diseñarse filtros de triple o cuádruple sintonía, pero son raramente justificados debido a la dificultad que presentaría el arreglo.⁶



(a) Filtro de doble sintonía (b) Comportamiento en frecuencia

c) Filtros sintonizados automáticamente

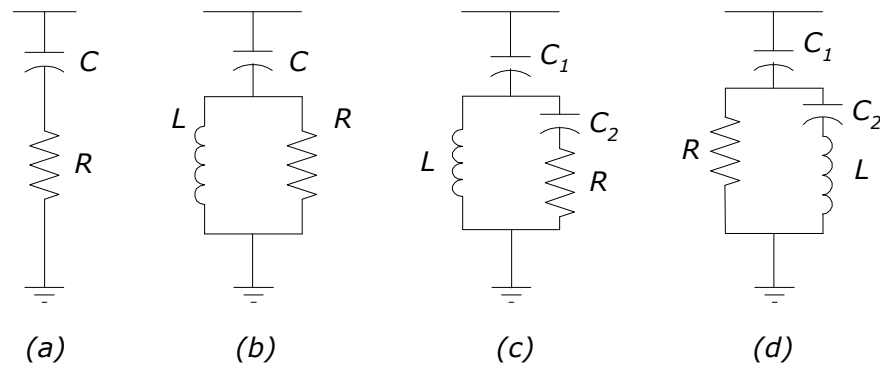
El propósito de diseñar filtros sintonizados es reducir la desviación de frecuencia máxima. La sintonización del filtro puede llevarse a cabo ya sea por el switcheo automático de la capacitancia o por la variación de la inductancia. Un sistema de control mide la potencia reactiva de frecuencia armónica en el filtro y usa la información para alterar el valor del inductor o del capacitor. Éste método ha sido usado en convertidores de alta tensión de corriente directa.⁷

Los filtros sintonizados automáticamente ofrecen algunas ventajas sobre otros arreglos de filtros. Por ejemplo, se reduce el costo del capacitor, el cual es el componente más caro del filtro, debido a que su tamaño es menor; además puede combinar un alto coeficiente de temperatura y un alto rango de potencia reactiva. Debido a su alto Q , la pérdida de potencia es menor, por tanto se reduce el costo del resistor y el costo de pérdidas en el sistema.⁸

Filtros de amortiguamiento

Atenúan un amplio espectro de frecuencias armónicas debido a que presentan una baja impedancia, son más robustos frente a problemas de pérdida de sintonía, menos sensibles a variaciones de temperatura y desviación de frecuencia; sin embargo, originan una frecuencia de resonancia paralelo al interactuar con el sistema, tienen grandes pérdidas en el resistor y en el reactor y requieren ser diseñados para mayor potencia aparente en caso de querer filtrar una corriente armónica específica.⁹

Existen cuatro tipos de filtros de amortiguamiento: filtro de primero, segundo y tercer orden y filtro tipo C.



(a) Primer orden. (b) Segundo orden. (c) Tercer orden (d) Tipo C

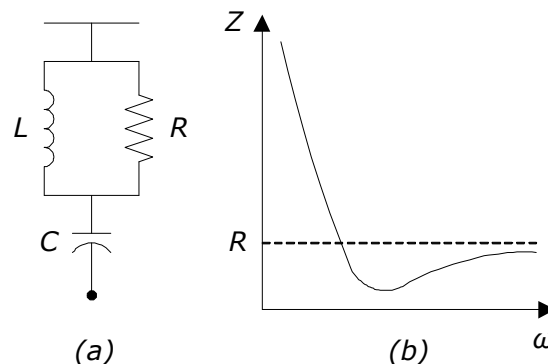
a) Filtro de primer orden

El filtro de primer orden raramente se usa porque requiere un capacitor muy grande y tiene pérdidas significativas a la frecuencia fundamental.¹⁰

b) Filtro de segundo orden

Provee el mejor funcionamiento de filtrado, pero tiene grandes pérdidas. Se utiliza generalmente en filtros compuestos para altas frecuencias, por ello es llamado comúnmente filtro paso altas de segundo orden.¹¹

Atenúa armónicas de la frecuencia de sintonía y otras de mayor frecuencia; debido a que presenta una baja impedancia desde ésta frecuencia en adelante, producto de la característica amortiguada generada por la resistencia en paralelo con la inductancia.¹²



(a) Filtro paso altas de segundo orden (b) Comportamiento en frecuencia

El factor de calidad de este filtro es bajo (0.5 a 5.0) y tiene un paso banda relativamente ancho.¹³

Los filtros paso altas regularmente no son utilizados en los sistemas de potencia; sin embargo, pueden ser usados en sistemas industriales donde corrientes armónicas de alta frecuencia causan interferencia en las comunicaciones.

c) Filtro de tercer orden

El filtro de tercer orden se prefiere sobre el de segundo orden puesto que reduce en gran medida las pérdidas debido a la presencia del capacitor C_2 , el cual incrementa la impedancia del filtro.¹⁴

d) Filtro tipo C

Filtro capaz de reducir múltiples frecuencias armónicas simultáneamente en sistemas eléctricos industriales. Puede atenuar, en estado estable, un gran rango de frecuencias armónicas generadas por convertidores electrónicos, hornos de inducción y cicloconvertidores.¹⁵ Disminuye las pérdidas a la frecuencia fundamental, ya que el capacitor C_2 y el inductor L están sintonizados a dicha frecuencia; sin embargo, éste filtro es más susceptible a las desviaciones en la frecuencia.¹⁶

La configuración de un filtro tipo C es casi idéntica a la del filtro paso altas de segundo orden; la principal diferencia entre ambas configuraciones es que el filtro C tiene un capacitor auxiliar C_2 conectado en serie con el inductor.¹⁷

Éste capacitor es dimensionado con la finalidad de que su reactancia capacitiva anule la reactancia inductiva a la frecuencia fundamental, desviando la resistencia de amortiguamiento. Por ésta razón, las pérdidas asociadas con la resistencia son prácticamente eliminadas, permitiendo que el filtro sea sintonizado a una baja frecuencia.

La respuesta en frecuencia de la impedancia de un filtro tipo C también es similar a la del filtro de segundo orden. A la frecuencia armónica de mayor orden, la reactancia capacitiva es pequeña, mientras que la inductiva es bastante grande. Por ello, la impedancia de la rama formada por el inductor en serie con el capacitor auxiliar es dominada por la reactancia inductiva de L .

En el diseño del filtro, es necesario especificar la máxima corriente armónica permitida para fluir en el sistema a la frecuencia de sintonización y, como se asume que la compensación de potencia reactiva es conocida, se puede determinar el tamaño nominal del capacitor C_1 .

Cuando el filtro opera a frecuencias armónicas menores, la cantidad de corriente que fluye en el sistema es pequeña y el amortiguamiento del filtro es menor. A frecuencias armónicas mayores, la corriente es prácticamente constante y la impedancia total del filtro es dominada por la reactancia capacitiva de C_1 . Por ésta razón, no se puede alcanzar una mayor atenuación a frecuencias altas.¹⁸

Un filtro tipo C puede acoplarse con un filtro sintonizado simple para obtener mayor atenuación a altas frecuencias. La desventaja de éste arreglo es que se presenta una nueva resonancia paralelo asociada con el filtro sintonizado simple. La resonancia paralelo puede ser elegida de manera que no sea excitada por ninguna corriente armónica presente en el sistema.

El filtro de una sintonía regularmente es sintonizado a frecuencias más altas que el filtro tipo C. Si éste tiene una frecuencia de sintonía por debajo del filtro tipo C, el tamaño del capacitor auxiliar será significativamente mayor, haciendo el filtro C impráctico.

4.2.2 Filtros serie

Es un filtro de bloqueo; se conecta en serie con el sistema de potencia. Está formado por un inductor y un capacitor conectados en paralelo, sintonizados para ofrecer una alta impedancia a la frecuencia armónica especificada. A la frecuencia fundamental, el filtro puede ser diseñado para brindar una baja impedancia, permitiendo el flujo de la corriente fundamental con las menores pérdidas y sin alguna impedancia adicional.¹⁹

Los filtros serie son usados para bloquear una sola corriente armónica, lo cual los limita para bloquear múltiples corrientes armónicas. Así, cada armónica que deba ser obstruida requiere su propio filtro. La única desventaja de éste arreglo es que puede crear pérdidas significativas a la frecuencia fundamental.

Son especialmente útiles en circuitos monofásicos donde se presentan con frecuencia armónicas de secuencia cero.

Como otros componentes serie en el sistema de potencia, el filtro debe ser diseñado para soportar la corriente a plena carga; por tanto, debe contar con un esquema de protección de sobrecorriente, generando un incremento en su costo. Por ello, los filtros serie son menos utilizados que los filtros en derivación.

4.2.3 Filtros paso bajas

En aplicaciones tanto de filtros en derivación como de filtros serie, son requeridos múltiples arreglos para bloquear múltiples frecuencias. Por ejemplo, para atenuar una frecuencia de 7^a armónica con un filtro en derivación, típicamente se requieren dos arreglos de filtros, el de 7^a armónica y uno menor, de 5^a armónica. Asimismo, en aplicaciones de filtro serie, cada armónica necesita su propio filtro para poder ser bloqueada.²⁰

Las armónicas que aparecen en el sistema de potencia pueden extenderse sobre un gran rango de frecuencias y no a una sola. En un convertidor de seis pulsos se generan armónicas características de 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, etc. Diseñar un filtro en derivación o serie para eliminar ésta gama de frecuencias sería muy complicado. Por lo tanto, debe plantearse una alternativa para aplicar algún filtro.

Un filtro paso bajas es ideal para solucionar éste problema. En éste tipo de filtro, la corriente con componentes de frecuencia menor que su frecuencia de corte pueden pasar y las que están por encima de ella son filtradas.

En sistemas de distribución, las funciones que desempeña el filtro paso bajas pueden obtenerse instalando un banco de capacitores en el lado de baja tensión de un transformador. El tamaño del banco debe seleccionarse considerando la interacción de éste con la inductancia del transformador y la impedancia del sistema. También es capaz de prevenir armónicas por encima de la frecuencia de corte que penetran en el lado de alta tensión, por lo que la frecuencia de corte puede ser algunas veces completamente baja y el banco de capacitores bastante grande. Esto podría provocar un incremento significativo de tensión; un regulador de tensión o un transformador con cambiador de derivaciones pueden ser usados para reducirlo a un nivel aceptable.

En una subestación con múltiples alimentadores, un reactor de línea o un regulador de tensión pueden instalarse en el principio del alimentador para aislar la porción del sistema sometido a alta tensión. Dicho arreglo permitirá que los niveles de tensión en otros alimentadores se mantengan a valores normales de operación. La frecuencia de corte deseada se obtiene mediante la combinación de la inductancia del transformador, el reactor de línea, el regulador de tensión y el banco de capacitores.²¹

En sistemas eléctricos industriales, estos filtros se utilizan para reducir las armónicas producidas por cargas no lineales. El diseño consta de un reactor instalado en serie con cada una de las fases, utilizado para separar el sistema de AC de la carga no lineal y de un banco de capacitores instalado en paralelo para formar la configuración del filtro. La presencia del banco incrementa la tensión a la entrada del ASD; entonces, se requiere instalar un transformador a la salida del reactor de línea para disminuir la tensión a un nivel aceptable para el banco.²²

La frecuencia de corte del filtro para aplicaciones de ASD es diseñada para frecuencias armónicas bajas, de 100 a 200 [Hz] sobre 60 [Hz] del sistema. Con ésta frecuencia de sintonización, es improbable que el filtro excite alguna resonancia indeseable con el resto del sistema. Generalmente, reduce la distorsión de corriente armónica total del 90 al 100%, en condiciones de carga de entre el 9 y 12%.

La aplicación del filtro ofrece mayores ventajas que un reactor de choque, el cual únicamente reduce la distorsión de corriente entre el 30 y 40%; sin embargo, su costo es mayor.

4.2.4 Limitaciones de los filtros pasivos

Los filtros pasivos son utilizados para limitar la propagación de corriente armónica, mejorar la calidad de la potencia, reducir la distorsión armónica y proporcionar la compensación de potencia reactiva simultáneamente. Éstos pueden ser diseñados para aplicaciones de grandes corrientes y altas tensiones.²³

No obstante, presentan algunas limitaciones resumidas a continuación:²⁴

- Los filtros pasivos no son adaptables a cambios en el sistema y una vez instalados son difícilmente reemplazados. Ni la frecuencia de sintonización ni el tamaño del filtro pueden ser cambiados tan fácilmente.
- Un cambio en el sistema o en las condiciones de operación puede resultar en una desintonización e incremento de la distorsión. Si no hay un equipo de monitoreo, el problema no puede ser detectado.
- El diseño se ve en gran parte afectado por la impedancia del sistema. Para ser efectivo, la impedancia del filtro debe ser menor que la impedancia del sistema y el diseño puede llegar a ser un problema para sistemas robustos porque se requiere un filtro muy grande.
- Frecuentemente, requieren un número de derivaciones en paralelo. La pérdida de energía de una unidad paralela altera totalmente la frecuencia de resonancia y el flujo de la corriente armónica. Esto puede incrementar los niveles de distorsión fuera de los límites permisibles.

- Las pérdidas de energía en los elementos resistivos de filtros pasivos pueden ser considerables para filtros grandes.
- El deterioro y los efectos de la temperatura desintonizan el filtro de una forma fortuita.
- Si los convertidores alimentan corriente de directa al sistema, pueden causar saturación en el reactor del filtro, resultando en un incremento de la distorsión.
- Los neutros aterrizados de un banco conectado en estrella proveen un camino de baja impedancia para las armónicas triples. En algunos casos, puede amplificarse esta armónica.
- Se requieren dispositivos especiales para la protección y el monitoreo del filtro.

4.3 Filtros activos

La complejidad de diseño y el costo tan alto generado por las pérdidas en los filtros pasivos convencionales, además de su incapacidad para eliminar interarmónicas y armónicas no características, ha llevado a la tarea de desarrollar otros medios de compensación armónica.²⁵ Los filtros activos son dispositivos basados en sofisticada electrónica de potencia y son mucho más caros que los filtros pasivos; sin embargo, tienen la gran ventaja de no presentar problemas de resonancia con el sistema.²⁶

La idea es corregir la forma de onda distorsionada a una senoide por la inyección de distorsión armónica al sistema, la cual es igual que la distorsión causada por cargas no lineales, pero de polaridad opuesta.²⁷ Mientras la corriente de carga demandada es distorsionada en el punto de la carga no lineal, la corriente vista por el sistema es mucho más senoidal.²⁸

Las características de compensación de los filtros activos son influenciadas por la impedancia del sistema y de la carga. Es muy parecido a los filtros pasivos; sin embargo, los filtros activos tienen mejor compensación armónica frente a variaciones de impedancia y de frecuencia de corrientes armónicas.

Pueden ser usados en circunstancias donde los filtros pasivos no pueden operar satisfactoriamente debido a la resonancia paralelo. Además, son capaces de absorber más de una armónica a la vez, combatir algún otro problema de calidad de la energía, como el flicker y corregir el factor de potencia.

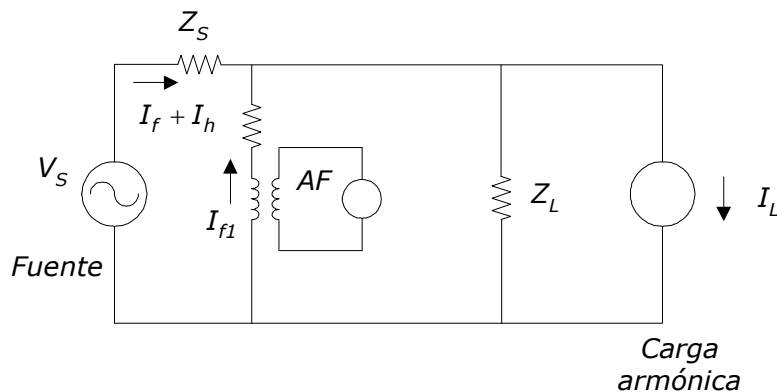
La aplicación de filtros activos está limitada, pese a todas sus ventajas, porque tienen costos iniciales altos y no constituyen una solución efectiva para cargas por encima de 500 [kW].²⁹

De acuerdo a la forma en que están conectados a la red, los filtros activos pueden ser de tipo serie, para prevenir la transferencia de corriente armónica, o de tipo derivación, para reducir el contenido armónico en el sistema.³⁰

4.3.1 Conexión en derivación

En sistemas de potencia débiles, una tensión no senoidal puede ser corregida inyectando corrientes armónicas adecuadas. La fuente de corriente armónica se representa como un circuito equivalente de Norton y es implementada con un alimentador de tensión inversor para inyectar al sistema una corriente armónica de la misma magnitud que la de la carga pero de polaridad opuesta. La corriente de carga será senoidal siempre y cuando la impedancia de la carga sea mayor que la impedancia de la fuente, lo cual indica que no hay flujo de corriente armónica en el sistema.³¹

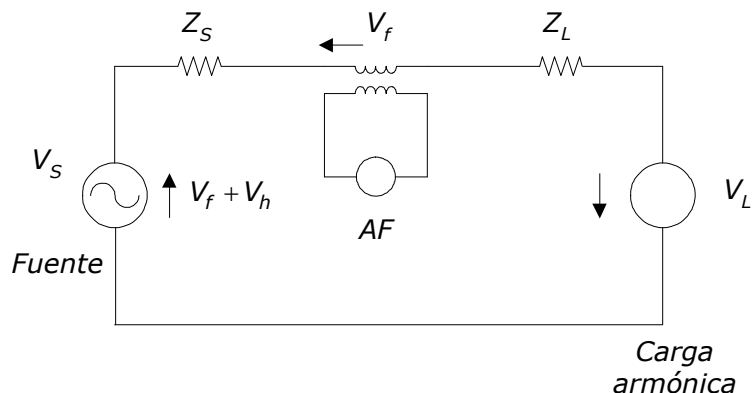
Aunque el filtro activo en derivación tiene varias ventajas sobre los filtros pasivos, su uso en aplicaciones industriales ha sido limitado, ya que el costo de la inversión siempre es mayor que la que se tiene con los filtros pasivos. Recientemente, se ha propuesto la conexión en serie de un filtro activo en derivación con un filtro pasivo lo cual reduce el costo del filtro activo y mejora el funcionamiento del filtro pasivo.³²



Conexión en derivación de un filtro activo (AF)

4.3.2 Conexión en serie

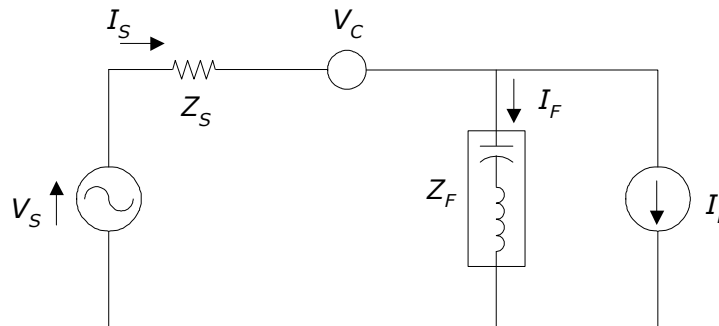
En ésta conexión se inyecta una tensión en serie con la línea para compensar la distorsión de tensión producida por la carga no lineal. Un filtro activo serie es recomendable para la compensación armónica de diodos rectificadores.³³



Conexión serie de un filtro activo (AF)

En algunos casos el filtro activo serie es combinado con algún tipo de filtro pasivo. Así, éste último absorbe las corrientes armónicas generadas por la carga no lineal, mientras que el filtro activo bloquea la transferencia de armónicas en cualquier dirección.³⁴

En el siguiente diagrama, la fuente controlada de tensión V_C no ofrece impedancia al flujo de la componente fundamental, pero introduce una resistencia muy grande entre el sistema y la carga no lineal para las frecuencias armónicas. Idealmente, la corriente armónica es forzada a circular a través del filtro pasivo y la tensión del filtro activo es la suma de la tensión suministrada y de la tensión en el filtro pasivo.³⁵



Circuito monofásico de un filtro activo serie

4.4 Otros técnicas de eliminación de armónicas

4.4.1 Reactores de línea o de choque

Es un método para amortiguar la distorsión armónica generada por controladores de velocidad. Utiliza un pequeño reactor insertado a la entrada de la línea que alimenta al dispositivo.³⁶

La inductancia del reactor retrasa la velocidad a la cual el capacitor, en el bus de DC, puede cargarse y obliga al dispositivo a conducir una corriente por un largo período de tiempo. Por lo cual, se produce una corriente inferior, con mucho menos contenido armónico, mientras se entrega la misma cantidad de energía.³⁷

El efecto de retrasar la velocidad de carga del capacitor hace que el choque sea muy efectivo para bloquear algunos transitorios de altas frecuencias. Esto ayuda a reducir los disparos indeseables del controlador durante la energización del capacitor.³⁸

Los transformadores de aislamiento pueden ofrecer los mismos beneficios que el reactor de choque, pero pueden ser más costosos. Sin embargo, los transformadores con múltiples controladores tienen la ventaja de crear una operación efectiva de doce pulsos.

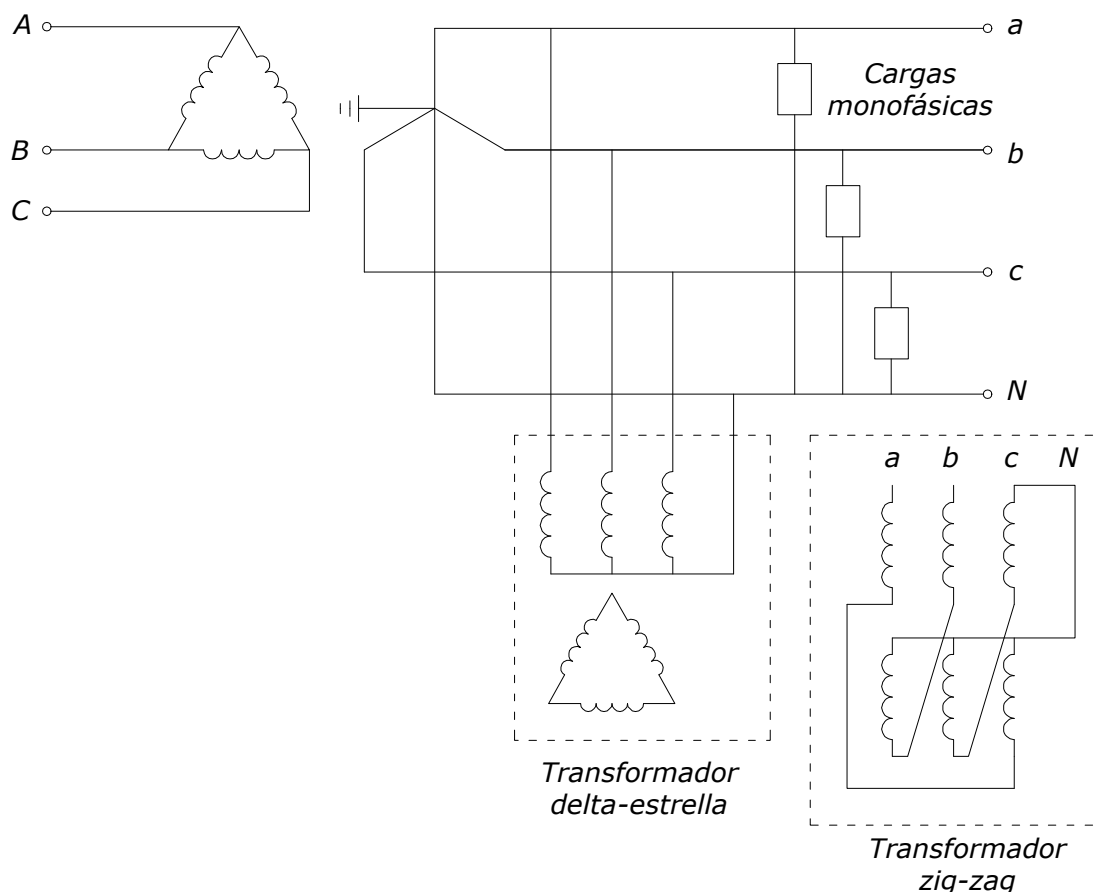
La configuración de doce pulsos es utilizada como un método para controlar armónicas. Por ejemplo, aplicada a dos dispositivos de velocidad variable, uno conectado a través de un transformador en delta-estrella y otro por medio de un transformador en delta-delta; se obtiene una forma de onda, inyectada al sistema, con menor distorsión, principalmente porque la 5^a y 7^a armónica son atenuadas. En controladores de seis pulsos, estas dos armónicas son las responsables de la mayor parte de la distorsión.³⁹

4.4.2 Transformadores zig-zag

Los transformadores zig-zag y transformadores delta-estrella actúan como un filtro para corriente de secuencia cero cuando son conectados en el neutro de un sistema trifásico de cuatro hilos, puesto que ofrecen un camino de baja impedancia en éste conductor. Para que sean efectivos, deben colocarse cerca de la carga del circuito que se desea proteger.⁴⁰

La impedancia de secuencia cero del núcleo de un transformador delta-estrella es baja. El devanado delta conduce la corriente de secuencia cero para balancear los amperes vuelta en el primario. En un sistema desbalanceado, las componentes de secuencia positiva y negativa también están presentes, pero éstas no son suprimidas.⁴¹

En un transformador zig-zag, todos los devanados tienen el mismo número de vueltas, pero cada par de devanados en una pierna está enrollado en dirección opuesta. Tiene una impedancia de secuencia cero baja y trabaja de la misma forma que un transformador delta-estrella.



Transformador delta-estrella o zig-zag usado en un sistema trifásico para filtrar armónicas de secuencia cero

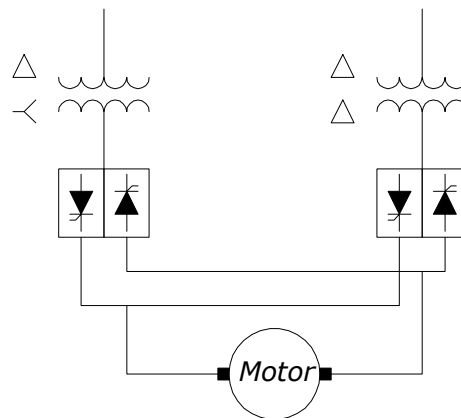
En la figura se muestra un sistema trifásico de cuatro hilos, con neutro sólidamente aterrizado que suministra potencia a cargas monofásicas. Las corrientes en el neutro tienen dos caminos, ambos de baja impedancia, a través del transformador delta-estrella o del transformador zig-zag, así como el neutro aterrizado. El incremento de tensión en el neutro será mucho menor, aunque no será completamente estable.

Los transformadores zig-zag son aplicados a usuarios industriales y comerciales con el fin de reducir el flujo de armónicas de secuencia cero a la red del sistema de potencia. En instalaciones de tipo comercial, los problemas de sobrecarga del neutro y calentamiento del transformador, producto de la distorsión armónica generada por las cargas no lineales, pueden resolverse colocando transformadores zig-zag. Además, pueden derivar alrededor del 50% de la corriente de tercera armónica fuera del neutro del circuito principal y reducir el flujo de otras corrientes armónicas de secuencia cero a niveles aceptables.⁴²

4.4.3 Multiplicación de fases

Tradicionalmente, la conexión delta del transformador y prácticas de aterrizamiento han mitigado los efectos de las corrientes de secuencia cero; sin embargo, dichas prácticas no tienen efecto sobre las armónicas impares generadas por los convertidores de 6 pulsos. En éste caso se emplea una técnica conocida como multiplicación de fases para reducir la generación de armónicas.

En un transformador conectado en delta-estrella, existe un defasamiento de 30° entre la tensión del primario y la del secundario, mientras que en la conexión delta-delta o estrella-estrella las tensiones están en fase. Si la carga es dividida y se alimenta con dos transformadores, uno conectado en delta-delta y otro en delta-estrella, las armónicas de 5^a , 7^a , 17^a , 19^a , etc., son eliminadas, ya que las dos corrientes de carga fundamental están defasadas 30° y las armónicas presentes en ellas tienen igual magnitud pero signo contrario, cancelándose en la corriente de carga total.⁴³



Convertidor de 12 pulsos

Los dos puentes de 6 pulsos forman uno de 12 pulsos y su espectro armónico queda definido como:

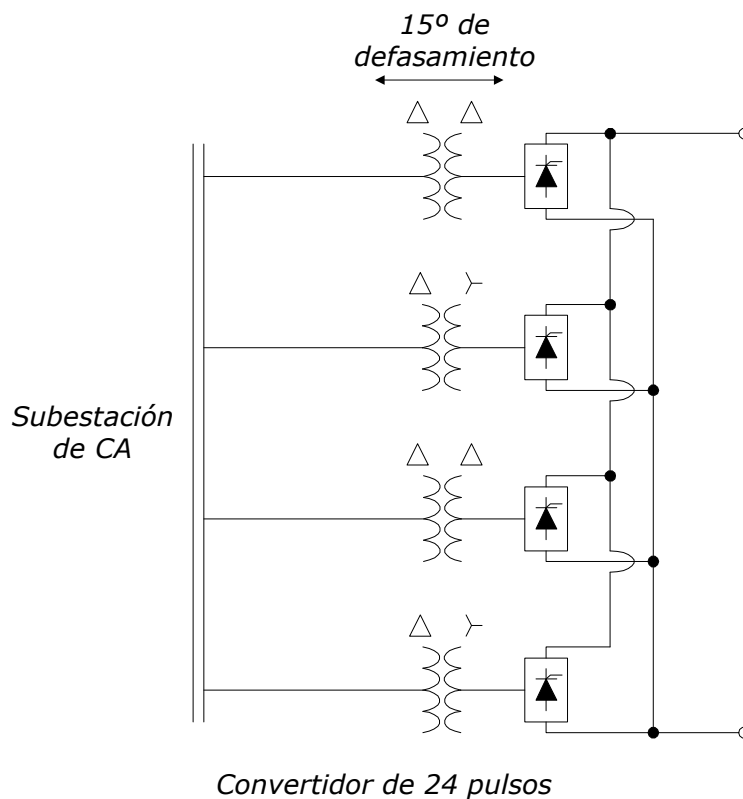
$$h = kq \pm 1$$

Donde:

- h – Orden armónico
- k – Enteros 1, 2, 3
- q – Número de pulsos del puente

Así, debemos esperar ver la 11^a y 13^a armónicas, haciendo que las otras armónicas se cancelen. Éste arreglo de 12 pulsos es muy utilizado en instalaciones industriales de gran capacidad y en convertidores de potencia de los sistemas de transmisión de corriente directa.

Éste principio puede ser extendido a 24 pulsos, utilizando 4 puentes de 6 pulsos con conexión de transformadores que tienen 15° de defasamiento entre ellos, como se muestra en la figura. La corriente total será casi senoidal con la 23^a y 25^a armónicas dominantes.



La cancelación de armónicas al 100% rara vez ocurre. Los transformadores deberían tener exactamente la misma relación de transformación y la misma impedancia, las cargas deberían ser divididas igualmente y los convertidores tendrían que presentar el mismo desplazamiento de ángulo. En la práctica, aproximadamente el 75% de la distorsión armónica se cancela por éste medio y el 25% restante es modelado para filtrarse de otra forma.⁴⁴

4.4.4 Sobredimensionamiento del neutro

Cuando las armónicas de secuencia cero se agregan directamente al conductor neutro de un sistema trifásico de cuatro hilos, se produce una corriente en el neutro mayor que la corriente de fase, aunque la carga en los conductores de fase esté equilibrada. Dicha corriente puede ser 130% la corriente total medida en cada una de las fases.⁴⁵

El problema en éste caso es el sobrecalentamiento del conductor, porque no hay interruptores que limiten la corriente que fluye a través de él. Las corrientes excesivas en el conductor pueden causar caídas de tensión, de neutro a tierra, más altas de lo normal.

Asimismo, las barras colectoras del neutro son dimensionadas para llevar el valor de la corriente nominal, pero se pueden sobrecargar cuando armónicas de frecuencias triples se agregan a los conductores neutros.

Considerando éstos problemas, el conductor puesto a tierra debe especificarse de calibres superiores a los ya dimensionados. En algunos casos, se selecciona del doble de ampacidad comparada con los conductores de fase y se toma como un conductor activo para efectos de cálculo.⁴⁶

Una instalación tres fases cuatro conductores de un sistema conectado en estrella, utilizada para suministrar energía eléctrica a cargas no lineales, puede requerir que el sistema esté diseñado para permitir altas corrientes armónicas en el neutro.⁴⁷

4.5 Referencias

- ¹ MATA, Jesús G. y Esparza, Salvador G. *“Las cargas no lineales, su repercusión en las instalaciones eléctricas y sus soluciones”*. Aguascalientes, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, p. 5
- ² Dugan, op. cit., p. 252
- ³ Idem
- ⁴ DAS, J. C. *“Power System Analysis: Short circuit load flow and harmonics”*. USA, Marcel Dekker Inc, 2002, p. 686
- ⁵ Ibidem, pp. 687-688 y ARRILLAGA, J. y Watson, Neville R. *“Power System Harmonics”*. 2da. Ed., Gran Bretaña, John Wiley & Sons Ltd, 2003, p. 233
- ⁶ Arrillaga, op. cit., p. 234
- ⁷ Ibidem, pp. 234-235
- ⁸ Ibidem, p. 235
- ⁹ Ibidem, pp. 235-236
- ¹⁰ Ibidem, p. 236 y Das, op. cit., pp. 689-690
- ¹¹ Idem
- ¹² ARISTIZABAL, Marcelo N. *“Análisis de Armónicos en Sistemas Eléctricos”*. Schientia et Technica, No. 21, Julio 2003, p. 22
- ¹³ Das, op. cit., pp. 691-692
- ¹⁴ Ibidem, p. 690 y Arrillaga, op. cit., p. 236
- ¹⁵ Dugan, op. cit., p. 260
- ¹⁶ Arrillaga, op. cit., p. 236
- ¹⁷ Dugan, op. cit., p. 260
- ¹⁸ Ibidem, p. 262
- ¹⁹ Ibidem, p. 256
- ²⁰ Ibidem, p. 257
- ²¹ Ibidem, pp. 257-258
- ²² Ibidem, pp. 258-260
- ²³ Das, op. cit., p. 696
- ²⁴ Ibidem, pp. 697-698
- ²⁵ Arrillaga, op. cit., pp. 255-256
- ²⁶ Dugan, op. cit., p. 262
- ²⁷ Ibidem, p. 264 y Das, op. cit., p. 698
- ²⁸ Dugan, op. cit., p. 264
- ²⁹ Das, op. cit., p. 700
- ³⁰ Ibidem, p. 698 y Arrillaga, op. cit., p. 256
- ³¹ Das, op. cit., p. 698
- ³² Arrillaga, op. cit., p. 258
- ³³ Das, op. cit., p. 699
- ³⁴ Arrillaga, op. cit., p. 256
- ³⁵ Idem
- ³⁶ Dugan, op. cit., p. 248
- ³⁷ Ibidem, p. 249
- ³⁸ Ibidem, p. 250
- ³⁹ Ibidem, pp. 250-251
- ⁴⁰ Ibidem, p. 251
- ⁴¹ Das, op. cit., pp. 694-695
- ⁴² Dugan, op. cit., pp. 251-252
- ⁴³ Das, op. cit., p. 577
- ⁴⁴ Idem
- ⁴⁵ PROCOBRE MÉXICO, *“Calidad de la Energía”* (Video)
- ⁴⁶ Mata, op. cit., p. 6
- ⁴⁷ MÉXICO, Secretaría de Energía, *“NOM-001-SEDE-2005, Instalaciones Eléctricas (utilización)”*. Segunda sección, p. 33