



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

“CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA:

CUEVAS BRAVO DAVID

DIRECTOR DE TESIS: ING. FRANCISCO CUEVAS ARTEAGA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D. F., 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Introducción

Desde el descubrimiento de la electricidad, 400 años atrás aproximadamente, la generación, distribución y uso de la electricidad ha estado involucrada en problemas de calidad de la energía. En un principio, las máquinas eléctricas y los dispositivos eran muy robustos pero muy útiles; consumían gran cantidad de energía eléctrica y funcionaban perfectamente bien. Probablemente eran susceptibles a algún problema de calidad de la energía existente en ese tiempo, pero los efectos no eran lo suficientemente claros, debido en parte a la robustez de las máquinas y a la falta de medios para medir los parámetros de la calidad de la energía.¹

A finales de los 50's, la era industrial demandó productos económicamente competitivos, lo cual significó que las máquinas eléctricas llegaran a ser más pequeñas y más eficientes y que fueran diseñadas sin márgenes de funcionamiento. Al mismo tiempo, la demanda de energía por parte del sector industrial y residencial, condujo a incrementar la generación y distribución de energía. Esto llevó a las empresas suministradoras a formar una gran red de distribución y no operar de forma independiente como lo venían haciendo.²

En los últimos años, tanto las empresas suministradoras de energía eléctrica como los usuarios finales han incrementado su interés por la calidad de la energía eléctrica. El término calidad de la energía se convirtió en un concepto general en la década de los 80's y comprende distintos tipos de disturbios que pueden presentarse en un sistema eléctrico.³

Las principales razones por las cuales se ha incrementado la preocupación en su estudio son:

- El incremento de cargas con controles basados en microprocesadores y dispositivos de electrónica de potencia, los cuales son más sensibles a variaciones en la calidad de la energía que el equipo usado en el pasado.⁴
- La demanda de mayor eficiencia en los sistemas eléctricos ha llevado a la aplicación de dispositivos de alta eficiencia como controladores de velocidad en motores eléctricos y capacitores en derivación para corregir el factor de potencia y reducir las pérdidas.⁵
- Un mayor conocimiento por parte de los usuarios finales acerca de problemas en la calidad de la energía, tales como interrupciones, depresiones de tensión y transitorios.⁶
- El uso de sistemas interconectados, lo cual significa que una falla en algún componente de la red tiene consecuencias mayores.⁷

Calidad de la energía es un término con diferente significado para diferentes personas.⁸ Por ejemplo, desde el punto de vista de una empresa suministradora, un problema de calidad de la energía puede ser percibido como el incumplimiento con varios estándares, como la tensión RMS o los niveles de distorsión armónica. Para un usuario, un problema de calidad de la energía puede ser definido como cualquier condición en el suministro de energía que cause mal funcionamiento en el equipo.⁹

En general, la calidad de la energía es definida como la ausencia de problemas manifestados en tensión, corriente y frecuencia que pueden conducir a una falla o salida de operación en el equipo de los usuarios finales.¹⁰ Una buena calidad de la energía es una perfecta senoide con frecuencia y amplitud constante.¹¹

La calidad de la energía es difícil de cuantificar.¹² Ésta dificultad es explicada por la naturaleza de la interacción entre la calidad de la energía y la susceptibilidad del equipo. Es decir, dos equipos idénticos pueden funcionar de forma distinta para el mismo parámetro de calidad de la energía debido a las diferencias en su manufactura o la tolerancia de sus componentes.¹³

Los distintos disturbios que involucra la calidad de la energía son: interrupciones, sags, swells, transitorios, ruido, flicker, variaciones en la frecuencia y la distorsión armónica.¹⁴

Las armónicas causan distorsión en la forma de onda de tensión y corriente, lo cual tiene efectos perjudiciales en el equipo. La estimación de armónicas de cargas no lineales es el primer paso en un análisis armónico y éste puede ser no seguro, ya que existe una interacción entre el equipo que genera las armónicas y el sistema eléctrico.¹⁵

El problema de las armónicas no es un fenómeno nuevo en los sistemas eléctricos, es tan viejo como el sistema eléctrico mismo;¹⁶ ya que ha existido desde el comienzo de la utilización de la corriente alterna. Sin embargo, es recientemente que su trato ha llegado a ser un problema para un pequeño segmento de la industria eléctrica. La razón es que la mayoría de las cargas en el sistema eléctrico de potencia eran lineales. Por ejemplo, las lámparas incandescentes y los motores de inducción, demandan corrientes senoidales cuando es aplicada una tensión senoidal. Con la introducción de dispositivos semiconductores, para incrementar la eficiencia y control de la energía, las condiciones cambiaron. La utilización de cargas no-lineales tiene ventajas muy importantes para el control de los procesos y potencia aunque demandan corrientes distorsionadas con alto contenido de corrientes armónicas.¹⁷

Hasta los años 60's, las principales fuentes de armónicas en el sistema eléctrico eran los hornos de arco y algunas cargas que incluían convertidores.¹⁸ Además, había muchos capacitores conectados en derivación usados para la compensación de potencia reactiva de un gran número de sistemas de potencia a nivel industrial, conectados sin el conocimiento de los problemas de resonancia armónica que generaban. A finales de los 60's, las aplicaciones de tracción ya usaban tiristores y diodos; sin embargo, fue hasta la siguiente década que cobró auge con el desarrollo de componentes electrónicos de potencia más rápidos, baratos y confiables.¹⁹

En los 70's, con el uso de tiristores y compensadores estáticos de potencia, muchos dispositivos variadores de velocidad fueron introducidos en todas las industrias, provocando el flujo de corrientes armónicas de los convertidores al sistema de AC.²⁰

El desarrollo de los transistores bipolares de potencia Darlington a inicios de los 80's, junto con el desarrollo del tiristor GTO y el transistor IGBT, convirtieron a la electrónica de potencia en la inseparable compañía de los sistemas eléctricos de potencia.²¹

Paradójicamente, la electrónica de potencia, principal causa de problemas armónicos, está siendo usada hoy en día efectivamente para incrementar la confiabilidad en el suministro de energía y para entregar formas de onda de corriente y tensión senoidales a

los usuarios finales. Es decir, se está usando para mejorar la calidad de la energía, de la cual las armónicas son uno de sus mayores preocupaciones.²²

Se estima que para el año 2010, 50% de la energía producida será modificada por semiconductores, especialmente tecnologías basadas en silicio, para modificar su característica senoidal y mejorar la eficiencia de su uso. Sin embargo, cuando esto ocurra, la corriente resultante demandada al sistema de potencia será no senoidal.²³

Actualmente, en los sistemas de distribución, los convertidores de AC-DC, convertidores moduladores del ancho de pulso, cicloconvertidores, hornos de arco, compensadores estáticos de vars y el switcheo en el suministro de energía son cargas no lineales típicas que producen armónicas.²⁴ Asimismo, el uso de lámparas fluorescentes para el ahorro de energía y computadoras personales ha provocado la proliferación de corrientes armónicas en edificios comerciales.²⁵

Una vez que las fuentes de armónicas son identificadas, éstas deben interpretarse en términos de sus efectos en el resto del sistema y equipo externo al mismo. Cada elemento del sistema debe ser examinado por su sensibilidad a las armónicas como una base para establecer recomendaciones que permitan ubicarse dentro de los niveles permisibles de distorsión armónica.²⁶ Los efectos de las armónicas pueden dividirse en tres categorías, los ocasionados al sistema de potencia, efectos en las cargas y por último, los efectos en los circuitos de comunicación.²⁷

La resonancia serie y paralelo, reducción en la eficiencia de la generación, transmisión y utilización de la energía y disminución de la vida útil de los componentes de las plantas son los principales efectos de las armónicas dentro del sistema de potencia.²⁸

Las cargas que con frecuencia se ven afectadas por las armónicas son motores, generadores, transformadores, cables de potencia, bancos de capacitores, reactores, equipo de medición y relevadores de protección.²⁹

Cuando se planea la instalación de una planta con componentes no lineales, se hace considerando la opción de diseñar los dispositivos no lineales para bajos niveles de distorsión en la forma de onda o instalando un equipo de compensación armónica en las terminales. La primera opción puede llevarse a cabo por medio del cambio de fase de transformadores o el control de puentes convertidores. La compensación armónica externa es realizada por medio de filtros. En cualquier caso, la decisión dependerá de factores como la potencia y el rango de tensión del equipo que será instalado y del efecto de la distorsión en la forma de onda en el resto de la planta.³⁰

Además de diseñar el equipo de tal forma que soporte el efecto de las armónicas, existen otras técnicas para su mitigación. Filtros pasivos, filtros activos y tecnologías alternativas pueden utilizarse para minimizar o, mejor dicho, controlar el flujo de corrientes armónicas de cargas no lineales a los sistemas eléctricos.³¹

Los filtros pasivos en lugares adecuados, de preferencia cercanos a la fuente de generación armónica, son instalados para que las corrientes armónicas sean atrapadas en la fuente, de manera que la propagación de corrientes en el sistema sea reducida.³² Existen diferentes configuraciones de filtros pasivos conectados en derivación, reactores con bancos de capacitores trifásicos conectados en delta, estrella flotante y aterrizada, con una y doble sintonía.³³

Los filtros activos son equipos que inyectan distorsión armónica al sistema, de igual magnitud que la distorsión causada por la carga no lineal pero de polaridad opuesta, así la forma de onda es corregida a una senoide.³⁴ De acuerdo a la forma en que están conectados a la red, pueden clasificarse en filtros tipo serie y filtros activos en derivación.³⁵

Otras técnicas aplicadas para limitar las armónicas son la multiplicación de fases, aplicación de reactores de línea o choque y transformadores con conexión zig-zag y sobredimensionamiento del neutro para armónicas de secuencia cero.³⁶

Además de los filtros y técnicas aplicadas para reducir la distorsión armónica, existen métodos para corregir otros problemas de calidad de la energía. Las fuentes ininterrumpibles de energía (UPS), por ejemplo, se aplican para variaciones de tensión, interrupciones y variaciones en la frecuencia. Los dispositivos de energía almacenada también son aplicables para variaciones de tensión e interrupciones.³⁷ Otros sistemas utilizados para el mismo fin son los interruptores de estado sólido, restauradores dinámicos de voltaje (DVR) y compensadores estáticos de distribución (DSTATCOM), entre otros.

Referencias

- ¹ SANKARAN, C. *"Power Quality"*. USA, CRC Press, 2002, pp. 1-2
- ² Sankaran, op. cit., p. 2
- ³ DUGAN, Roger C. (et al). *"Electrical Power Systems Quality"*. 2da. Ed., USA, Mc Graw Hill, 1996, p. 1
- ⁴ Idem
- ⁵ Idem
- ⁶ Idem
- ⁷ Idem
- ⁸ Sankaran, op. cit., p. 1 y BROWN, Richard E. *"Electric Power distribution Reliability"*. USA, Marcel Dekker Inc, 2002, p. 39.
- ⁹ Brown, op. cit., p. 39
- ¹⁰ Dugan, op. cit., p. 3
- ¹¹ Brown, op. cit., p. 40
- ¹² Dugan, op. cit., p. 5
- ¹³ Sankaran, op. cit., p. 2
- ¹⁴ Ibidem, p. 41
- ¹⁵ DAS, J. C. *"Power System Analysis: Short circuit load flow and harmonics"*. USA, Marcel Dekker Inc, 2002, p. 554
- ¹⁶ ACHA, Enrique y MADRIGAL, Manuel. *"Power Systems Harmonics"*. Gran Bretaña, John Wiley & Sons Ltd, 2001, p. 3 y Dugan, op. cit., p. 168
- ¹⁷ IEEE Std 141-1993, *"Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants"*, p. 443
- ¹⁸ NATARAJAN, Ramasamy. *"Power System Capacitors"*. USA, Taylor & Francis Group, 2005, p. 389
- ¹⁹ Acha, op. cit., p. 4
- ²⁰ Natarajan, op. cit., p. 389
- ²¹ Acha, op. cit., p. 4
- ²² Idem
- ²³ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 443
- ²⁴ Natarajan, op. cit., p. 390
- ²⁵ Sankaran, op. cit., p. 84
- ²⁶ ARRILLAGA, J. y WATSON, Neville R. *"Power System Harmonics"*. 2da. Ed., Gran Bretaña, John Wiley & Sons Ltd, 2003, p. 143
- ²⁷ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 458
- ²⁸ Arrillaga, op. cit., p. 143

²⁹ IEEE Std 141-1993, op. cit., pp. 459-464

³⁰ Arrillaga, op. cit., p 219

³¹ Das, op. cit., p. 664 y IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 467

³² Das, op. cit., p. 664

³³ Ibidem, pp. 689-694; Arrillaga, op. cit., pp. 219-237 y Dugan, op. cit., pp. 252-262

³⁴ Das, op. cit., pp. 664, 698

³⁵ Das, op. cit., pp. 698-700 y Arrillaga, op. cit., pp. 255-258

³⁶ Das, op. cit., pp. 694-696, 706-708 y Dugan, op. cit., pp. 248-252

³⁷ ALSTOM, "*Protective Relay Application Guide*". 1987, pp. 417-419

Índice

Agradecimientos	ii
Introducción	iv
1. Sistema Eléctrico de Potencia	1
1.1. Cargas en un Sistema Eléctrico de Potencia	2
1.2. Topología de un Sistema Eléctrico	2
1.3. Subestaciones eléctricas	3
1.3.1. Arreglos de barras	3
1.3.2. Equipo de una subestación	11
1.4. Referencias	18
2. Calidad de la energía	19
2.1. La importancia de la calidad de la energía	19
2.2. ¿Qué es la calidad de la energía?	19
2.3. Tipos de disturbios en los Sistemas Eléctricos de Potencia	19
2.3.1. Transitorios	19
2.3.2. Variaciones de tensión de larga duración	21
2.3.3. Variaciones de tensión de corta duración	23
2.3.4. Desbalance de tensión	25
2.3.5. Distorsión en la forma de onda	25
2.3.6. Fluctuaciones de tensión (Flicker)	28
2.3.7. Variaciones en la frecuencia	29
2.4. Curva CBEMA	30
2.5. Referencias	31
3. Armónicas	32
3.1. Introducción a las armónicas	32
3.2. Definición de armónica	32
3.3. Distorsión armónica	34
3.3.1. Descomposición de una onda distorsionada en sus armónicas	34
3.4. Componentes simétricas y secuencia armónica	35
3.5. Distorsión Armónica Total	36
3.6. Fuentes de armónicas	37
3.6.1. Fuentes tradicionales de armónicas	37
3.6.2. Nuevas fuentes de armónicas	50

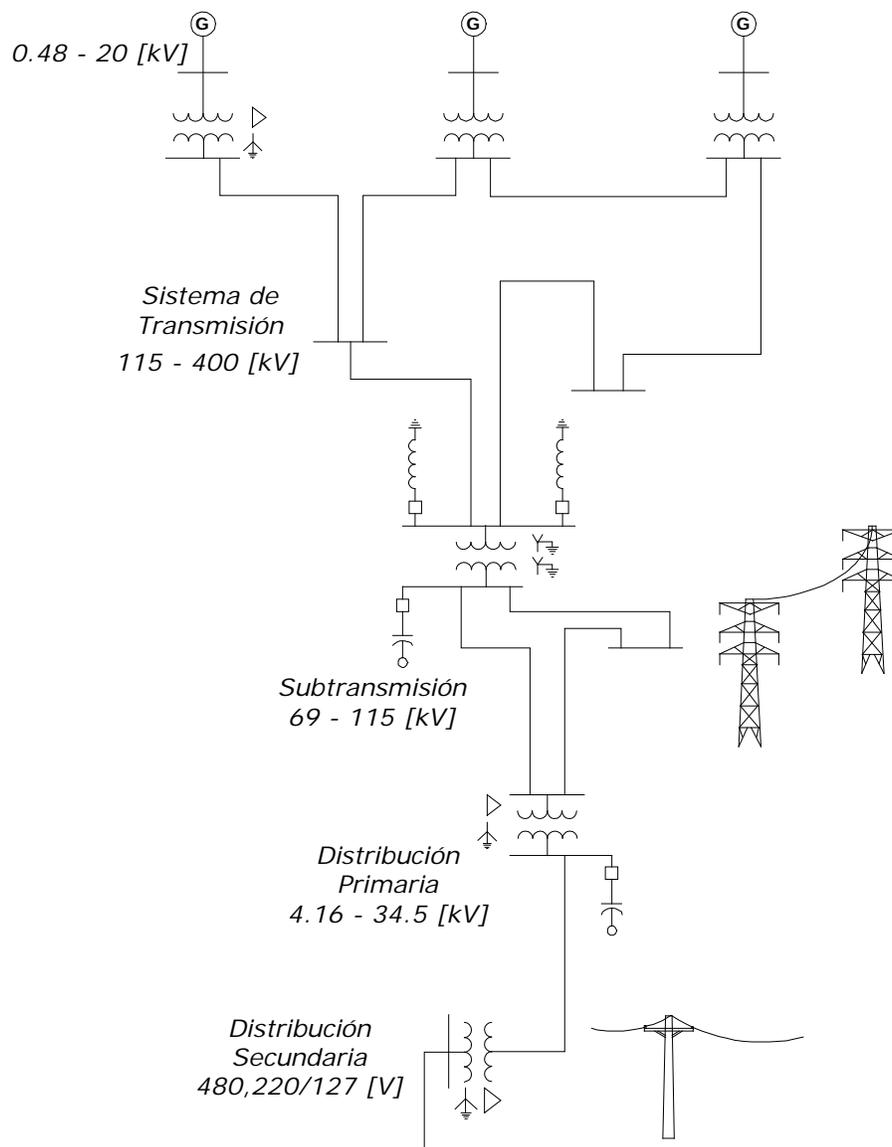
3.7. Características de la respuesta del sistema	51
3.7.1. Impedancia del sistema	51
3.7.2. Impedancia capacitiva	52
3.7.3. Resonancia paralelo	52
3.7.4. Resonancia serie	54
3.8. Normatividad sobre el problema de armónicas	54
3.8.1. Norma IEEE Std. 519-1992	54
3.8.2. Especificación CFE L0000-45-2005	55
3.9. Efectos de las armónicas	55
3.9.1. Efectos en el sistema de potencia	56
3.9.2. Efectos en las cargas	56
3.9.3. Efectos en los circuitos de comunicaciones	58
3.10. Referencias	59
4. Compensación de potencia reactiva por medio de filtros de armónicas	61
4.1. Introducción	61
4.2. Filtros pasivos	65
4.2.1. Filtros en derivación	66
4.2.2. Filtros serie	70
4.2.3. Filtros paso bajas	70
4.2.4. Limitaciones de los filtros pasivos	71
4.3. Filtros activos	72
4.3.1. Conexión en derivación	73
4.3.2. Conexión en serie	73
4.4. Otras técnicas de eliminación de armónicas	74
4.4.1. Reactores de línea o de choque	74
4.4.2. Transformadores zig-zag	75
4.4.3. Multiplicación de fases	76
4.4.4. Sobredimensionamiento del neutro	78
4.5. Referencias	79
5. Análisis para el diseño de un filtro pasivo de armónicas	80
5.1. Consideraciones para el diseño del filtro de armónicas	80
5.1.1. Estudio de la interacción entre el sistema y las cargas no lineales	81
5.1.2. Potencia reactiva capacitiva del filtro	82
5.1.3. Límites permisibles de corrientes y tensiones armónicas	83

5.1.4.	Condiciones normales de operación del sistema	83
5.1.5.	Condiciones normales de operación del filtro	84
5.1.6.	Condiciones de contingencia del sistema	84
5.1.7.	Condiciones de contingencia del filtro	84
5.1.8.	Ubicación del filtro	84
5.1.9.	Configuración del filtro	84
5.2.	Filtros de armónicas para sistemas de media y alta tensión	85
5.2.1.	Consideraciones de sobrecarga armónica	85
5.2.2.	Especificación de los principales componentes	85
5.2.3.	Control de switcheo para el filtro de armónicas	95
5.2.4.	Protección	96
5.2.5.	Diseño del filtro de armónicas	97
5.3.	Referencias	100
6.	Dimensionamiento y especificación del filtro de corriente armónica de 5º orden en la industria mittal	101
6.1.	Dimensionamiento del filtro de 5ª armónica de 1.5 [MVAR] en 4.16 [kV], 45 MVA _{CC} , 6.245 KA _{CC} de la industria mittal	101
6.1.1.	Componentes del filtro	101
6.1.2.	Especificación de la unidad capacitadora utilizando el concepto de gradiente de potencial	103
6.1.3.	Reactor del filtro para la 5ª armónica	104
6.1.4.	Calidad del filtro	106
6.1.5.	Protecciones del filtro	106
6.1.6.	Análisis armónico para la corriente de 5º orden	110
6.1.7.	Resonancia serie-paralelo del filtro con el sistema de potencia	113
6.1.8.	Aplicación de la especificación CFE L0000-45-2005	113
6.1.9.	Diagrama unifilar de la industria Mittal	114
	Conclusiones	124
	Anexo A. Tablas para el dimensionamiento de bancos de capacitores y filtros	125
	Anexo B. Norma CFE – L000045	127
	Anexo C. Curvas de operación característica de fusibles	128

Sistema Eléctrico de Potencia

El sistema eléctrico de potencia es un conjunto de elementos que tiene como fin generar, transformar, transmitir, distribuir y consumir la energía eléctrica de tal forma que se logre la mayor calidad al menor costo posible.

Un sistema eléctrico de potencia consta de plantas generadoras que producen la energía eléctrica consumida por las cargas, una red de transmisión y de distribución para transportar esa energía de las plantas a los puntos de consumo, así como el equipo adicional necesario para lograr que el suministro de energía se realice con las características de continuidad de servicio, regulación de tensión y control de frecuencia requeridas.¹



Sistema Eléctrico de Potencia

1.1 Cargas en un Sistema Eléctrico de Potencia

La carga de un sistema está constituida por un conjunto de cargas individuales de diferentes tipos, industrial, comercial y residencial.

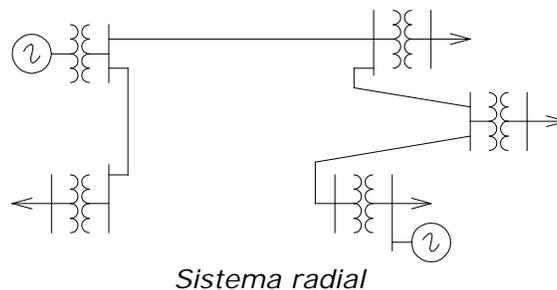
En general, una carga absorbe potencia real y potencia reactiva; es el caso de las cargas con dispositivos de estado sólido, por ejemplo. Las cargas puramente resistivas absorben únicamente potencia real.² De aquí que las cargas de un sistema eléctrico también se clasifiquen en lineales y no lineales.

1.2 Topología de un Sistema Eléctrico

Un sistema eléctrico dependiendo de su confiabilidad se puede clasificar en tres tipos:³

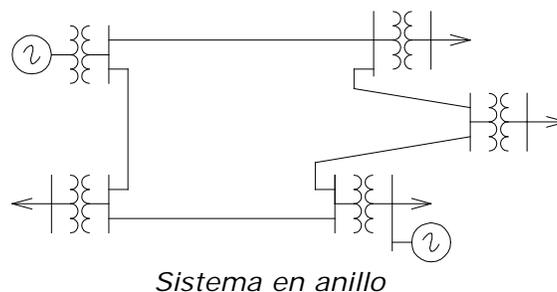
Sistema radial (menos confiabilidad y más económico)

En un sistema radial las cargas tienen una sola alimentación, de manera que una falla en la alimentación produce una interrupción en el suministro.



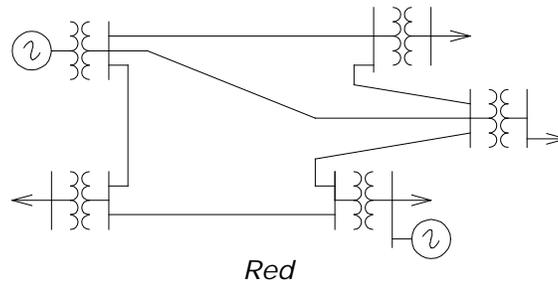
Sistema en anillo (mayor confiabilidad y más caro)

Con un sistema en anillo se tiene una doble alimentación y puede interrumpirse una de ellas sin causar una interrupción del suministro.



Red (mayor confiabilidad y costo)

Con éste tipo de sistema se aumenta el número de interconexiones y en consecuencia, la seguridad del servicio.



1.3 Subestaciones eléctricas

Es un conjunto de dispositivos eléctricos que forman parte de un sistema eléctrico de potencia y se encarga de transformar tensiones y derivar circuitos de potencia.⁴

Las subestaciones pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de función que desarrollan en:⁵

- a) Subestaciones variadoras de tensión
- b) Subestaciones de maniobra o seccionadoras de circuito
- c) Subestaciones mixtas

Asimismo, pueden agruparse de acuerdo con la potencia y tensión que operan en:⁶

- a) Subestaciones de transmisión. Operan en intervalos de tensión desde 230 [kV], 400 [kV] y mayores.
- b) Subestaciones de subtransmisión. Operan en intervalos de tensión desde 69 [kV] hasta 161 [kV].
- c) Subestaciones de distribución primaria. Operan desde 4.16 [kV] hasta 34.5 [kV].
- d) Subestaciones de distribución secundaria. Operan desde 220/127 V hasta 480 [V].

1.3.1 Arreglos de barras

El arreglo de barras de una subestación es la configuración ordenada de los elementos que lo conforman.⁷

La elección del arreglo de una subestación depende de las características de cada sistema eléctrico y de la función que realiza dicha subestación en el sistema.

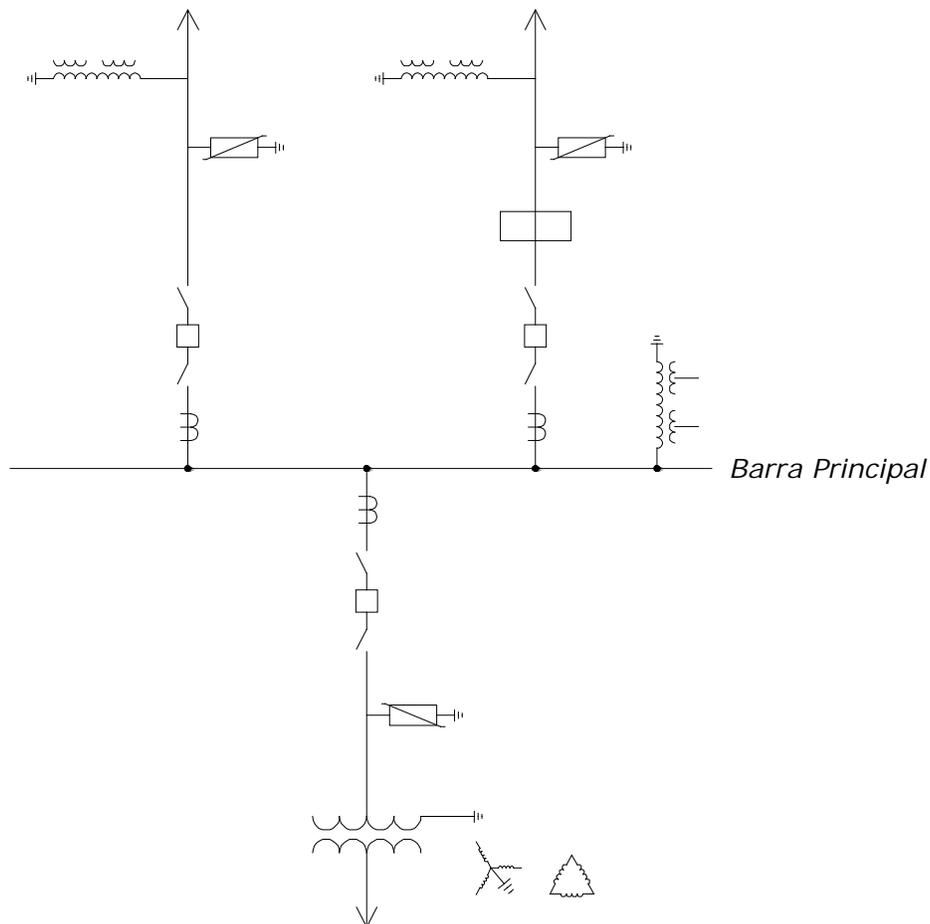
Los criterios utilizados en la selección del arreglo de barras más adecuado de una instalación son la continuidad de servicio, flexibilidad de operación, cantidad y costo del equipo eléctrico y facilidad de mantenimiento de los equipos.⁸

Los arreglos más utilizados en el sistema eléctrico se describen a continuación.

Barra sencilla (menos confiabilidad y mas económica)

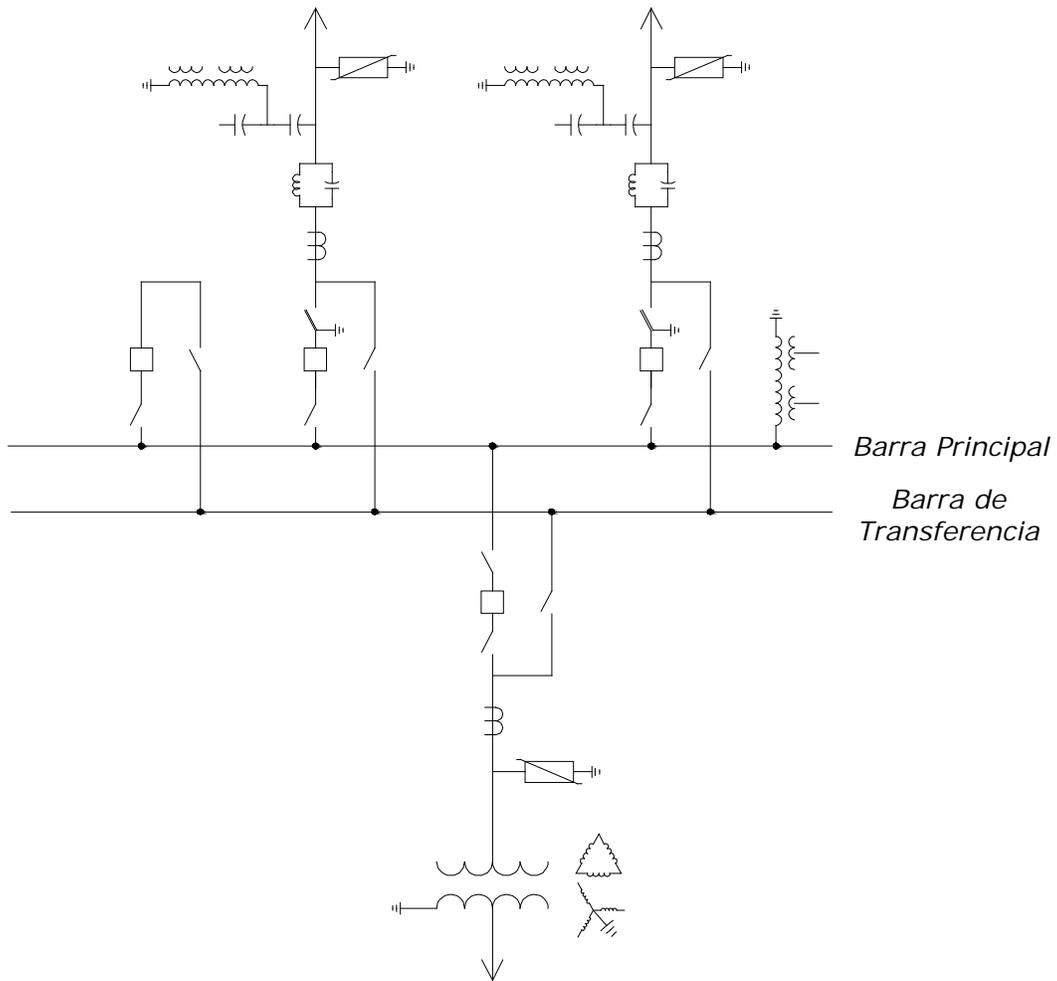
Es el arreglo más simple desde el punto de vista constructivo, considerando la cantidad de equipo y el área que ocupa, también resulta ser el más económico. No obstante, la confiabilidad de servicio es poca, ya que una falla en la barra principal provoca la salida de operación de la misma.⁹

Asimismo, el mantenimiento a los interruptores se dificulta, ya que es necesario dejar fuera de servicio parte de la subestación.¹⁰



Barra principal y barra de transferencia

Es una variante del arreglo anterior, en el cual se utiliza una barra de transferencia para sustituir, a través de un interruptor, algún interruptor que necesite mantenimiento.¹¹

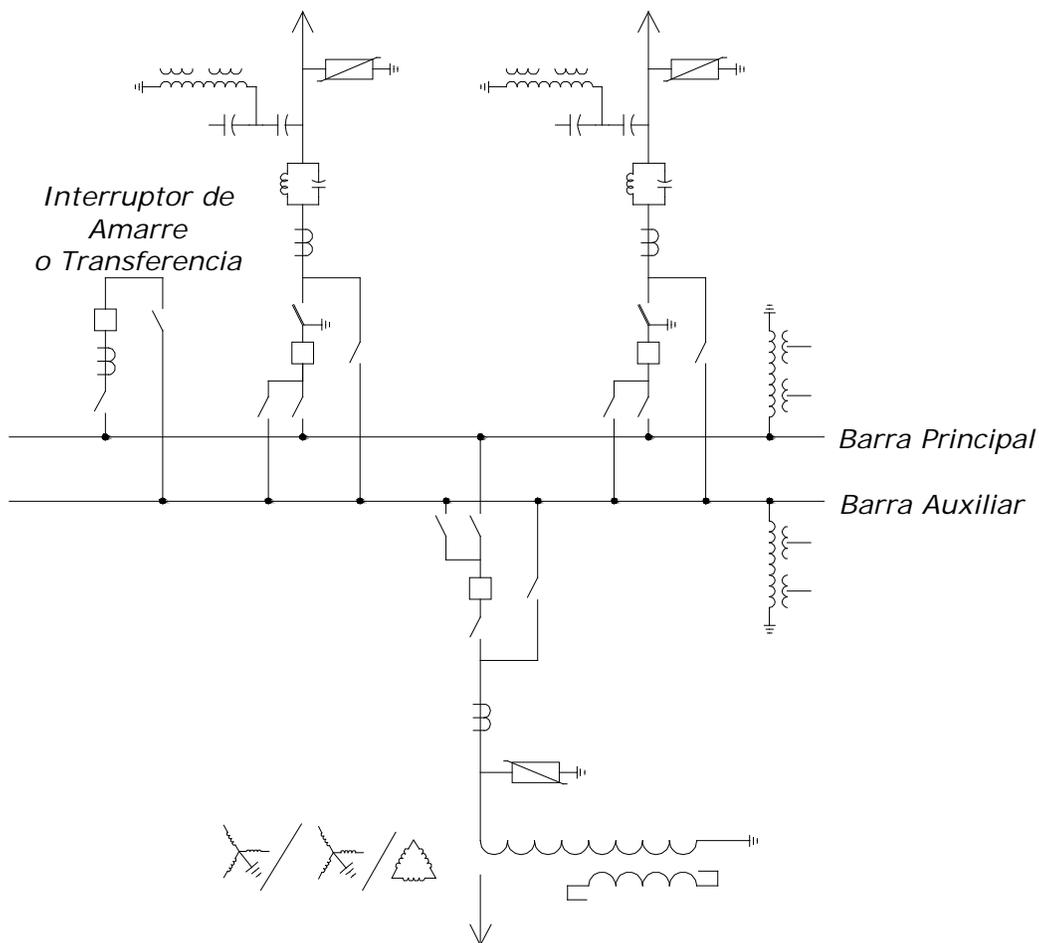


Barra principal y barra auxiliar

Este arreglo ofrece una mayor continuidad de servicio, puesto que, en caso de existir una falla en cualquiera de las dos barras, ocasiona la pérdida de los elementos conectados a la barra fallada. Debido a ello, la subestación puede ser operada como dos subestaciones independientes con arreglo de barra simple.¹²

Permite dar mantenimiento a los interruptores sin perder los elementos conectados a él y desenergizar cualquiera de las dos barras sin alterar el funcionamiento de la subestación. Sin embargo, aumentan las maniobras en el equipo cuando se utiliza el interruptor de amarre como interruptor de transferencia.¹³

La cantidad de equipo requerido es mayor, por tanto, su costo también incrementa.¹³



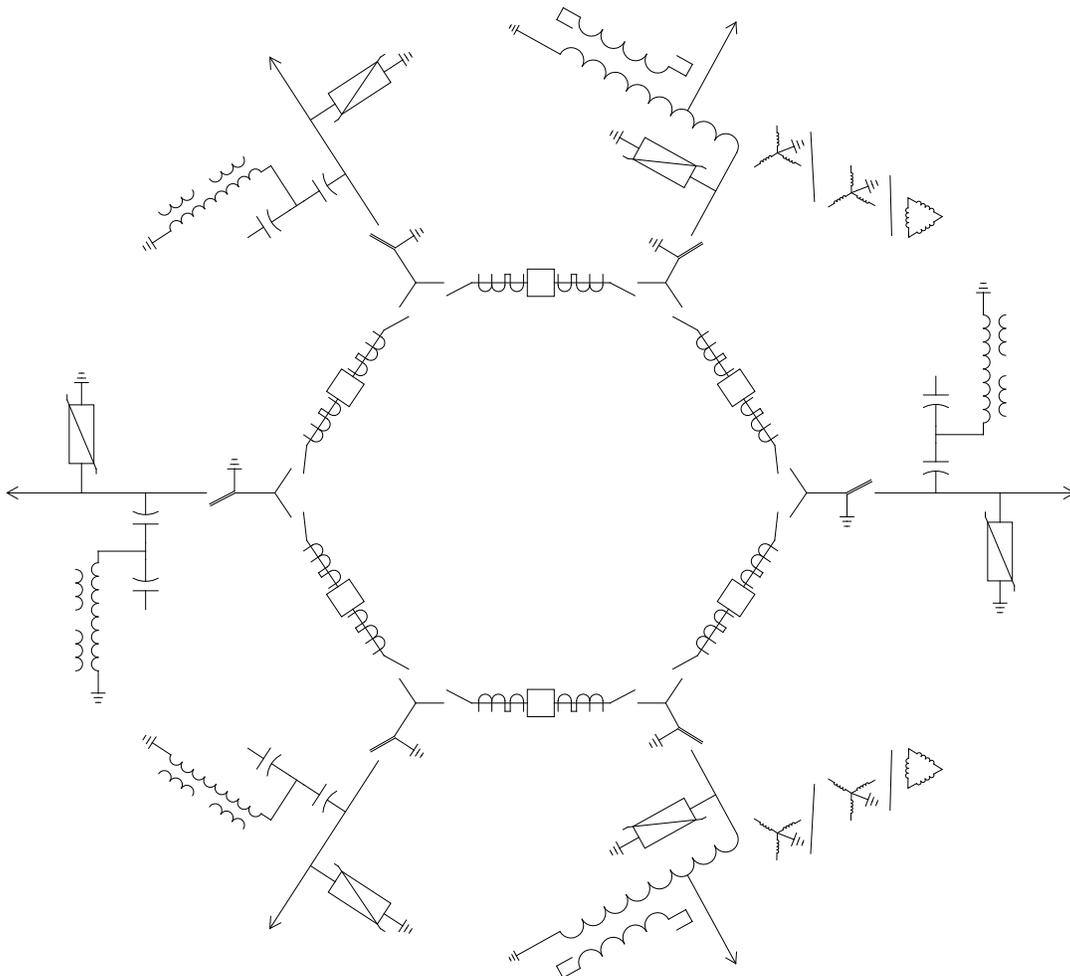
Anillo (mayor confiabilidad y costo)

Arreglo que permite continuidad de servicio, ya que evita la salida completa en caso de falla en las barras. Además, ofrece la posibilidad de dar mantenimiento a los interruptores sin que se pierda el suministro de energía.¹⁵

Cuando un interruptor está en mantenimiento, pueden ocurrir disparos en la protección, debido a que al abrir el anillo se puede incrementar la corriente de carga en los otros interruptores que permanecen en servicio. Esto puede evitarse realizando el mantenimiento en condiciones de baja carga.

Prácticamente requiere el mismo equipo que el arreglo de barra sencilla, por lo que su costo es similar.

Se utiliza en la salida de 23 [kV] de las subestaciones de distribución, utilizando anillo sencillo o doble en caso de haber más de dos transformadores.¹⁶

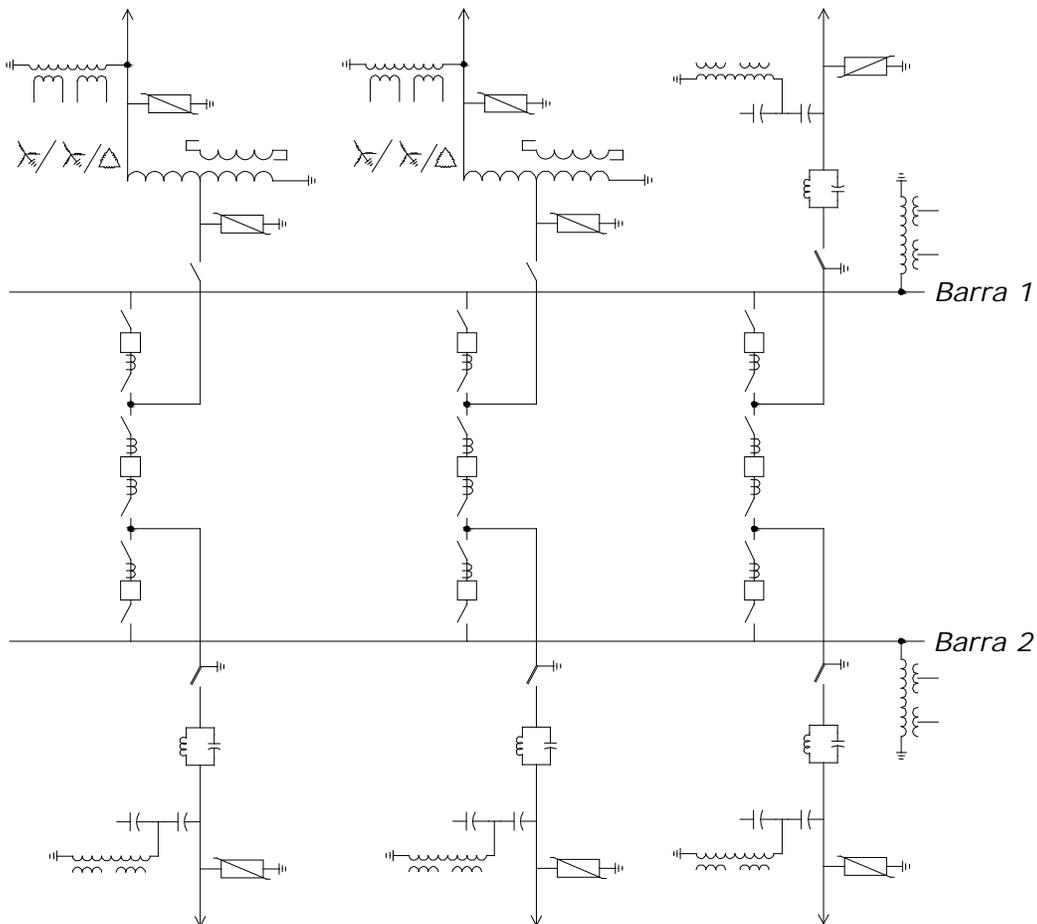


Interruptor y medio

Arreglo que ofrece buena confiabilidad y ventajas para las operaciones de mantenimiento sin tener que interrumpir el servicio. Regularmente las transferencias se hacen a través de los interruptores, lo que permite conservar la protección aun cuando alguno se encuentre en mantenimiento.¹⁷

Ocurre lo mismo que en el arreglo de anillo, cuando un interruptor está en mantenimiento, ya que al tener algún interruptor fuera de servicio, puede manifestarse un exceso de carga en los restantes y provocar disparos en las protecciones.

Este arreglo se utiliza en subestaciones de 115, 230 y 400 [kV], sobre todo en aquellas de interconexión que forman parte de un sistema en anillo.

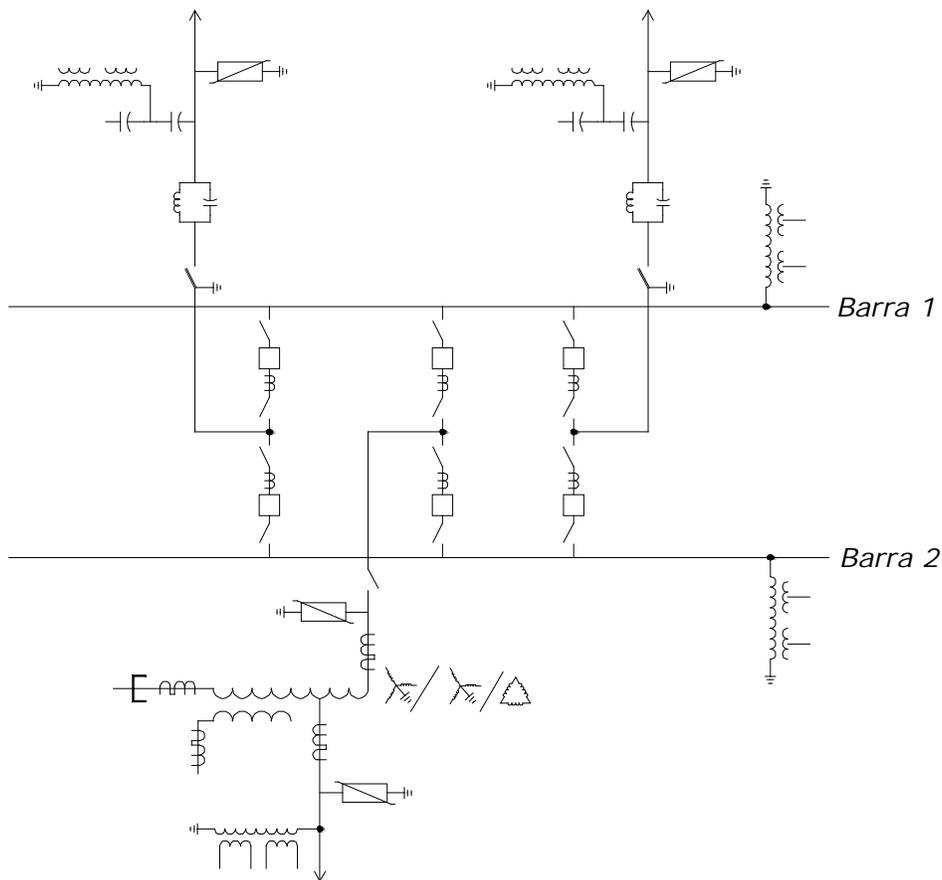


Doble interruptor (mayor confiabilidad y costo)

Es la mejor opción en cuanto a confiabilidad se refiere, no obstante, es un arreglo más costoso que los anteriores y por ello se emplea en aquellos casos en que la continuidad es muy importante.

Con un interruptor fuera de servicio, se ocasiona la pérdida de únicamente el elemento disparado.

Las subestaciones con éste arreglo pueden ser operadas como dos subestaciones independientes de barra simple.¹⁸



1.3.2 Equipo de una subestación

Transformadores de potencia

Un transformador es una máquina eléctrica que eleva o reduce la magnitud de tensión eléctrica.¹⁹

Está formado por tres partes principales:²⁰

- Parte activa: Núcleo, bobinas, cambiador de derivaciones y bastidor.
- Parte pasiva: Comprende el tanque que aloja la parte activa y se utiliza en transformadores cuya parte activa está sumergida en líquidos.
- Accesorios: Son todas las partes y dispositivos que ayudan en la operación y facilitan el mantenimiento del mismo.

Bancos de tierra

Es un transformador que conecta a tierra el neutro del sistema, para proporcionar un circuito de retorno a la corriente de cortocircuito.²¹

Cuando en un sistema de potencia con neutro flotante ocurre una falla de fase a tierra, las otras fases elevan $\sqrt{3}$ veces el valor de la tensión nominal. Éste problema se evita conectando un transformador llamado banco de tierra.

Existen dos tipos de bancos de tierra:²²

- a) Transformador de tierra, con conexión estrella con neutro a tierra en el lado de alta tensión y delta en baja tensión.
- b) Transformador con conexión tipo zig-zag.

Transformadores de instrumentos

Son dispositivos electromagnéticos que reducen a escala las magnitudes de tensión y corriente que se utilizan para la protección y medición de los circuitos de una subestación, ya que los aparatos que realizan éstas funciones no están diseñados para soportar grandes tensiones y corrientes.²³

Existen dos tipos de transformadores de instrumentos: transformadores de corriente y transformadores de potencial.²⁴

a) Transformadores de corriente

Transforman la corriente, es decir, toman la corriente de la línea y la reducen a un nivel seguro y medible. En un transformador de corriente, en condiciones normales de operación, la corriente del secundario es directamente proporcional a la del primario y está en fase con ella.

Los transformadores de corriente pueden ser de medición, de protección o mixtos.

b) Transformadores de potencial

Son de tipo inductivo y tienen como función principal reducir los valores de tensión del sistema a valores suficientemente bajos para alimentar a equipos de protección, control y medición.

En consecuencia, el transformador debe ser muy exacto para que no distorsione los verdaderos valores de tensión.

Dispositivos de potencial capacitivo

Se utilizan para alimentar a equipos de protección, control y medición. Facilita los propósitos de telemedición, control en tiempo real y en general aspectos de comunicación.²⁵

Capacitores

Dispositivos formados por dos placas conductoras, separadas por un elemento dieléctrico y al aplicar una diferencia de potencial almacenan carga eléctrica. En las subestaciones se utilizan capacitores de potencia con arreglos serie-paralelo para conectarlos en alta tensión y dar la capacidad de potencia reactiva requerida.²⁶

Por lo regular, los capacitores de alta tensión están sumergidos en líquidos dieléctricos, cerrados herméticamente dentro de un tanque; sus terminales salen al exterior a través de boquillas de porcelana.

a) Bancos de capacitores

Los capacitores instalados en grupos son llamados bancos, los cuales se utilizan en instalaciones industriales y de potencia.²⁷

Los bancos de capacitores pueden ser conectados en delta, estrella sólidamente aterrizada o flotante, doble estrella sólidamente aterrizada o flotante.

La conexión delta se encuentra en sistemas de baja tensión y se determina generalmente por razones económicas.

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

Por lo general, los bancos de capacitores de alta tensión se conectan en estrella con neutro flotante, de esta manera se evita la circulación de corrientes armónicas triples que pueden dañar los capacitores.

La instalación de capacitores en los sistemas eléctricos tiene por objeto suministrar potencia reactiva y mejorar el bajo factor de potencia, logrando con esto reducir el flujo de potencia reactiva en líneas y equipos y con ello incrementar la capacidad de carga en los transformadores, líneas y generadores; así como la de regular la tensión de suministro.

Apartarrayos

Dispositivos eléctricos que limitan la magnitud de las sobretensiones originadas por descargas atmosféricas u operación de interruptores y conducen a tierra las corrientes producidas por estas sobretensiones.²⁸

Los apartarrayos se dividen en tres grupos:²⁹ cuernos de arqueo, apartarrayos autovalvulares y apartarrayos de óxidos metálicos. Actualmente éstos últimos son los más utilizados.

a) Cuernos de arqueo

Es el caso más simple y económico para proteger los equipos de distribución. Deben ser capaces de soportar la tensión nominal más alta del sistema y producir la descarga cuando haya una sobretensión.³⁰

Una vez originado el arco, no son capaces de extinguir la corriente de 60 ciclos que precede a la corriente transitoria, produciéndose una falla a tierra que debe ser eliminada por el esquema de protección. Este inconveniente provoca una interrupción, por lo cual se ve limitado su uso.

b) Apartarrayos autovalvulares

Los apartarrayos tipo autovalvular están formados por un entrehierro y una resistencia no lineal. El entrehierro descarga las corrientes transitorias a tierra con una tensión de descarga baja; la resistencia presenta una alta impedancia a la corriente que sigue a la transitoria.³¹

Durante una sobretensión debida a descargas atmosféricas, la corriente de descarga alcanza niveles de miles de amperes, disminuyendo posteriormente a cientos de amperes una vez disipada la sobretensión. Los entrehierros del apartarrayos deben interrumpir esa corriente posterior y permanecer bloqueados ante cualquier sobretensión momentánea que permanezca en las terminales del apartarrayo.

Durante una sobretensión, la resistencia presenta poca oposición y la corriente transitoria fluye libremente.

c) Apartarrayos de óxidos metálicos

Es un dispositivo de protección para sobretensiones basado en las propiedades semiconductoras de los óxidos metálicos, como el óxido de zinc (ZnO). Tiene mejores características de no linealidad que el carburo de silicio, debido a ello y a sus bajas pérdidas a tensiones nominales, ha sido posible no utilizar entrehierro, permitiendo así reducir el tamaño de estos equipos y en consecuencia su peso.³²

Debido a su característica tensión-corriente, éste apartarrayos descarga únicamente a un valor de corriente predeterminado, mejorando el nivel de protección del sistema.

Es importante considerar su temperatura de operación, ya que su comportamiento es sensible a la temperatura; a medida que la temperatura ambiente se eleva, la energía que debe disipar el apartarrayos se incrementa, provocando que la corriente que circula a través de éste se eleve, incrementando nuevamente la temperatura y, por consiguiente,

un calentamiento en el equipo. Por ello el apartarrayos nunca debe trabajar por arriba de su capacidad térmica, de lo contrario puede fallar.

Interruptores de potencia

Los interruptores de potencia son dispositivos destinados al cierre y apertura de los circuitos bajo condiciones de carga, en vacío y en condiciones de falla. Asimismo, permite insertar o retirar equipos y máquinas, líneas aéreas o cables de un circuito energizado.³³

En condiciones de falla, el interruptor debe ser capaz de interrumpir corrientes de corto circuito del orden de kiloamperes y, en consecuencia, soportar los esfuerzos térmicos y dinámicos a que es sometido para poder librar la contingencia.

Los interruptores pueden cerrar o abrir en forma manual o automática por medio de relevadores, los cuales monitorean las condiciones de la red. La interrupción del arco puede llevarse a cabo por medio de:³⁴

- Aceite
- Vacío
- Hexafloruro de azufre (SF₆)
- Soplo de aire
- Soplo de aire-magnético

Asimismo, tienen un mecanismo de almacenamiento de energía que le permite cerrar hasta cinco veces antes de que la energía sea interrumpida completamente; este mecanismo puede ser:³⁵

- Neumático
- Hidráulico
- Neumático-hidráulico
- Mecanismo de resorte

Debido a las funciones tan importantes que desempeña, es uno de los dispositivos del esquema de protección más importante en los sistemas eléctricos.³⁶

Cuchillas

Dispositivos que sirven para conectar y desconectar los elementos de una instalación eléctrica en caso de tener que realizar maniobras de operación o bien para darles mantenimiento.³⁷

Las cuchillas, a diferencia de un interruptor, no pueden abrir circuitos cuando está fluyendo corriente a través de ellas (operan sin carga), siempre debe abrirse primero el interruptor correspondiente.

De acuerdo a su tipo de construcción, las cuchillas pueden ser de tipo:

- a) Horizontal
- b) Horizontal invertida
- c) Vertical
- d) Pantógrafo

Fusibles

Es un dispositivo de protección que opera cuando una sobrecorriente pasa a través de él. Por lo tanto, las funciones de un fusible son aislar la parte del circuito donde se presenta una falla del resto del alimentador y así impedir el daño a los equipos instalados en el mismo.³⁸

Las consideraciones que deben tomarse en cuenta para la selección adecuada de un fusible son:

- Proteger a los equipos bajo condiciones de sobrecorriente que pueda dañarlos
- En condiciones normales de operación el fusible no debe operar
- En caso de falla, cuando dos o más fusibles se encuentran instalados en serie, únicamente deberá operar el que se encuentre más cercano a la falla.

Los fusibles de potencia más conocidos son:³⁹

- a) Fusibles de expulsión
- b) Fusibles limitadores de corriente

Los fusibles se diseñan para fundirse en un tiempo especificado a una determinada corriente, para tal propósito es necesario conocer las curvas de operación tiempo-corriente. Existen tres tipos de curvas: las curvas características promedio de fusión tiempo-corriente, las curvas instantáneas de corriente pico y las curvas I^2t . La primera curva se aplica a toda clase de fusibles y las dos últimas a fusibles limitadores de corriente.⁴⁰

Los fusibles de potencia deben ser seleccionados con base en la máxima tensión entre fases del sistema en donde se apliquen y capacidad interruptiva mayor a la máxima disponible en el lugar de instalación.

Reactores

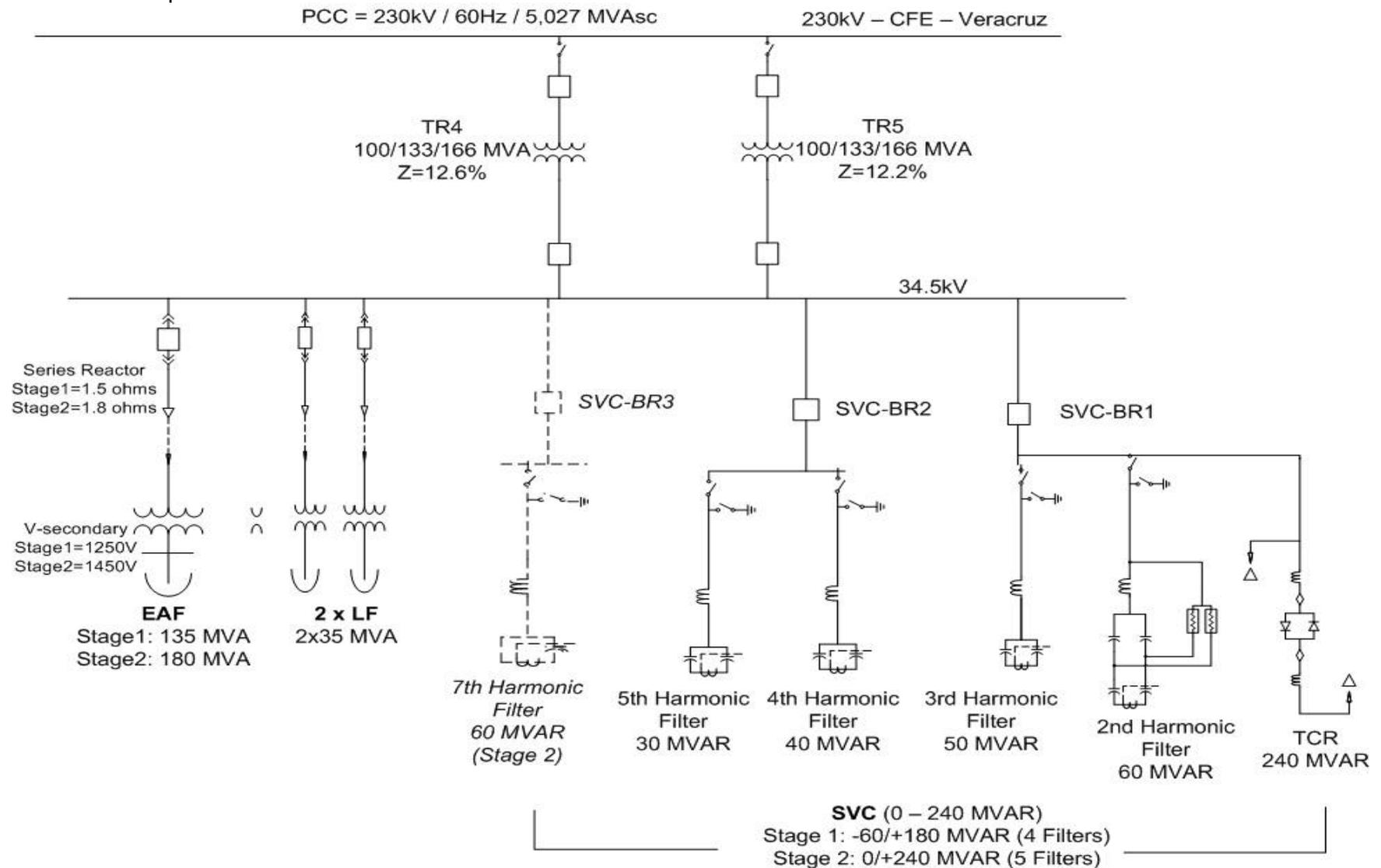
Son bobinas con diversas funciones. Cuando se conectan en serie limitan la corriente de corto circuito para poder disminuir la capacidad interruptiva de interruptores y en paralelo o derivación absorben potencia reactiva (líneas largas en demanda mínima).⁴¹

En subestaciones, los reactores se colocan en el neutro de los bancos de transformadores para limitar la corriente de corto circuito monofásica.

Según su capacidad, los reactores pueden ser de tipo seco para potencias reactivas pequeñas o del tipo sumergido para potencias elevadas.

a) Compensadores estáticos de vars

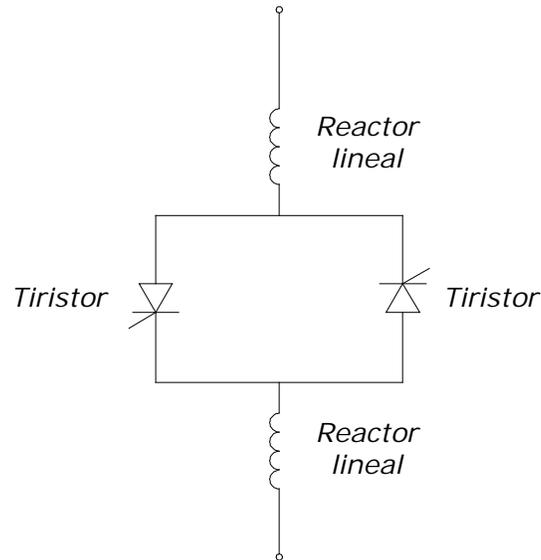
Los compensadores estáticos son equipos formados por reactores controlados por tiristores y capacitores ya sea conmutados por interruptor o tiristores y filtros de corrientes armónicas que son utilizados para suministrar y/o absorber potencia reactiva regulando así la tensión en un sistema eléctrico de potencia.



Los componentes de un compensador estático se conectan en derivación:

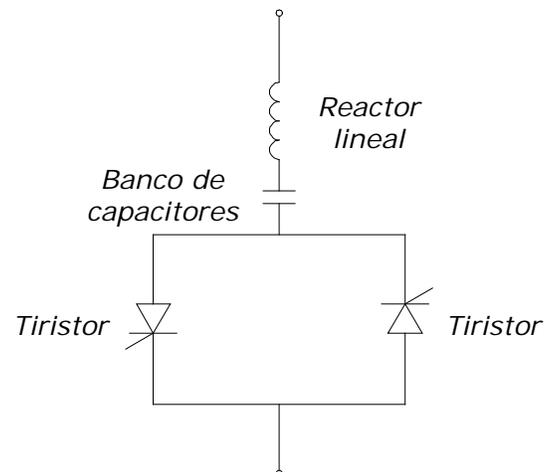
- Reactor controlado por tiristores

Reactores generalmente conectados en delta controlados por tiristores.



- Capacitor switchado por tiristores

El banco de capacitores es conmutado a través de tiristores y conectado en serie con un reactor lineal que se utiliza para limitar la corriente de inrush y outrush.



- Compensador mixto

Es una combinación de los casos anteriores, reactores y bancos de capacitores.

1.4 Referencias

- ¹ VIQUEIRA, Jacinto, L. *“Redes Eléctricas”* Tomo I. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2004, p. 12
- ² Idem
- ³ Ibidem, pp. 18-19
- ⁴ RAÚLL, José M. *“Diseño de Subestaciones Eléctricas”*. 2da. Ed., México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2000, pp. 1
- ⁵ Idem
- ⁶ Idem y NRF-041-CFE-2005, “Esquemas normalizados de protecciones para líneas de transmisión”, p. 1
- ⁷ REUNIÓN de Verano de Potencia (2005, Acapulco, Guerrero). Arreglos de barras en subestaciones. IEEE Sección México, p. 3
- ⁸ Raúl, op. cit., pp. 4-5
- ⁹ ENRÍQUEZ, Gilberto H. *“Elementos de Centrales Eléctricas II”*. Preedición, México, Limusa, 1995, p. 577
- ¹⁰ Raúl, op. cit., p. 5
- ¹¹ Idem
- ¹² Enríquez, op. cit., pp. 578-579
- ¹³ Raúl, op. cit., p. 7
- ¹⁴ Reunión, op. cit., p. 31
- ¹⁵ Enríquez, op. cit., p. 580
- ¹⁶ Raúl, op. cit., p. 12
- ¹⁷ Enríquez, op. cit., p. 581
- ¹⁸ Enríquez, op. cit., p. 55
- ¹⁹ Raúl, op. cit., p. 41
- ²⁰ Ibidem, pp. 41-45
- ²¹ Ibidem, p. 51
- ²² Idem
- ²³ Ibidem, p. 52
- ²⁴ Ibidem, pp. 52-64
- ²⁵ Ibidem, p. 65
- ²⁶ Ibidem, p. 67
- ²⁷ Ibidem, p. 71
- ²⁸ Raúl, op. cit., p. 78
- ²⁹ Idem
- ³⁰ ESPINOSA, Roberto, L. *“Sistemas de Distribución”*. México, Limusa, 1990, pp. 564-566
- ³¹ Ibidem, pp. 573-577
- ³² Ibidem, pp. 590-591
- ³³ Raúl, op. cit., p. 92
- ³⁴ Espinosa, op. cit., p. 452
- ³⁵ Ibidem, p. 453
- ³⁶ Raúl, op. cit., p. 92
- ³⁷ Ibidem, p. 112
- ³⁸ Espinosa, op. cit., p. 490
- ³⁹ Raúl, op. cit., pp. 115-116
- ⁴⁰ Espinosa, op. cit., pp. 500-501
- ⁴¹ Raúl, op. cit., p. 121

Calidad de la Energía

2.1 La importancia de la calidad de la energía

La principal razón por la que hay interés en los estudios de calidad de energía es de tipo económico. En los últimos años, se ha incrementado el número de cargas sensibles a las variaciones de los parámetros en el suministro de energía eléctrica.¹

No sólo los consumidores domésticos o comerciales se ven afectados en este sentido, también se ven inmersos los consumidores industriales y las propias empresas suministradoras y distribuidoras de energía eléctrica que utilizan, en la mayor parte de los casos, los avances de la electrónica de potencia.

2.2 ¿Qué es la calidad de la energía?

La calidad de la energía puede definirse como la ausencia de problemas manifestados en tensión, corriente y frecuencia que pueden conducir a una falla o salida de operación en el equipo de los usuarios finales.²

La calidad del suministro está definida por tres factores importantes: continuidad del servicio (considerando el mínimo de fallas del suministro de potencia), limitación de las variaciones de tensión y control de la frecuencia eléctrica a su valor nominal.³

Debido a la importancia que representa la energía eléctrica en nuestra vida y la forma en que repercuten los problemas de calidad del servicio, podemos decir que el propósito de la calidad de la energía es encontrar métodos efectivos para corregir los disturbios y variaciones de tensión que afectan a los usuarios, así como proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan en el sistema eléctrico de la compañía suministradora.⁴

2.3 Tipos de disturbios en los Sistemas Eléctricos de Potencia

2.3.1 Transitorios

El término transitorio es utilizado para denotar las variaciones indeseables y momentáneas en la forma de onda de corriente o tensión.⁵

El transitorio puede aparecer en la instalación del usuario debido a disturbios en el sistema de distribución de la empresa suministradora o a disturbios dentro de la propia instalación del usuario. La duración de los transitorios puede ser de nanosegundos a varios milisegundos.

Algunas de las fuentes de transitorios generadas en el sistema de distribución de la empresa suministradora son:

- Rayos que inciden en las fases de las líneas de transmisión y en los hilos de guarda
- Operación de interruptores, cuchillas y switcheo de bancos de capacitores
- Operación de recierre en alimentadores adyacentes

Algunas de las fuentes de transitorios generadas en las instalaciones del usuario son:

- Descargas atmosféricas
- Switcheo de capacitores
- Conmutación de diodos y tiristores
- Switcheo de cables
- Operación de interruptores y cuchillas
- Operación de fusibles limitadores de corriente

Los transitorios pueden clasificarse en dos categorías: transitorios de impulso y transitorios oscilatorios.

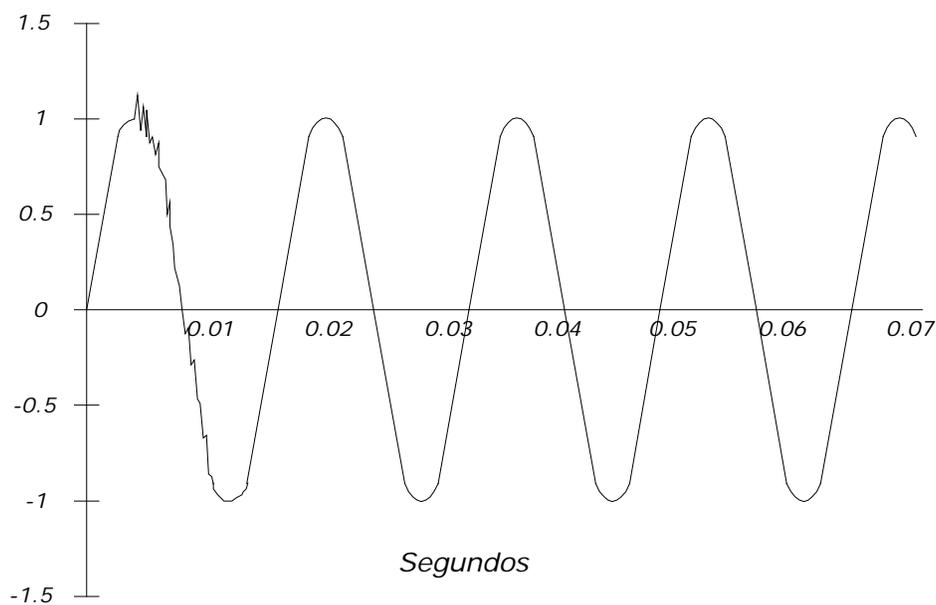
Transitorios de impulso

Es un cambio súbito de tensión, corriente o ambas, a una frecuencia distinta de la fundamental; es unidireccional en su polaridad. Se caracterizan por ondas de sobretensión de frente rápido y de aumento relativamente lento en la escala de tiempo que se maneja. Por ejemplo, un transitorio de impulso de 1.2×50 [μs], 2000 [V] nominales se eleva desde cero a su valor pico de 2000 [V] en 1.2 [μs] y después decae a la mitad de su valor pico en 50 [μs]. La causa más común de los transitorios de impulso son las descargas atmosféricas.⁶

Los transitorios de impulso pueden excitar la frecuencia natural de los circuitos del sistema de potencia y producir transitorios oscilatorios.

Transitorios oscilatorios

Transitorios cuyo valor instantáneo de tensión o corriente cambia rápidamente de polaridad. Pueden ser causados, por ejemplo, por la desconexión de líneas, bancos de capacitores o energización de transformadores.⁷



Ejemplo de un transitorio oscilatorio

En base a la magnitud de frecuencia y su duración, los transitorios oscilatorios se clasifican en tres categorías: transitorios de baja, media y alta frecuencia.

2.3.2 Variaciones de tensión de larga duración

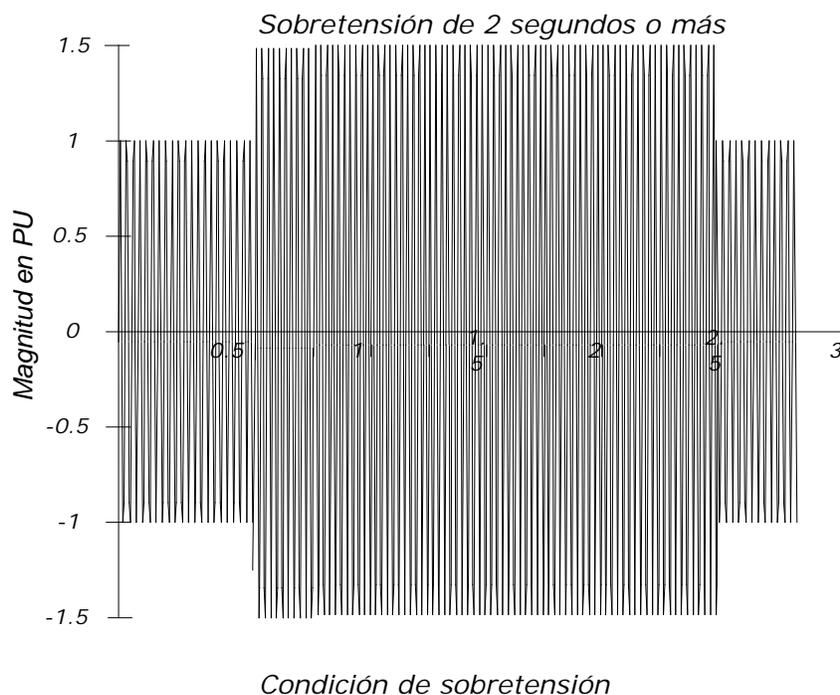
Son variaciones de tensión a la frecuencia del sistema por tiempos mayores a 1 minuto. Estas variaciones son causadas por variaciones en la carga y por las operaciones de switcheo en el sistema.⁸

La duración de estas variaciones depende de la operación del equipo para soporte de tensión; por ejemplo, reguladores de tensión o sistemas de excitación de generadores.

Las variaciones de larga duración pueden ser sobretensiones o bajas tensiones; generalmente, no son consecuencia de una falla en el sistema, pero son causadas por variaciones en la carga y operaciones de switcheo.

Sobretensión de larga duración

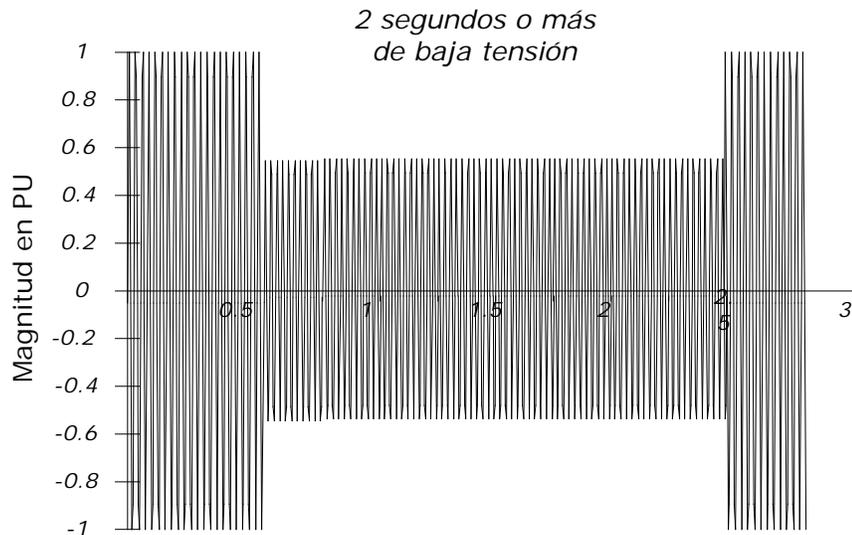
Una sobretensión es un incremento en el valor de tensión RMS mayor del 110% por más de 1 minuto.⁹



Usualmente, las sobretensiones son producto del switcheo de cargas, como la desenergización de cargas muy grandes o la energización de bancos de capacitores. También son causadas por la debilidad en el sistema y una inadecuada regulación y control del mismo.

Baja tensión de larga duración

La baja tensión es un decremento en el valor de tensión RMS menor al 90% por más de 1 minuto.¹⁰



Condición severa de baja tensión

Las bajas tensiones también son producto del switcheo de cargas, pero con efectos opuestos a las sobretensiones. Por ejemplo, la energización de una carga conduce a una caída de tensión, hasta que el equipo de regulación u otro dispositivo compensen dicho cambio.

En el arranque de motores, la corriente típica de arranque de un motor puede variar de 6 a 10 veces la corriente de carga nominal. El bus detecta una impedancia muy baja durante el arranque originando una baja tensión en el sistema.

Interrupciones sostenidas

Interrupciones de tensión con una duración mayor a un minuto y que requieren de la intervención del personal para restaurar el sistema.¹¹

2.3.3 Variaciones de tensión de corta duración

Las variaciones de tensión de corta duración son causadas por condiciones de falla o switcheo de cargas o pérdidas intermitentes de conexiones en la instalación y su duración está limitada a 3 segundos. La falla puede provocar caídas de tensión temporales (sags), sobretensiones temporales (swells) o una pérdida por completo de energía (interrupciones), dependiendo de su localización y las condiciones del sistema.¹²

Interrupciones

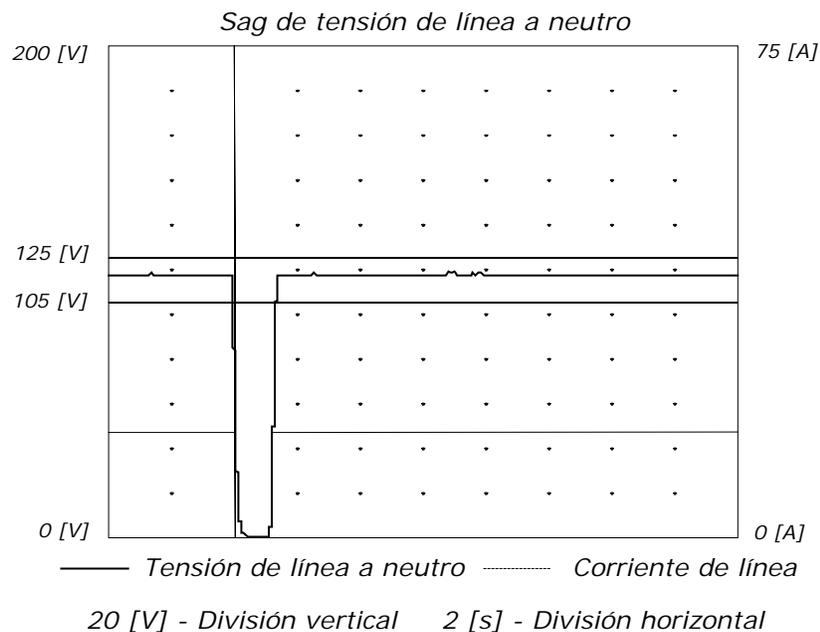
Una interrupción es una pérdida de potencia menor a 0.1 pu por un periodo de tiempo no mayor a un minuto.¹³

Las interrupciones pueden resultar de fallas en el sistema de potencia, fallas en el equipo o mal funcionamiento del control.

La duración de una interrupción debida a una falla en el sistema está determinada por el tiempo de operación de los dispositivos de protección utilizados.

Las interrupciones se clasifican de acuerdo a su tiempo de duración en:¹⁴

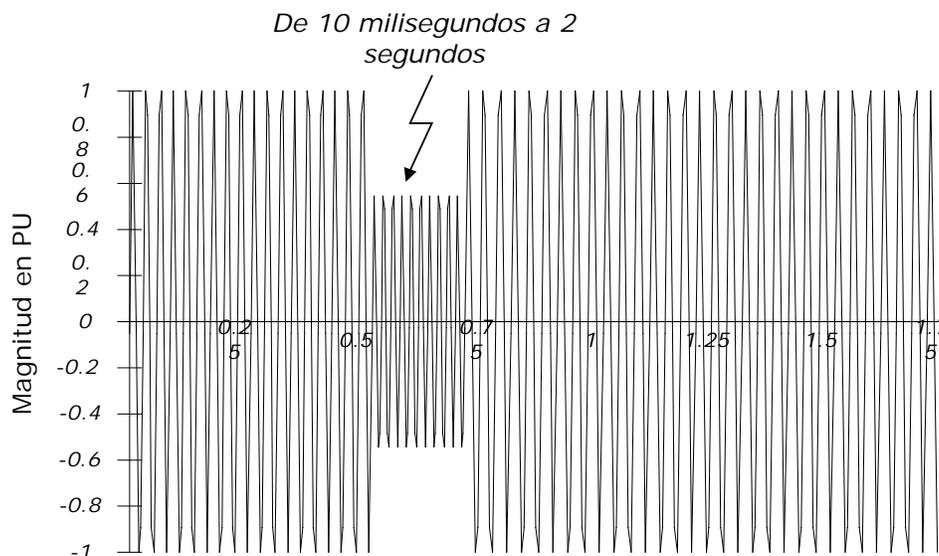
- a) **Interrupción instantánea.** De 0.5 a 30 ciclos
- b) **Interrupción momentánea.** De 30 ciclos a 3 segundos
- c) **Interrupción temporal.** De 3 segundos a 1 minuto



Sags

Un sag es un decremento entre 0.1 y 0.9 pu en el valor de tensión RMS a la frecuencia fundamental, con una duración de 0.5 ciclos a 1 minuto.¹⁵

La duración típica de los sags es de 10 a 500 milisegundos, pero podrían alcanzar los 2 segundos (120 ciclos).



Sag debido a una falla en un alimentador

Los sags generalmente son asociados con fallas en el sistema, pero también pueden ser causados por arranque de motores, energización de cargas pesadas o por fallas en alimentadores adyacentes y su duración depende de los tiempos de libramiento de la corriente de falla. Los sags más comunes son debidos a fallas de línea a tierra, pero los más severos son debidos a fallas trifásicas.

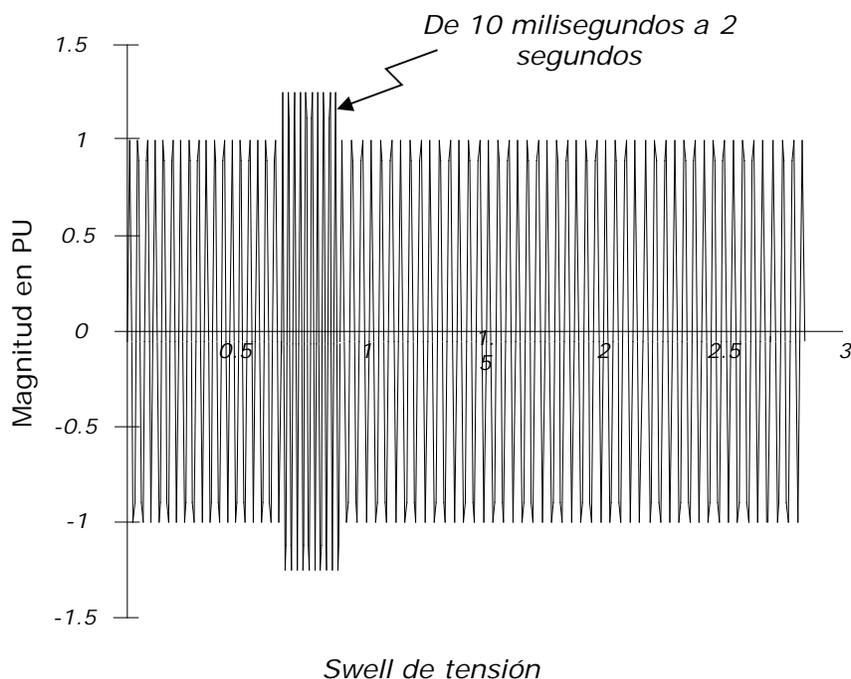
El problema más común causado por el sag es el disparo indeseado de los controladores de proceso y apertura de contactos de contactores.

Swells

Un swell es un incremento entre el 1.1 y 1.8 pu en la magnitud de la tensión RMS en cualquiera de las fases del sistema. La duración del swell puede ser de 0.5 ciclos a 1 minuto.¹⁶

El swell puede ser causado por fallas en el sistema, aunque no son tan comunes como en los sags, energización de bancos de capacitores y switcheo de cargas.

Los swells son caracterizados por su magnitud y duración; la severidad de un swell de tensión durante una falla depende de la localización de la falla, la impedancia y el aterrizamiento del sistema.



2.3.4 Desbalance de tensión

Condición en la cual las tensiones de las tres fases difieren en amplitud o están desplazadas a diferente ángulo de su defasamiento normal (120°).¹⁷

El desbalance de tensión está definido como la relación de la componente de secuencia negativa o cero a la componente de secuencia positiva.¹⁸ Las tensiones de secuencia negativa o cero en un sistema de potencia, generalmente resultan del desbalance de cargas que originan corrientes de secuencia negativa o cero.

El desbalance puede ser estimado como la desviación máxima del promedio de las tensiones o corrientes trifásicas, dividido por el promedio de los mismos, expresado en %.

2.3.5 Distorsión en la forma de onda

Es una distorsión en estado estable de una onda senoidal ideal a la frecuencia fundamental, caracterizada principalmente por el contenido espectral de la distorsión.¹⁹

Existen cinco tipos principales de distorsión en la forma de la onda:

Componente de DC

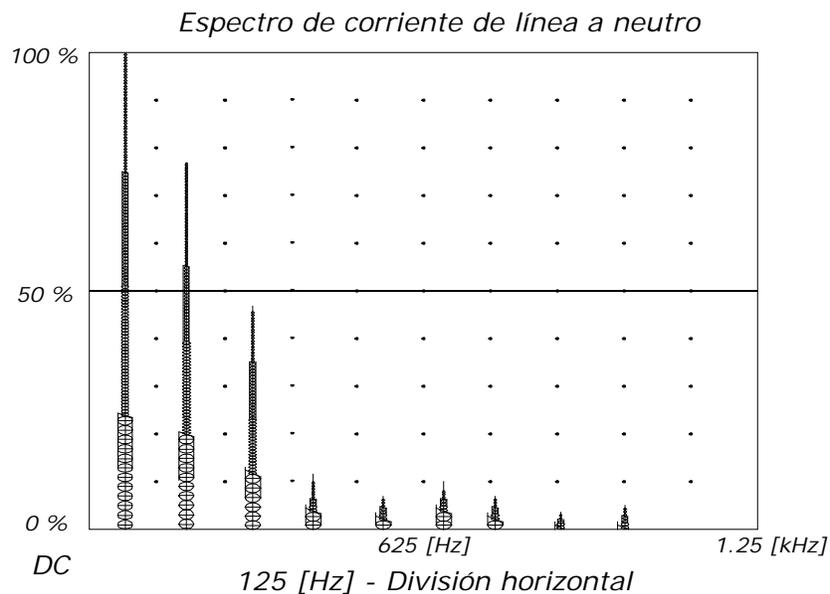
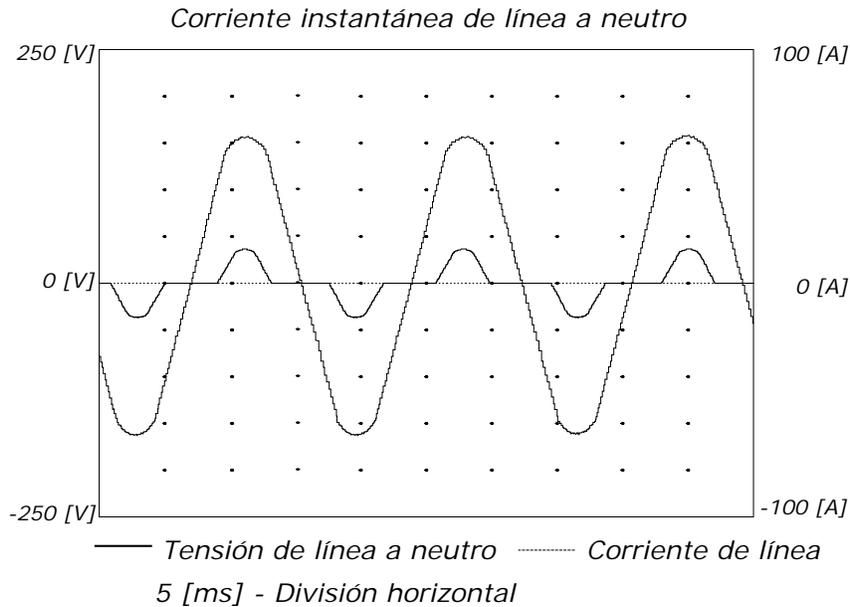
Es la presencia de corriente directa en un sistema de corriente alterna. Esto puede ocurrir por convertidores electrónicos conectados a la red de suministro o por dispositivos que contengan diodos.²⁰

En los núcleos de transformadores, la presencia de corriente directa tiene efectos perjudiciales, debido a que se incrementa la saturación en operación normal, calentamiento y disminución en la vida útil del equipo.

Armónicas

Las armónicas son señales cuya frecuencia es un entero, múltiplo de la frecuencia principal o fundamental.²¹

Las armónicas son producidas por cargas no lineales, tales como equipos electrónicos, dispositivos de arqueo, núcleos de hierro de transformadores, etc.



Forma de onda de corriente y espectro de frecuencias armónicas

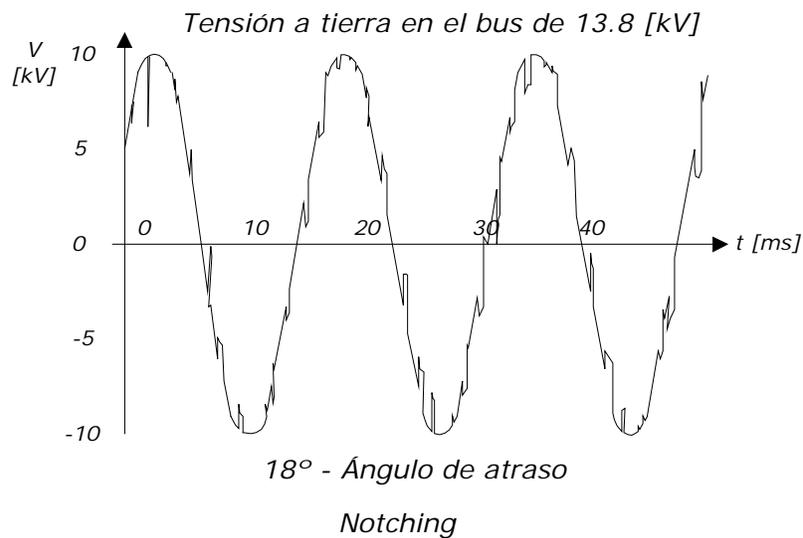
Interarmónicas

Las interarmónicas son tensiones o corrientes senoidales con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.²²

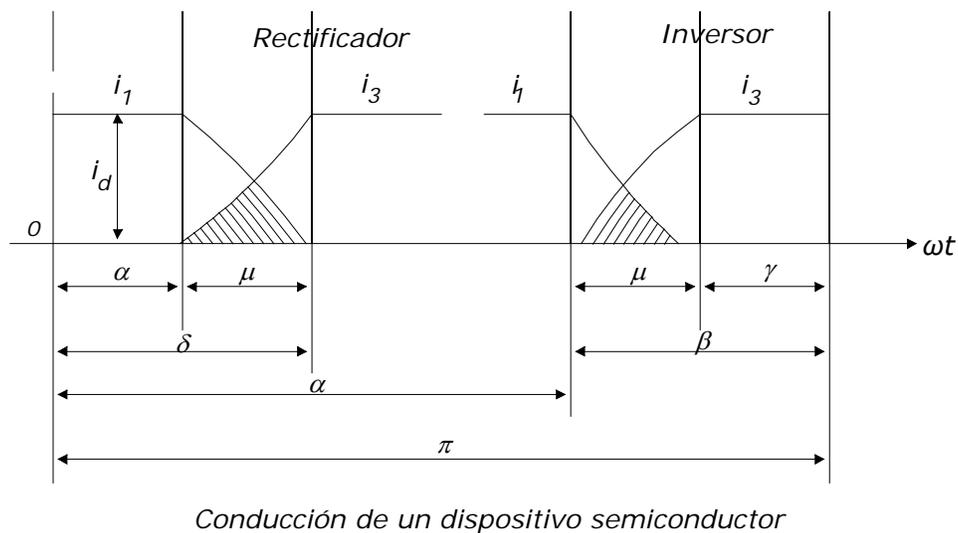
La distorsión interarmónica puede ocurrir en redes de todos los niveles de tensión. Las principales fuentes de ella son los convertidores estáticos de frecuencia, cicloconvertidores, hornos de inducción y dispositivos de arco.

Notching

Es un disturbio repetitivo en la forma de onda de tensión, causado por el traslape en la conducción de los dispositivos de electrónica de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra.²³



El Notching es más pronunciado en sistemas débiles y no está confinado solo al bus donde el equipo no lineal está conectado.



Ruido

El ruido es una señal eléctrica indeseable con ancho de banda menor a 200 [kHz] superpuesta a la señal de corriente o tensión del sistema.²⁴

El rango de la frecuencia y nivel de magnitud del ruido depende de la fuente que produce el ruido y la característica del sistema. Una magnitud típica de ruido medido en la tensión es menor de 1% de la magnitud de tensión RMS.

Generalmente, el ruido resulta de los dispositivos de electrónica de potencia, arqueos entre conductores o cargas con rectificadores de estado sólido.

Puede existir ruido en cualquiera de las dos siguientes formas:

- a) **Modo normal del ruido.** Para el caso donde los conductores de fase son contaminados con ruido.
- b) **Modo de ruido común.** Donde los conductores de fase y los conductores a tierra son contaminados con el ruido.

El modo de ruido común puede con frecuencia ser eliminado a través del uso de transformadores de aislamiento. El modo normal de ruido requiere filtros o líneas acondicionadoras.

El método apropiado para controlar el ruido depende de la susceptibilidad del equipo, método de acoplamiento y el rango de frecuencia del ruido.

2.3.6 Fluctuaciones de tensión (Flicker)

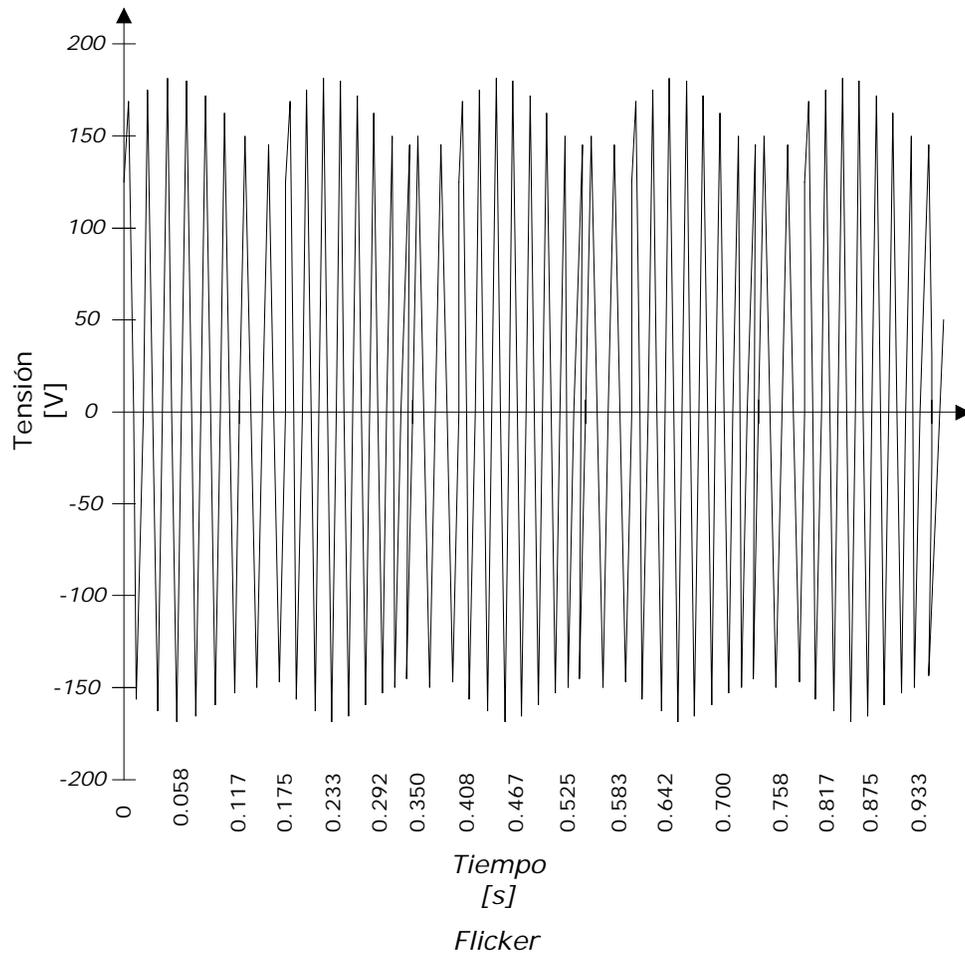
Son una serie de cambios continuos en la tensión, los cuales regularmente no exceden el rango de 0.9 a 1.1 pu.²⁵

Las variaciones de tensión originadas por cargas no lineales que demandan altas y variables corrientes, se denominan flicker. Si las variaciones de tensión se repiten a intervalos cortos de tiempo, se producirán fluctuaciones en la iluminación perceptibles para el ojo humano, principalmente de aquella emitida por lámparas incandescentes.²⁶

Las fluctuaciones de tensión de este tipo afectan el funcionamiento de muy pocos equipos, sin embargo, es perceptible una variación en la luminosidad de las lámparas incandescentes, lo cual es una sensación visible molesta.

Los hornos de arco eléctrico así como las soldadoras, son la causa más común de las variaciones de tensión en el sistema de transmisión y distribución. En instalaciones residenciales, el efecto de flicker es producido por el arranque automático de refrigeradores o al energizarse calefactores o estufas eléctricas.²⁷

En general, la forma de solucionar éste problema conduce a alimentar estas cargas a través de circuitos derivados exclusivos o dimensionar los cables o transformadores de alimentación considerando los efectos de las variaciones rápidas de tensión.



2.3.7 Variaciones en la frecuencia

La frecuencia de un sistema eléctrico está definida por la relación entre la carga y la capacidad de generación; si éste balance cambia, se presentan ligeros cambios en la frecuencia. La magnitud de las variaciones y su duración dependen de las características de la carga y de la respuesta del sistema de generación.²⁸

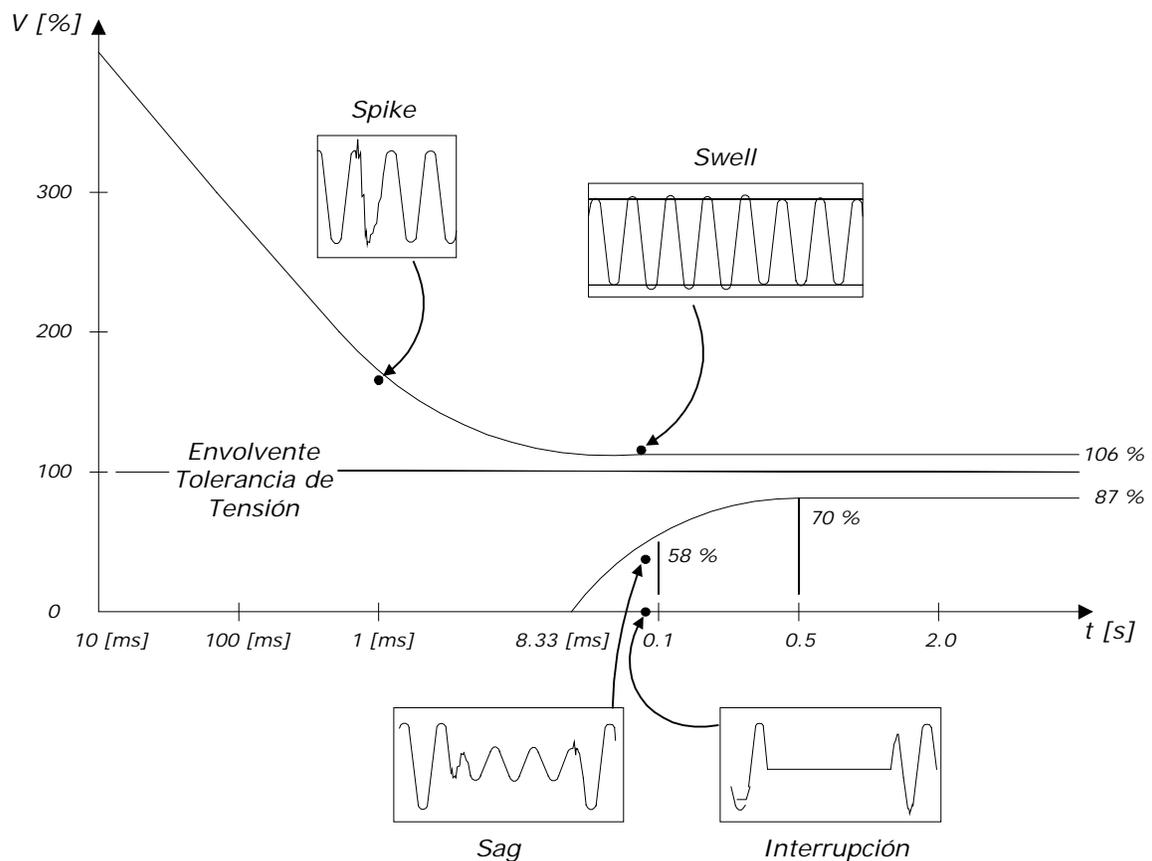
Las variaciones en la frecuencia pueden ser causadas por fallas en el sistema de transmisión, desconexión de grandes cargas o paro de alguna fuente de generación.

2.4 Curva CBEMA

La curva CBEMA define los límites, en estado estable y transitorio, dentro de los cuales la tensión de alimentación puede variar sin afectar el funcionamiento o causar algún daño a los equipos de cómputo.²⁹

Los equipos pueden funcionar adecuadamente para un rango de +6% a -13% de la tensión nominal. En la figura se observa que para espacios de tiempo corto, las tolerancias de tensión son grandes.

Los puntos debajo de la envolvente son causados por la pérdida de energía o disminución de la carga. Los puntos arriba de la envolvente son causados por fallas de aislamiento, sobretensión y sobreexcitación.³⁰



Curva CBEMA

2.5 Referencias

- ¹ ENRÍQUEZ, Gilberto H. *“El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica”*. México, Limusa, 1999, p. 15
- ² Ibidem, p. 20 y DUGAN, Roger C. (et al). *“Electrical Power Systems Quality”*. 2da. Ed., USA, Mc Graw Hill, 1996, p. 3
- ³ VIQUEIRA, Jacinto, L. *“Redes Eléctricas”* Tomo I. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2004, p. 17
- ⁴ Enríquez, op. cit., p. 21
- ⁵ Dugan, op. cit., p. 15
- ⁶ Dugan, op. cit., p. 15
- ⁷ Ibidem, pp. 16-17
- ⁸ Ibidem, p. 17
- ⁹ Ibidem, p. 19
- ¹⁰ Idem
- ¹¹ Idem
- ¹² Ibidem, p. 20
- ¹³ Idem
- ¹⁴ Ibidem, p. 14
- ¹⁵ Ibidem, pp. 20-23
- ¹⁶ Ibidem, p. 23
- ¹⁷ Ibidem, p. 24
- ¹⁸ Enríquez, op. cit., p. 47
- ¹⁹ Dugan, op. cit., p. 24
- ²⁰ Ibidem, p. 25
- ²¹ Ibidem, pp. 25-27
- ²² Ibidem, pp. 27
- ²³ Idem
- ²⁴ Ibidem, pp. 28
- ²⁵ Idem
- ²⁶ PROCOBRE, *“Calidad de Energía”*, www.procobreperu.org, pp. 31-32
- ²⁷ Dugan, op. cit., pp. 28-29
- ²⁸ Ibidem, p. 30
- ²⁹ BURKE, James J. *“Power Distribution Engineering: Fundamentals and applications”*. USA, Marcel Dekker Inc, 1994, p. 293
- ³⁰ Dugan, op. cit., pp. 40-41

Armónicas

3.1 Introducción a las armónicas

En la actualidad, el problema de las armónicas en los sistemas eléctricos se ha visto incrementado debido a las cargas no lineales conectadas a ellos. ¹ Algunas de las fuentes más comunes de armónicas son dispositivos de estado sólido usados en el control, hornos de arco eléctrico, controladores de velocidad en motores eléctricos y transformadores de potencia sobreexcitados. ²

Estas distorsiones de la forma de onda crean problemas en la red eléctrica tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, mal funcionamiento de protecciones o daño en los aislamientos, que trae como consecuencia la disminución de la vida útil de los equipos.

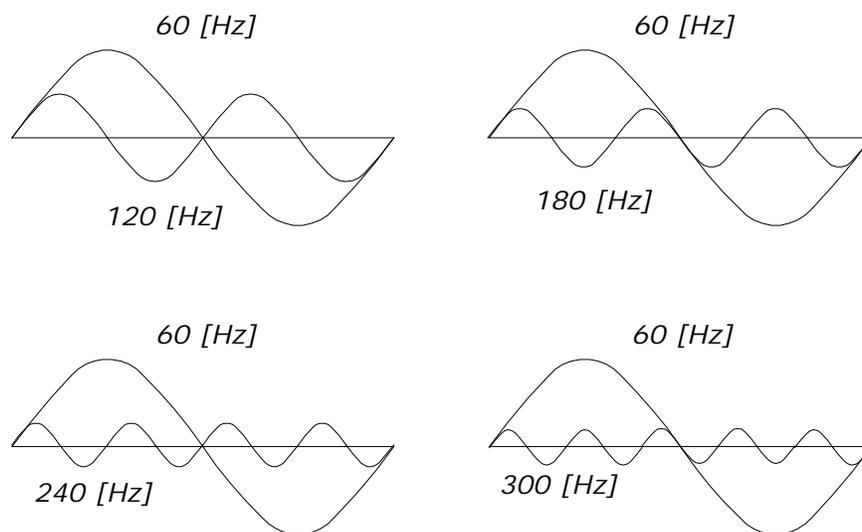
La mayoría de las veces se presentan los problemas en el lado de las cargas (usuarios) y si no se controlan aquí, se transmiten a la red y de aquí a otros usuarios o cargas conectadas a la misma.

Debido a ello, el estudio de los problemas de armónicas no debe ser exclusivo de empresas suministradoras, también debe incluir al sector industrial y desarrollar métodos efectivos para su mitigación. ³

3.2 Definición de armónica

Las armónicas son señales cuya frecuencia es un entero, múltiplo de la frecuencia principal o fundamental. ⁴

Las armónicas se expresan en términos de su orden, es decir, las armónicas de orden segunda, tercera y cuarta, tienen frecuencias de 120, 180 y 240 [Hz] respectivamente. ⁵



Onda senoidal de frecuencia fundamental y sus armónicas

En sistemas de potencia de 60 [Hz], una onda armónica es una senoide que tiene una frecuencia expresada por:⁶

$$F_h = h \times 60 [\text{Hz}]$$

donde h es un entero y representa el orden de la armónica.

La magnitud de la armónica, en por unidad, es igual a:

$$I_h = \frac{I_1}{h}$$

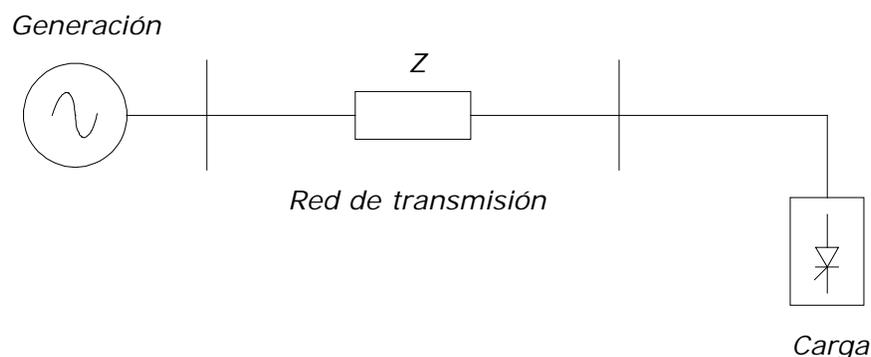
Donde:

- I_h – Magnitud de la corriente armónica (en pu)
- I_1 – Magnitud de la corriente fundamental (en pu)
- h – Orden de la armónica

En la medida en que se incrementa el orden de la armónica, su magnitud y frecuencia disminuyen; por ello, las armónicas de orden inferior tienen mayor repercusión en el sistema de potencia.⁷

Generalmente, la medición de armónicas se realiza en las ondas de corriente en el lado de la carga o usuario y en la onda de tensión en el lado de la red.

La onda distorsionada de corriente en el lado de la carga produce una caída de tensión con la impedancia de la red de transmisión, de manera que se distorsiona la onda de tensión. Por lo tanto, el problema de las armónicas debe controlarse en el punto en donde se genera, de lo contrario se puede transmitir a otros usuarios conectados a la misma red.⁸

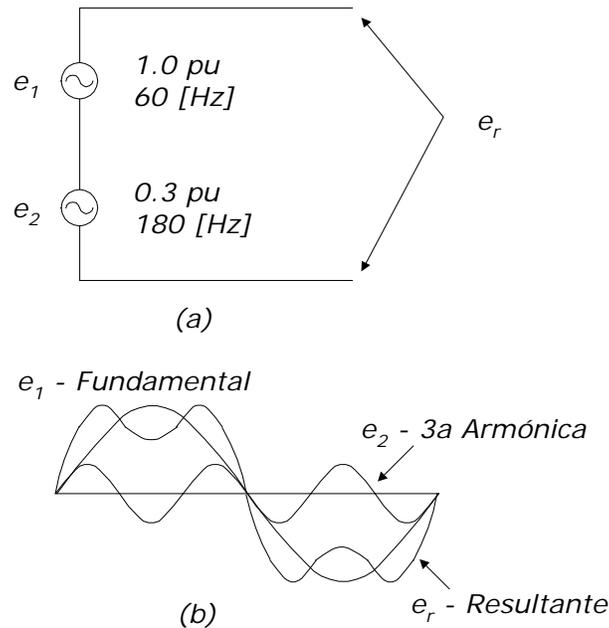


La presencia de armónicas en el sistema eléctrico se puede detectar a través de los efectos que producen⁹, por ejemplo:

- Fusibles fundidos en los bancos de capacitores
- Transformadores y motores eléctricos que se sobrecalientan sin razón aparente
- Operación incorrecta de protecciones

3.3 Distorsión armónica

Cuando las armónicas se combinan con la frecuencia fundamental, ocurre la distorsión de la onda. La distorsión armónica es causada por dispositivos no lineales conectados al sistema de potencia, en los cuales la corriente no es proporcional a la tensión aplicada.¹⁰

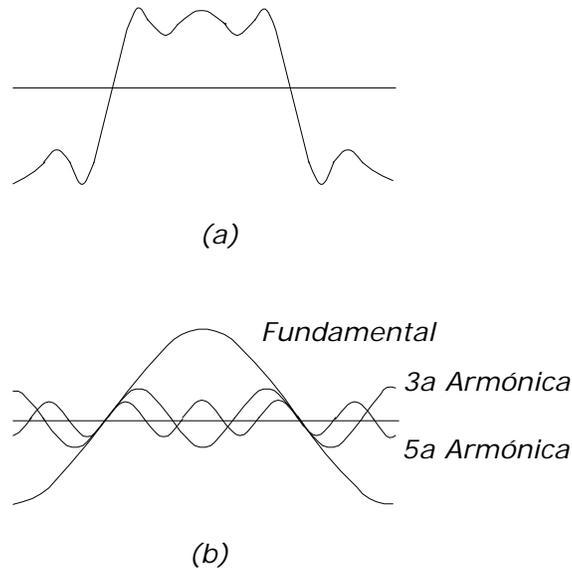


(a) Circuito. (b) Onda distorsionada

3.3.1 Descomposición de una onda distorsionada en sus armónicas

Cuando la forma de onda es idéntica de un ciclo a otro (onda periódica), ésta puede ser representada como una suma de ondas senoidales puras en la cual la frecuencia de cada senoide es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la onda distorsionada. La descomposición una onda periódica en su fundamental y componentes armónicas se fundamenta en el análisis de Fourier.¹¹

Ésta propiedad es de gran utilidad en el análisis de sistemas eléctricos; cada componente senoidal de la onda distorsionada puede analizarse por separado usando métodos de solución de circuitos y después aplicar superposición.



(a) Onda distorsionada. (b) Fundamental y sus componentes armónicas

3.4 Componentes simétricas y secuencia armónica

Los sistemas trifásicos regularmente son analizados utilizando el método de componentes simétricas para simplificar su análisis.¹² El sistema trifásico, representado por tres fasores, se sustituye por la suma de tres sistemas de fasores simétricos: un sistema de secuencia positiva, un sistema de secuencia negativa y un sistema de secuencia cero.¹³

El sistema de secuencia positiva es un sistema trifásico equilibrado representado por tres fasores de igual módulo, con un ángulo de defasamiento de 120° entre ellos y con una secuencia de fase a-b-c (0° , -120° , 120°). El sistema de secuencia negativa tiene las mismas características que el anterior pero con una fase de rotación inversa a-c-b (0° , 120° , -120°). El sistema de secuencia cero se representa por tres fasores de igual módulo y en fase (0° , 0° , 0°).¹⁴

En un sistema trifásico balanceado, la componente de secuencia armónica puede determinarse multiplicando el orden de la armónica por la secuencia de fase positiva. Por ejemplo, para la tercera armónica, $h=3$, se tiene $3 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$, resultando una armónica de secuencia cero ($0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$), conocida también como armónica triple.¹⁵

Existe un patrón que relaciona las armónicas con su respectiva secuencia, donde únicamente se presentan armónicas impares, ya que en un sistema eléctrico no se generan armónicas de números pares. La siguiente tabla muestra la secuencia dominante correspondiente a cada armónica.¹⁶

SECUENCIA DE FASE	POSITIVA	NEGATIVA	CERO
Orden de la armónica	1	5	3
	7	11	9
	13	17	15

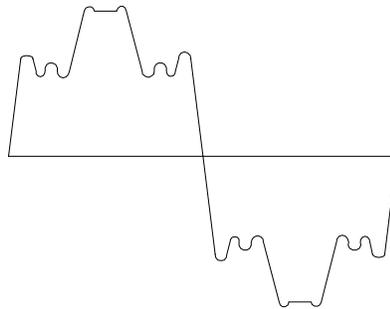
3.5 Distorsión Armónica Total

Este factor expresa la cantidad de distorsión armónica contenida en la onda distorsionada¹⁷ y es determinado por la siguiente ecuación:

$$THD = \frac{\sqrt{\text{Suma de los cuadrados de todas las amplitudes armónicas}}}{\text{Amplitud de la fundamental}} \times 100$$

El THD puede calcularse para tensión o corriente y es utilizado para muchas aplicaciones.

Por ejemplo, considerando la forma de onda de corriente distorsionada de la siguiente figura.



Orden de Armónicas	Frecuencia [Hz]	Amplitud de la Onda Fundamental en PU
Fundamental	60	1 = 1.000
5a	300	1/5 = 0.200
7a	420	1/7 = 0.143
11a	660	1/11 = 0.091
13a	780	1/13 = 0.077

Contenido armónico de una onda distorsionada

Se tiene una distorsión armónica total igual a:

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

3.6 Fuentes de armónicas

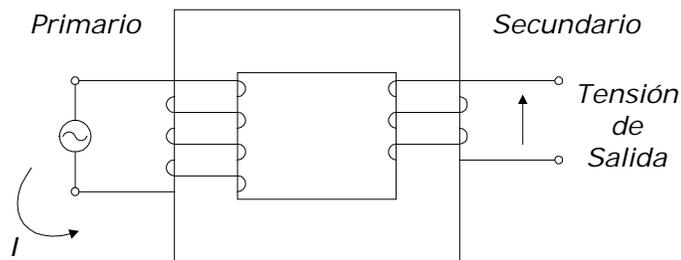
3.6.1 Fuentes tradicionales de armónicas

Antes del incremento de los convertidores estáticos de potencia, el problema de las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia se relacionaba con la operación de transformadores y máquinas rotatorias; incluso, la corriente de excitación requerida por los transformadores de potencia, era la principal fuente generadora de armónicas.¹⁸

En operación estable, estas máquinas no provocan una distorsión considerable en el sistema, sin embargo, cuando operan fuera del rango de especificaciones o hay fluctuaciones de tensión, los niveles de distorsión son significativos. Otras fuentes de armónicas son la iluminación fluorescente y dispositivos de arco.

Transformadores

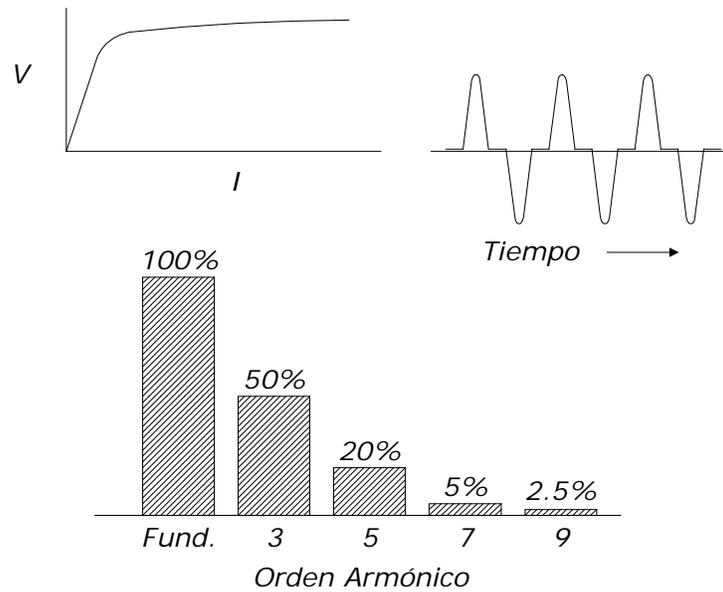
Cuando una tensión senoidal es aplicada al devanado primario del transformador, una pequeña corriente fluirá si el transformador está en vacío. Ésta corriente, conocida como corriente de excitación, es necesaria para establecer el campo magnético en el núcleo del transformador y así, inducir una tensión en el lado secundario.¹⁹



Corriente de excitación en el devanado primario de un transformador

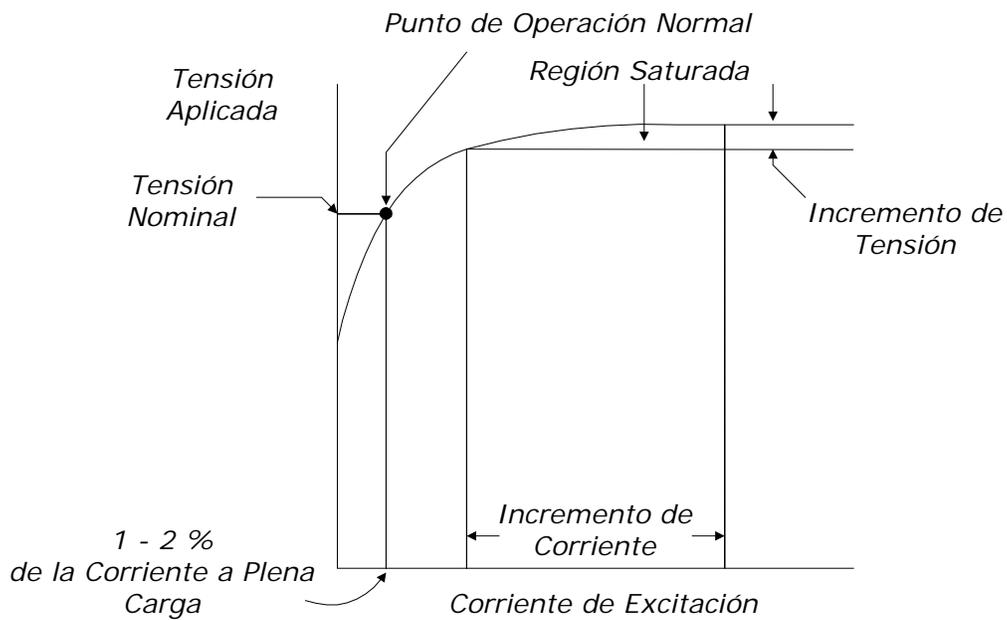
Las pérdidas por histéresis, provocan que la forma de onda de la corriente de excitación demandada por el transformador no sea senoidal. La distorsión de la onda se debe principalmente a la armónica de tercer orden, la cual alcanza el 50% de la corriente a la frecuencia fundamental; el resto de las armónicas (5^a, 7^a y 9^a), repercuten en un grado menor.²⁰

Los transformadores son diseñados para operar con una corriente de excitación del 1 o 2% la corriente nominal a plena carga. Así, aunque los transformadores son numerosos en el sistema de potencia, su corriente de excitación generalmente no causa problemas armónicos.²¹



Distorsión armónica en la corriente de excitación

Cuando la tensión aplicada al transformador es mayor a la nominal, el campo magnético se incrementa al punto donde el núcleo puede alcanzar la saturación. A un ligero incremento de tensión, el núcleo saturado produce un gran incremento en la corriente de excitación incrementándose abruptamente el contenido armónico de la misma.²²



Curva de saturación de un transformador

En una línea que termina en un transformador, energizada con el interruptor de carga abierto, se presenta una sobretensión causada por un transitorio que dura algunos ciclos y una sobretensión de tiempo largo a través de la inductancia de la línea, conocida como efecto Ferranti. Ésta alta tensión provoca la saturación del transformador generando altas corrientes armónicas hasta que la sobretensión sostenida se reduce por el cierre del interruptor de carga.

- **Conexión de transformadores**

En sistemas de distribución se usan transformadores con conexión estrella-estrella para minimizar las fallas monofásicas, no obstante, la corriente de excitación de ésta conexión fluye al sistema de potencia y puede causar distorsión de tensión significativa en el devanado secundario.

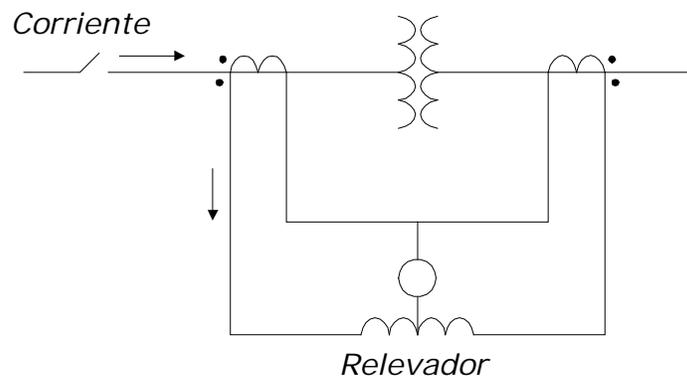
La conexión delta-estrella presenta una trayectoria de baja impedancia para la 3ª armónica de la corriente de excitación en el devanado delta, induciendo una tensión secundaria no distorsionada.²³ Por ésta razón, en plantas industriales es común usar transformadores con conexión delta-estrella.

- **Corrientes de inrush**

La corriente de inrush es una corriente de energización del transformador, que puede ser de 8 o hasta 12 veces la corriente a plena carga hasta por un segundo.²⁴ Después de ese corto tiempo, la corriente de excitación decae a su valor normal de 1 o 2% de la corriente a plena carga.

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

En transformadores de potencia con esquema de protección diferencial, el relevador tiende a operar innecesariamente cuando el transformador es energizado, debido a la corriente de inrush. En este caso, es necesario suministrar un filtro para restringir la 2ª armónica.



Esquema de protección diferencial para transformadores

La electrónica de potencia (EP)

Es una rama de la electrónica que más se ha desarrollado los últimos años, debido al creciente número y variedades de circuitos utilizados en sistemas industriales.

Estos circuitos están fundamentalmente diseñados de la siguiente manera:

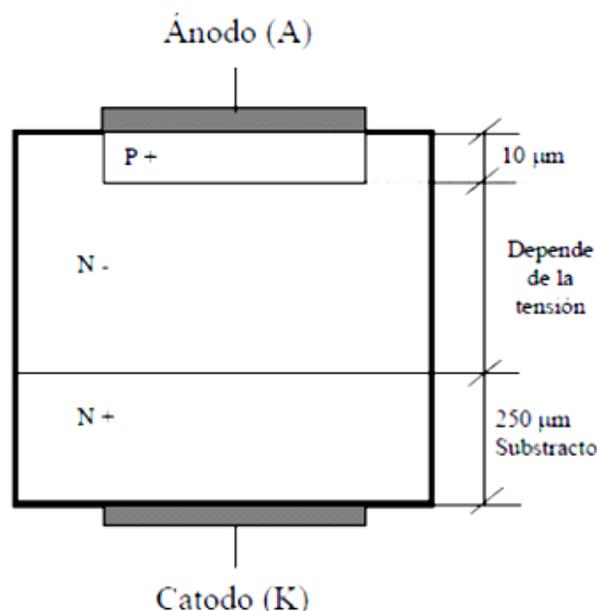
- 1.- Un circuito de Potencia, el cual está compuesto por semiconductores de potencia y elementos pasivos que conecta la fuente de alimentación con la carga.
- 2.-Un circuito de control, este es el encargado de procesar la información proporcionada por la carga o la fuente de alimentación, recibiendo las señales necesarias para conocer las condiciones con la que deben operar los elementos semiconductores y poder administrar la potencia entregada a una carga.

Para poder administrar la potencia a una carga de forma eficiente, los elementos semiconductores deben de permitir el paso de grandes corrientes siendo controlados en momentos precisos, consumiendo una potencia muy reducida y soportando altas tensiones cuando estos elementos se encuentran en su periodo de bloqueo.

Estos se pueden clasificar en 3 grupos de acuerdo a su control:

Dispositivos no controlados:

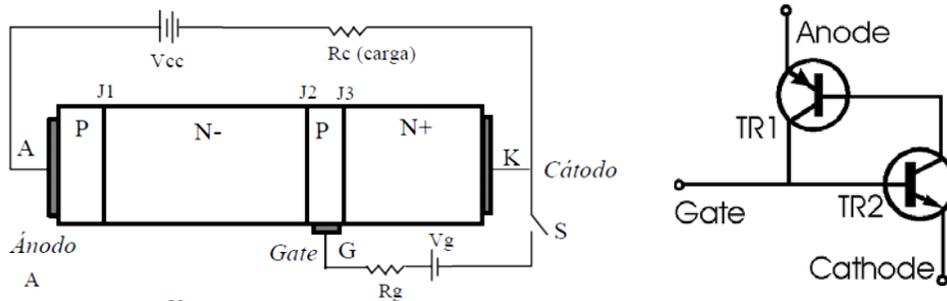
Los diodos los cuales se encuentran formados por la unión de 2 semiconductores del grupo 3 (tipo p) y 5 (tipo n) ,formando un ánodo y cátodo, debido a la presencia de impurezas en estos semiconductores, estos crean una barrera de potencial en su unión ,por lo que solo permite el paso de la corriente, cuando existe un potencial positivo mayor en el ánodo que en el cátodo, provocando una reducción en dicha barrera permitiendo el libre paso de electrones, por lo que se encuentra polarizado en directa , mientras que cuando el potencial del cátodo es mayor que en el ánodo la barrera de potencial aumenta impidiendo el flujo de corriente por lo que se encuentra en polarizado en inversa.



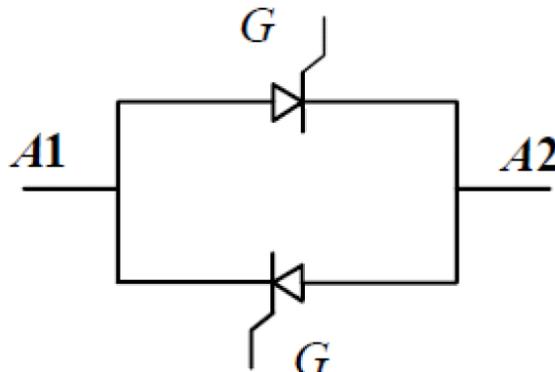
Dispositivos semicontrolados:

En este grupo se encuentran, dentro de la familia de los tiristores, los SCR y los TRIAC. Los SCR están formados por un ánodo, cátodo y la puerta esto es posible mediante la unión de 2 transistores los cuales se retroalimentan por medio de un pulso en la puerta lo cual inicia dicha realimentación, provocando la saturación de los 2 transistores, por lo que idealmente se comportan como un cortocircuito, a diferencia de los diodos estos son capaces de polarizarse en cualquier momento del periodo.

El flujo de corriente entre el ánodo y el cátodo estará determinado por el circuito de potencia, ya que puede ser un circuito de conmutación natural o forzada dependiendo de las necesidades de la carga.



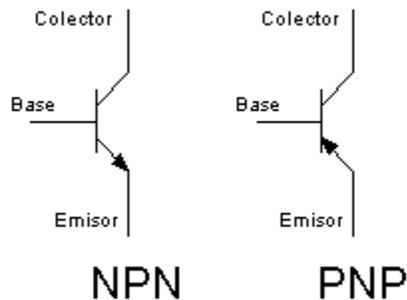
Mientras que el TRIAC esencialmente está formado por 2 tiristores conectados en paralelo y en sentido contrario, estos se encuentran limitados en el uso de grandes potencias ya que manejan voltajes de aproximadamente 1000 V y corrientes de 15 amperes por lo que manejan potencias reducidas.



Dispositivos totalmente controlados:

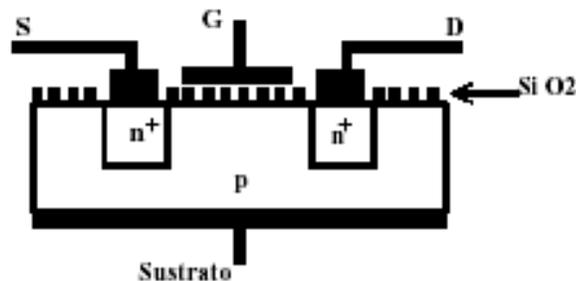
En este se encuentran los transistores bipolares (TBJ), los cuales están formados por semiconductores dopados constituidos por una base, colector y emisor. El emisor está fuertemente dopado y es capaz de inyectar sus electrones libres a la base, mientras que la base pasa los electrones inyectados del emisor al colector, dado que el emisor es la fuente de los electrones, es donde se origina la corriente más grande mientras que la mayor parte del flujo de electrones llega al colector es prácticamente igual a la corriente del emisor.

Para poder polarizar este dispositivo se debe de inyectar una corriente en la base, obteniendo corrientes mayores en el emisor debido a su gran nivel de dopaje.



Transistor Efecto Campo (MOSFET)

Los transistores de efecto campo MOSFET están formados por el drenador, fuente, puerta aislada por una capa de dióxido de Silicio (aislante) y sustrato p. En el modo de vaciamiento positivo, este elemento es capaz de permitir la conducción del drenador hacia la fuente por medio de una fuente de alimentación, atravesando el estrecho canal formado por formado por el estrato p, mientras que la puerta controla la anchura de ese canal, mientras más positiva sea la tensión de la puerta este permitirá un mayor flujo de corriente, mientras que existe una tensión positiva mínima, en la cual la corriente del drenador será interrumpida.



Este elemento tiene una alta impedancia de entrada y es capaz de conmutar aproximadamente a 100 ns. siendo controlado por medio de la puerta.

Las pérdidas de conducción en este dispositivo son mayores cuando las corrientes que fluyen sean mayores, ya que se comporta como un elemento resistivo cuando conduce.

Al operar sobre rangos muy específicos de tiempo, las probabilidades de falla son mínimas, mientras que son muy sensibles a transitorios ya que pueden alcanzar valores máximos de operación por lo que las probabilidades de falla aumentan.

Los IGBT procede esencialmente de la tecnología de los MOSFET, estos están formados por una colector, emisor y puerta el cual se polariza aplicando un voltaje positivo entre la puerta y el emisor, mientras que la salida es una corriente entre los terminales de colector y emisor.

Este dispositivo cuenta con una alta impedancia de entrada y alta velocidad en su conmutación.

El IGBT tiene una caída de voltaje mucho menor mientras su tensión de disrupción mayor que los MOSFET.

Estas son las diferentes características que presenta cada uno de los dispositivos utilizados en la electrónica de Potencia:

DISPOSITIVO	POTENCIA	FRECUENCIA
TIRISTORES	Alta	Baja
GTOs	Alta	Baja
TRIACs	Baja	Baja
MOSFETs	Baja	Alta
BJTs	Media	Media
IGBTs	Media	Alta

Este conjunto de dispositivos se usan de manera variada en los sistemas electrónicos de potencia como por ejemplo:

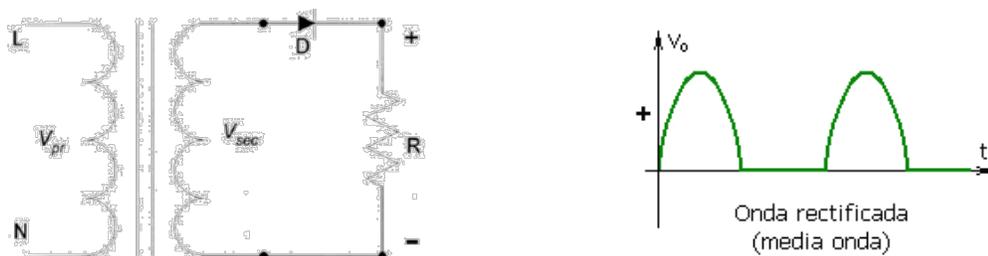
Rectificadores.

Son circuitos encargados de convertir el voltaje bidireccional en un voltaje de corriente directa, estos rectificadores en general son usadas en computadoras, dispositivos electrónicos de consumo.

Rectificadores No Controlados.

Estos hacen el uso de diodos en el caso de un rectificador de media onda lo comprende un transformador el cual está conectado al sistema en el lado de alta, mientras que en el lado de baja el flujo de corriente es controlado por un diodo.

Este se basa en el hecho de que el diodo solo permite el flujo de corriente en una dirección por lo que al ser una carga puramente resistiva habrá conducción solo en el semiciclo positivo de la carga.



Bajo estas condiciones la potencia entregada a la carga será la mitad que en la ausencia del diodo.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^T (V_{max} \text{sen}(\omega t))^2 d\omega t} = \frac{V_{max}}{2}$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{V_{max}}{2R}$$

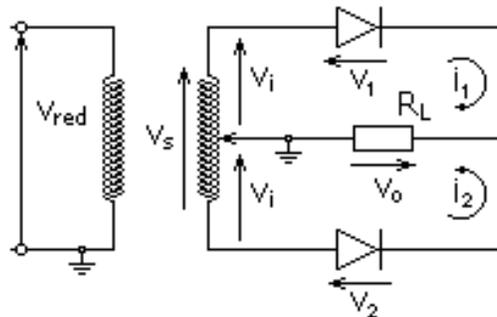
$$P = V_{rms} I_{rms} = \frac{V_{max}^2}{4R}$$

Para evitar una caída abrupta en la carga se conecta un capacitor en paralelo, ya que este es capaz de proporcionar la energía almacenada en el mismo para evitar una caída tan repentina.

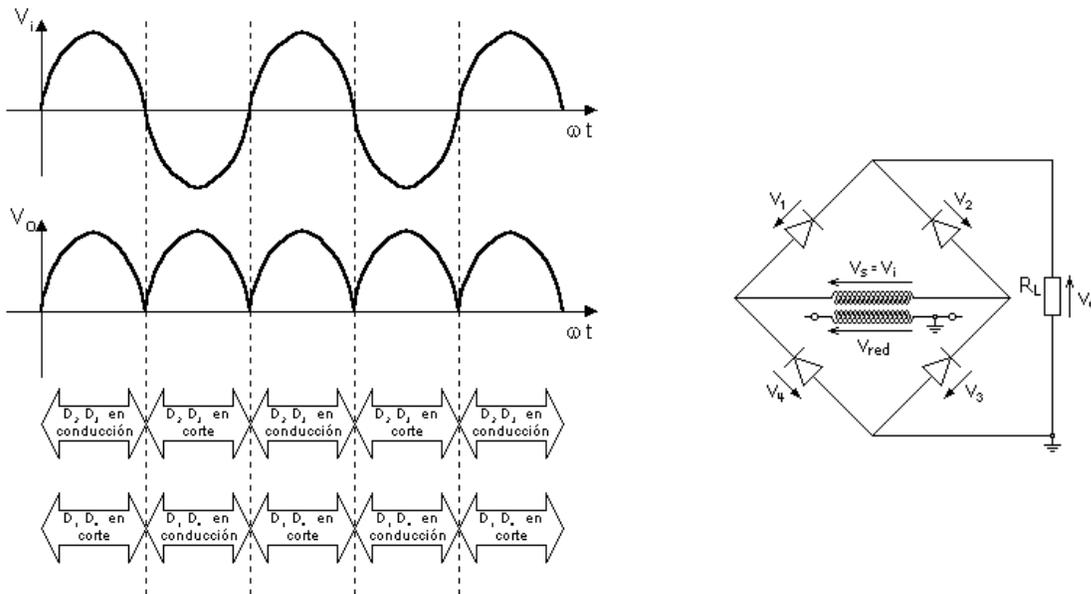
Rectificador monofásico de Onda Completa.

Este circuito utiliza un transformador de devanado secundario con derivación central, por lo que es posible aprovechar los 2 semiciclos provenientes de la fuente por lo que tendrá la una caída de tensión más sutil, mientras se puede reducir el tamaño del rizo aumentando la frecuencia de la fuente.

En este rectificador solo uno de los diodos esta polarizado en el caso del D1 conduce en el semiciclo positivo mientras que el D2 está polarizado en inversa impendo el paso de la corriente y viceversa en el semiciclo negativo.



Otra configuración de Rectificación de onda completa es conocida como el puente H el cual está formado por cuatro diodos en circuitos monofásicos y seis en circuitos trifásicos, sin embargo no es necesario un transformador con tap central para su implementación.



En este caso solo habrá conducción de 2 diodos dependiendo el semiciclo en el que se encuentre la fuente de alimentación, en el semiciclo positivo solo conducirán los diodos D1 y D3 ,mientras que en el semiciclo negativo solo conducirán los diodos D2 y D4 mientras la carga sea puramente resistiva.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} (V_{max} \text{sen}(\omega t))^2 d\omega t} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}R}$$

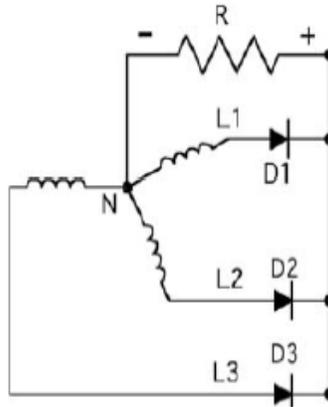
$$P_{rms} = \frac{V_{rms}^2}{R} = \frac{V_{max}^2}{2R}$$

Rectificadores Trifásicos (Media Onda y Onda Completa)

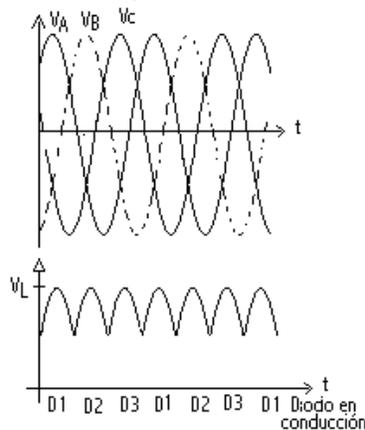
Rectificador Trifásico no controlado de Media Onda.

Las fuentes de voltaje se encuentran conectadas a una misma carga mientras que su conducción se limita por 120 grados con respecto a su periodo y así consecutivamente permitiendo el flujo de corriente por un tercio del periodo, que corresponde a 5.5 ms para sistemas de 60 Hz.

De forma que cada fase aporta corriente mientras su voltaje instantáneo sea mayor que las otras fases de forma alternada, por lo que el flujo de corriente hacia la carga tendrá una sola dirección mientras que los diodos de las fases que no conducen permanecerán polarizados en inversa, por lo que no permiten su conducción.



La rectificación de media onda produce componentes de CD en la fuente de corriente, esto no es recomendable para el uso de grandes potencias.

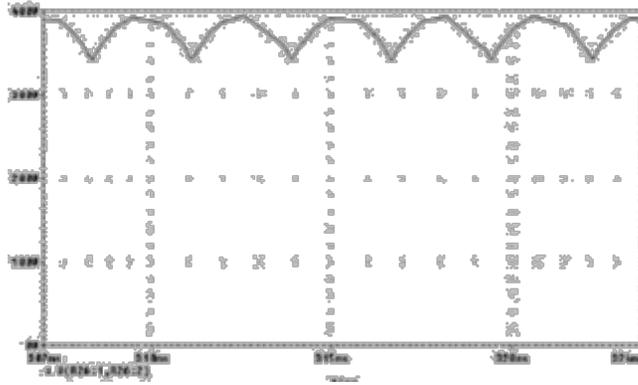
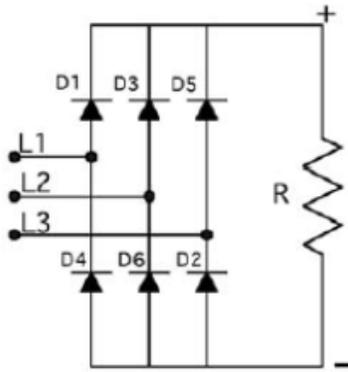


Por lo que habrá 3 pulsos en un ciclo cada uno conformado por cada una de las fases.

Rectificador de Onda Completa.

Se basa en el mismo principio que el rectificador de media onda sin embargo cada fase conduce en los semiciclos positivo y negativo, por lo que habrá 6 pulsos en cada ciclo por lo que el tiempo de conducción de cada fase será de 60 grados eléctricos, por lo que se le conoce como rectificador de 6 pulsos.

La corriente de carga se hace discontinua en una menor cantidad de tiempo por acción de las 3 fases, por lo que a comparación de las rectificaciones anteriores el rizo en el voltaje de salida es mucho menor, mientras que son utilizados para grandes volúmenes de potencia sin embargo esto implica el uso de diodos de mayor tamaño y esta significa una gran fuente de armónicas.

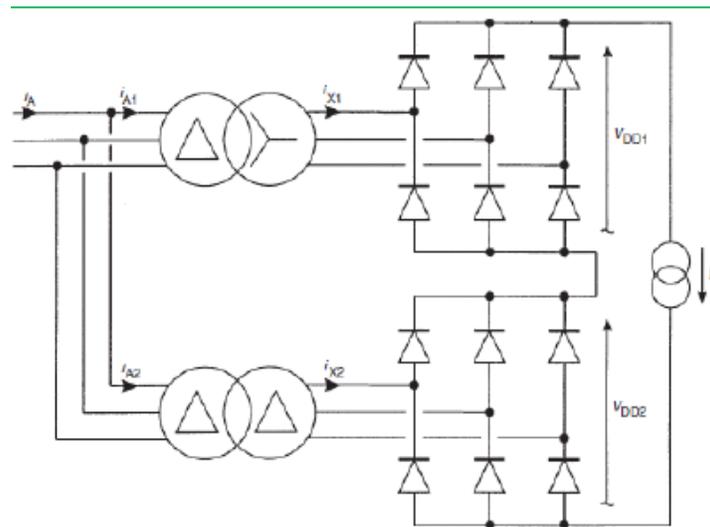


$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi/6} \int_0^{\pi/6} (\sqrt{3}(V_{max} \cos(\omega t)))^2 d\omega t} = \left(\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}\right) V_{max} = 1.6554V_{max}$$

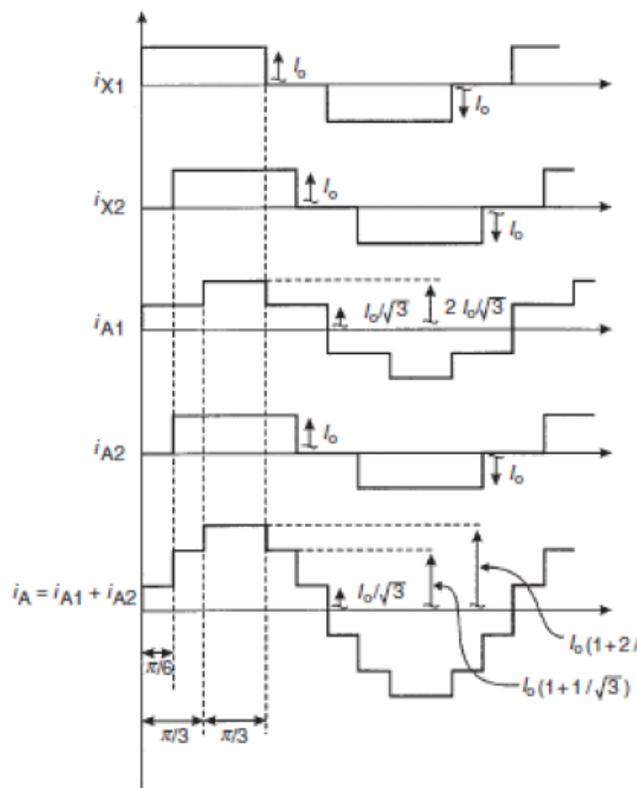
Rectificador trifásico de 12 pulsos.

Esta configuración reduce la ondulación en la tensión de salida, utilizando comúnmente un transformador delta-estrella junto con un transformador delta-delta, sin embargo la relación de vueltas del transformador delta-estrella es $1: \frac{1}{\sqrt{3}}$ por lo que los voltajes secundarios de línea a línea tienen la misma amplitud, sin embargo estos se encuentran adelantados 30 grados con respecto a los voltajes primarios.

El transformador delta-delta tiene una relación de vueltas 1:1 los voltajes y corrientes se encuentran en fase.



Estos 2 transformadores se encuentran en paralelo por lo que en la primera entrada de la línea de cada rectificador, existe un desfase de 30 grados entre las 2 corrientes que fluyen a través de los 2 transformadores donde i_{x1} está adelantada a i_{x2} , en la primera corriente de entrada i_{A1} , está formada por la combinación de 2 corrientes secundarias reflejadas casi cuadradas, $(i_{x1} - i_{x2})/\sqrt{3}$.



Mientras que la corriente i_{A2} es la misma corriente que en el secundario i_{x2} , ya que el transformador tiene una configuración delta-delta.

Por lo que la corriente resultante es $I_A = I_{A1} + I_{A2}$, tiene una forma escalonada multinivel, tiene forma parecida a una senoidal ideal.

Motores y generadores

Como en el transformador, un motor requiere de corriente de excitación del sistema para establecer un campo magnético en su núcleo. No obstante, en el caso de un motor, la curva de saturación es más lineal que la de un transformador.

El tipo de devanado de un motor también influye en la generación de armónicas. Los devanados típicos del motor tienen 5 o 7 ranuras por polo, produciendo corrientes armónicas de orden 5ª y 7ª. Estas armónicas son minimizadas por ajuste de las ranuras.²⁵

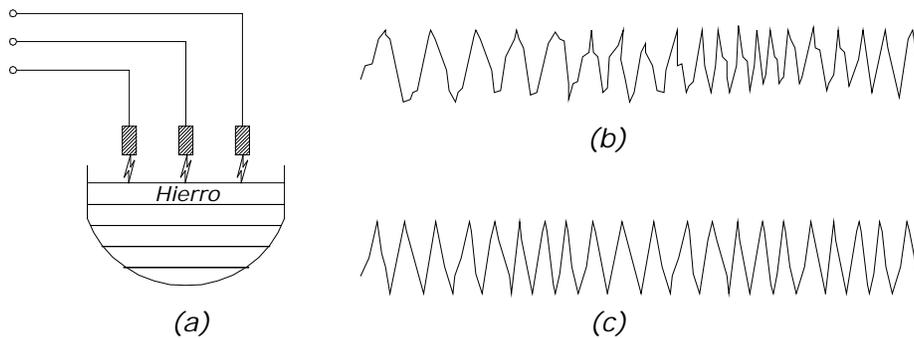
En un generador de corriente alterna, la tensión inducida en el estator es ligeramente distorsionada y contiene una componente dominante de 3ª armónica. Esto causa que fluya corriente de 3ª armónica cuando el generador opera bajo carga.

Las armónicas causadas por motores y generadores no son significativas en comparación con la producción armónica total en el sistema de potencia.

Dispositivos de arco

Esta categoría incluye hornos de arco eléctrico, soldadoras de arco y lámparas de descarga (fluorescentes, vapor de sodio, vapor de mercurio) con balastro electrónico.²⁶ Todos estos equipos tienen un comportamiento no lineal.

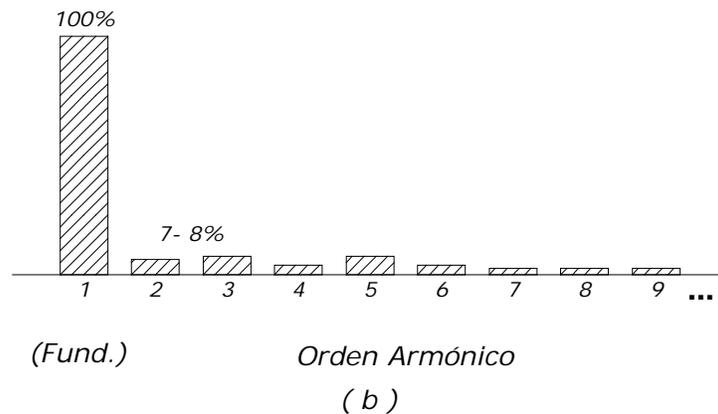
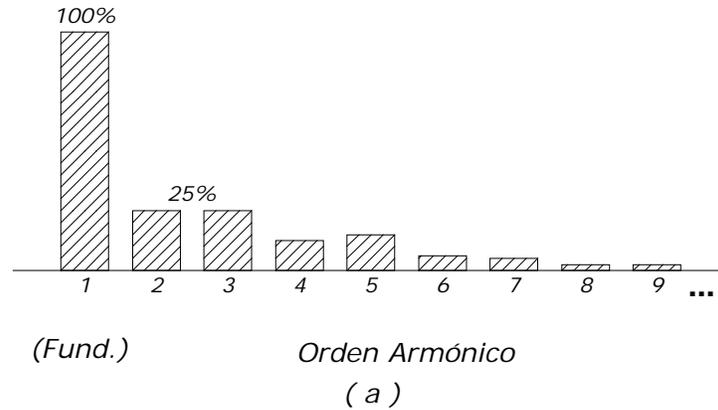
En un horno de arco eléctrico de AC, el acero y otros materiales metálicos son fundidos y refinados por medio de un arco de alta energía. El proceso inicia cuando tres electrodos de grafito, cada uno controlado individualmente, son acercados al horno, haciendo contacto con el acero. Los electrodos son levantados y bajados para regular la corriente de arco; la trayectoria de la corriente es de un electrodo a través del acero a otro electrodo. La corriente que pasa a través del carbón del electrodo al acero tiene una impedancia diferente en la dirección positiva que en la dirección negativa.



(a) Horno de arco. (b) Corriente demandada
(c) Distorsión de tensión en el bus

Durante el proceso de fundición, la tensión decae tanto como la corriente de arco incrementa, limitada únicamente por la impedancia del sistema de potencia, que se ve afectada por la reactancia de los cables del horno y algunas contribuciones del transformador que lo alimenta.²⁷ El resultado de las variaciones de la tensión de arco produce todas las armónicas.

Cuando la chatarra está siendo fundida, la 2ª y 3ª armónicas son dominantes. En el proceso de refinación, la superficie del metal es relativamente uniforme y el arco es más estable, predominando todavía la 2ª y 3ª armónicas pero con magnitudes reducidas al 7 u 8% de la magnitud de corriente fundamental.²⁸



*Armónicas producidas durante la operación de un horno de arco
(a) Período inicial de fundición. (b) Período de refinación*

Los dispositivos de arco con mayor producción de armónicas son, probablemente, cargas de alumbrado, las cuales tienen mayor presencia en el sistema de potencia. Sin embargo, los hornos de arco causan los problemas más severos porque representan una fuente armónica de gran capacidad, concentradas en un solo lugar.

Alumbrado fluorescente

Son lámparas de descarga que requieren un balastro para suministrar una alta tensión e iniciar la descarga de la corriente entre los dos electrodos del tubo a través de vapor o gas. Una vez que la descarga es establecida, la tensión disminuye y la corriente de arco se incrementa. El balastro reduce rápidamente la corriente hasta obtener la iluminación especificada. De esta forma, el balastro es también un limitador de corriente.²⁹

Las armónicas generadas incluyen una fuerte componente de 3ª armónica, porque el balastro es un dispositivo ferromagnético que requiere corriente de excitación la cual contiene armónicas de tercer orden.



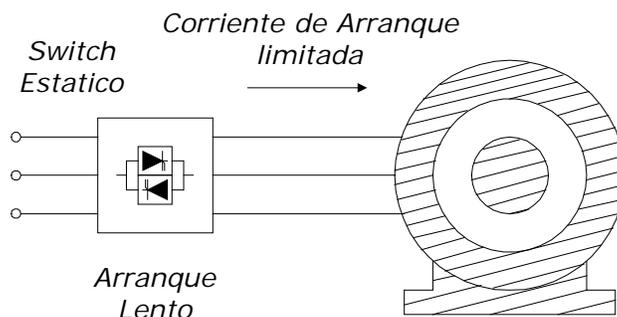
Corriente demandada por una lámpara fluorescente

La creciente demanda de sistemas eficientes de iluminación, debido a programas de ahorro de energía, ha incrementado el uso de éstas lámparas, provocando una fuerte inyección de armónicas a la red de distribución.

3.6.2 Nuevas fuentes de armónicas

Controladores de tensión

Estos dispositivos generan armónicas por su mecanismo de control. Por ejemplo, los arrancadores a tensión reducida tienen un switch de tiristores que limita la corriente de arranque demandada por el motor, disminuyendo la tensión durante el arranque. La tensión aplicada al motor es controlada por la variación en el ángulo de encendido de los tiristores del switch.



Arrancador a tensión reducida

Sólo operan por un corto tiempo (durante el arranque del motor), de tal manera que no causan grandes problemas de armónicas.

Compensadores estáticos de vars

El compensador estático de vars (SVC) controla la tensión por el ajuste de la cantidad de potencia reactiva suministrada o absorbida del sistema. Utiliza reactores y capacitores controlados por tiristores. El SVC puede cambiar la magnitud y dirección del flujo de vars muy rápidamente en respuesta a las necesidades de carga.

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

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

3.7 Características de la respuesta del sistema

3.7.1 Impedancia del sistema

Cuando un circuito es excitado por una fuente de tensión que es una función senoidal del tiempo a una determinada frecuencia, circula una corriente cuya amplitud y ángulo de fase dependen de la tensión aplicada, de los elementos que lo constituyen y de la frecuencia.³⁰

La representación compleja de las funciones senoidales de corriente y tensión permite relacionarlas mediante la impedancia del circuito. Ésta relación constituye la ley de Ohm en forma generalizada.

Para el caso de un circuito formado por una resistencia, inductancia y capacitancia, la impedancia se expresa como:³¹

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

Los sistemas eléctricos de potencia, a la frecuencia fundamental, son considerados primeramente inductivos y la impedancia equivalente en algunas ocasiones es llamada reactancia de corto circuito; debido a que los efectos capacitivos son despreciados frecuentemente en los sistemas de distribución y en los sistemas eléctricos industriales.³²

Una de las cantidades más utilizadas en el análisis de armónicas en los sistemas eléctricos es la impedancia de corto circuito en el punto de la red donde un capacitor es localizado. Cuando no se tiene disponible en forma directa, se puede calcular a partir de los estudios de corto circuito, expresados en MVA o por medio de la corriente de corto circuito.³³

$$Z_{CC} = R_{CC} + jX_{CC} = \frac{kV^2}{MVA_{CC}} = \frac{kV \times 1000}{\sqrt{3}I_{CC}}$$

Donde:

- Z_{CC} – Impedancia de corto circuito
- R_{CC} – Resistencia de corto circuito
- X_{CC} – Reactancia de corto circuito
- kV – Tensión entre fases en [kV]
- MVA_{CC} – Potencia de corto circuito trifásico en [MVA]
- I_{CC} – Corriente de corto circuito en [A]

La impedancia de corto circuito es una cantidad fasorial que consiste tanto de resistencia como de reactancia. Si el valor de corto circuito no contiene información de fase, puede asumirse que la impedancia es puramente reactiva.

Como la porción de reactancia inductiva de la impedancia cambia linealmente con la frecuencia, es necesario ajustar la reactancia al valor de la frecuencia; la reactancia de la h armónica es determinada a partir de la reactancia a la frecuencia fundamental X_1 ,³⁴ esto es:

$$X_h = hX_1$$

En la mayoría de los sistemas eléctricos puede asumirse que la resistencia no cambia significativamente cuando se estudian los efectos de las armónicas menores a las de noveno orden.

En los sistemas eléctricos de potencia industriales, la reactancia equivalente del sistema está regularmente dominada por la impedancia del transformador; lo cual permite aproximar la reactancia de corto circuito a la impedancia del transformador.³⁵

3.7.2 Impedancia capacitiva

Los capacitores por sí solos no generan armónicas, sin embargo, algunas distorsiones armónicas pueden atribuirse a su presencia.³⁶

Los capacitores en derivación, conectados en el lado del usuario para corregir el factor de potencia, o bien, en la red de distribución para control de tensión, alteran la impedancia del sistema con la variación de la frecuencia. Mientras la reactancia inductiva incrementa proporcionalmente con la frecuencia, la reactancia capacitiva decrece debido a que:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Donde la capacitancia C está dada en farads;³⁷ no obstante, los capacitores son especificados en términos de su potencia, por lo cual éste parámetro es calculado en base a ella y a la tensión aplicada. La reactancia capacitiva de línea a neutro para un banco de capacitores puede determinarse de la siguiente manera:

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

3.7.3 Resonancia paralelo

La resonancia paralelo ocurre cuando la reactancia inductiva X_L es igual a la reactancia capacitiva X_C ;³⁸ la frecuencia a la cual ocurre éste fenómeno es llamada frecuencia de resonancia.

Cuando la reactancia inductiva y capacitiva del sistema entran en resonancia con alguna armónica generada por una carga no lineal, esa corriente armónica excitará al circuito generando una corriente amplificada que oscila entre la energía almacenada en la inductancia y el capacitor.

La característica de un circuito resonante paralelo es una alta impedancia al flujo de la corriente armónica a la frecuencia de resonancia.³⁹

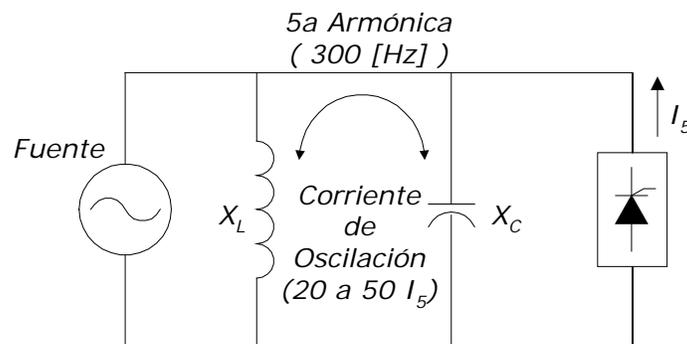
En el análisis de los sistemas eléctricos, la frecuencia a la cual ocurre la resonancia paralelo puede ser calculada con la siguiente ecuación:⁴⁰

$$f_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVAR_{cap}}}$$

Donde:

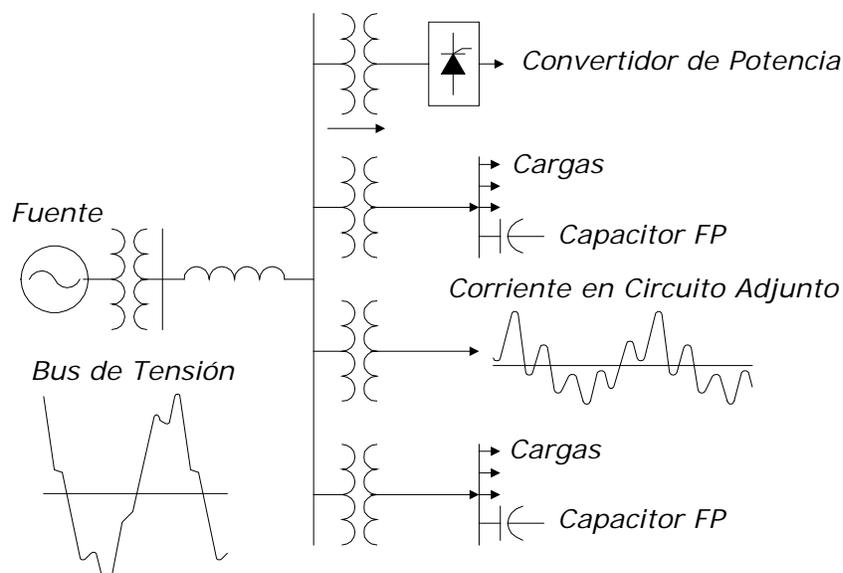
- f_r – Frecuencia de resonancia
- X_C – Reactancia capacitiva a la frecuencia fundamental
- X_L – Reactancia inductiva a la frecuencia fundamental
- MVA_{CC} – MVA de corto circuito del sistema
- $MVAR_{cap}$ – MVAR de los capacitores

Por ejemplo, en el circuito mostrado, la frecuencia de resonancia es cercana a 300 [Hz] (5ª armónica) y se generan armónicas de quinto orden en el convertidor estático de seis pulsos; la corriente armónica excita al circuito resonante presentándose una impedancia muy grande al flujo de la misma.



Circuito típico de resonancia paralelo

La resonancia paralelo y la corriente de 5ª armónica producen una tensión armónica grande en el bus y una corriente de oscilación que puede ser de 20 a 50 veces la magnitud de la corriente armónica que originalmente excita al circuito.



Propagación de corriente armónica a través del sistema

La corriente amplificada podría fundir fusibles del banco de capacitores. La tensión distorsionada del bus podría causar el flujo de corrientes distorsionadas en los circuitos adyacentes y afectar a cargas remotas de la fuente armónica y del circuito.

3.7.4 Resonancia serie

La resonancia serie ocurre cuando una reactancia inductiva y una reactancia capacitiva que están en serie son iguales a alguna frecuencia.⁴¹ Si la frecuencia de resonancia corresponde a la frecuencia de una armónica característica, el circuito LC atraerá una gran cantidad de la corriente armónica generada en el sistema de distribución.⁴²

Por lo tanto, el sistema ofrece una impedancia muy baja al flujo de corrientes armónicas de frecuencia igual a la de resonancia.⁴³

Bajo estas condiciones, la impedancia del circuito resonante serie puede ser utilizada para absorber corrientes armónicas deseadas.⁴⁴

3.8 Normatividad sobre el problema de armónicas

3.8.1 Norma IEEE Std. 519-1992

La norma es aplicable para límites de distorsión de corriente y tensión. La filosofía de la norma implica dos puntos importantes:⁴⁵

- Los usuarios deben responsabilizarse para limitar la cantidad de corrientes armónicas inyectadas al sistema de potencia.
- Las compañías suministradoras deben limitar la distorsión de tensión y suministrar una tensión de calidad al usuario.

Los límites dados en las tablas son usados como valores de diseño del sistema en condiciones de operación normal, las cuales no son mayores de una hora. Para períodos cortos, por ejemplo, en condiciones de arranque de motores, los límites pueden ser excedidos en un 50%. (Ver anexo A)

Los límites de tensión y corriente armónica son aplicados en el punto de acoplamiento común. Éste es el punto donde otros usuarios comparten el mismo bus o donde nuevos usuarios pueden ser conectados en el futuro. El estándar asigna los límites de inyección de corriente armónica basado en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia, el cual es definido por su capacidad de corto circuito.⁴⁶

3.8.2 Especificación CFE L0000-45-2005

Esta especificación se refiere a las desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica.

Las tablas indican las desviaciones máximas permisibles indicadas en la especificación, aplicables tanto al suministrador como al consumidor que se encuentren conectados a la red eléctrica de CFE. (Ver anexo A)

3.9 Efectos de las armónicas

Las corrientes armónicas producidas por las cargas no lineales e inyectadas a los sistemas de potencia pueden interactuar adversamente con gran parte del equipo, provocando pérdidas adicionales, sobrecalentamiento y sobrecarga.⁴⁷

La distorsión armónica en la red de corriente alterna puede ocasionar inconvenientes tales como:

- Exceso de corriente en capacitores y bancos de capacitores, con el consiguiente acortamiento de su vida útil. Actuación indebida de fusibles.
- Disparo intempestivo de interruptores y otros equipos de protección.
- Actuación indebida de fusibles.
- Aumento de las pérdidas y mal aprovechamiento de la instalación.
- Sobrecalentamiento de motores, transformadores y componentes del circuito en general.
- Mal funcionamiento de computadoras y otros equipos electrónicos de control y/o cargas sensibles.
- Interferencia con circuitos de iluminación y telefónicos.
- Resonancia con otros componentes del sistema.
- Oscilación mecánica en máquinas.
- Errores en equipos de medición, especialmente los de estado sólido.
- Operación inestable en el disparo de circuitos que trabajan por cruce por cero de tensión.
- Disminución del factor de potencia.
- Fallas en el aislamiento.

Los efectos de las armónicas pueden dividirse en tres categorías generales: efectos en el sistema de potencia, efectos en las cargas y efectos en los circuitos de comunicación.⁴⁸

3.9.1 Efectos en el sistema de potencia

En el sistema de potencia, las corrientes armónicas son las culpables del sobrecalentamiento, disminución de la vida útil del equipo y registro inadecuado de los equipos de monitoreo. Además, también pueden causar distorsiones de tensión.⁴⁹

El impacto es mayor cuando por resonancias en la red se amplifican dichas corrientes armónicas.

3.9.2 Efectos en las cargas

Motores y generadores

La disminución de la eficiencia, junto con el calentamiento, vibración y ruido audible son indicadores de distorsión armónica de tensión.⁵⁰

La aplicación de tensión distorsionada al motor resulta en pérdidas adicionales en su núcleo. Las pérdidas por histéresis se incrementan con la frecuencia y las pérdidas debidas a corrientes parásitas aumentan como el cuadrado de la frecuencia; además las corrientes armónicas producen pérdidas adicionales I^2R en los devanados del motor.⁵¹

Otro efecto debido a las armónicas, es la oscilación en el torque. Las armónicas que más predominan en los sistemas de potencia son la 5ª y la 7ª. La 5ª armónica es una armónica de secuencia negativa, cuyo campo magnético gira en dirección opuesta a la de la frecuencia fundamental y cinco veces más rápido. La 7ª armónica es de secuencia positiva, su campo magnético gira siete veces más rápido que el de la fundamental y en la misma dirección. El efecto neto es un campo magnético que gira a una velocidad relativa de seis veces la velocidad del rotor, induciendo corrientes en el rotor cuyo valor de frecuencia es seis veces la frecuencia fundamental. La interacción de los campos magnéticos y las corrientes inducidas en el rotor producen oscilaciones en el motor.⁵²

Transformadores

Los transformadores son diseñados para entregar la potencia requerida a las cargas conectadas con el mínimo de pérdidas, a la frecuencia fundamental. La distorsión armónica de corriente, particularmente, provoca un calentamiento adicional en el transformador.⁵³

Los efectos que resultan del calentamiento del transformador cuando la corriente de carga incluye componentes armónicas son:

- Incremento en la corriente RMS. Si el transformador es dimensionado solo para la potencia en kVA requerida, las corrientes armónicas pueden hacer que la corriente RMS sea mayor que su capacidad, provocando pérdidas en los conductores.
- Pérdidas por corrientes parásitas. Las corrientes parásitas son corrientes inducidas que fluyen en los devanados, en el núcleo y en otras partes conductoras del transformador sujetas a su campo magnético y causan un calentamiento adicional.
- Pérdidas en el núcleo. La distorsión armónica puede incrementar las corrientes parásitas en las laminaciones del núcleo. El incremento de las pérdidas debido a la

presencia de armónicas dependerá del efecto de las armónicas en la tensión aplicada y del diseño del transformador.⁵⁴

Otros problemas incluyen posibles resonancias entre la inductancia del transformador y la capacitancia del sistema, estrés en los aislamientos y pequeñas vibraciones en el núcleo.

Bancos de capacitores

El principal problema en los capacitores debido a las armónicas, es el daño que sufren en condiciones de resonancia.⁵⁵

Debido a que la reactancia de un banco de capacitores es inversamente proporcional a la frecuencia, éste actúa como un sumidero para corrientes armónicas de mayor frecuencia. Dicho efecto incrementa el estrés en el dieléctrico y calentamiento. El problema no es el calentamiento, sino el estrés en el dieléctrico, ya que las tensiones armónicas se agregan a la tensión de pico fundamental. Entonces, el dieléctrico es expuesto a tensiones mayores que las de diseño, resultando en la disminución de su vida útil.⁵⁶

Cables de potencia

El flujo de una corriente no senoidal en un conductor causa pérdidas adicionales a las esperadas por el valor RMS de la forma de onda. Esto se debe al fenómeno conocido como efecto piel, el cual provoca que la resistencia del conductor sea mayor para corrientes de AC que para corrientes de DC, especialmente en conductores largos. Tanto el efecto piel como el tamaño del conductor dependen de la frecuencia. Cuando una corriente rica en armónicas fluye en el cable, la resistencia equivalente se incrementa aún más, incrementándose las pérdidas I^2R .⁵⁷

Sistemas de control

Aunque la distorsión de tensión es tomada en cuenta en el diseño de sistemas de control, la distorsión armónica puede alterar los parámetros de encendido, afectando considerablemente su operación.

Equipos de medición

Un wattorímetro es esencialmente un pequeño motor acoplado a un disco metálico.

La corriente en fase con la tensión, demandados por la carga, fluyen a través de bobinas del medidor, produciendo un par en el disco que tiende a hacerlo girar. El consumo de energía es medido por la acumulación del número de vueltas del disco sobre un período de tiempo.⁵⁸

El par desarrollado en el disco es sensible a la frecuencia; a frecuencias más altas que la fundamental, el par disminuye, causando una lenta rotación del disco y en consecuencia una lectura errónea de la energía consumida.

Las componentes armónicas regularmente son bastante pequeñas comparadas con la componente de frecuencia fundamental, así éste error de medición es generalmente despreciable. Estudios recientes sobre el efecto de las corrientes armónicas en medidores

y otros instrumentos muestran que un factor de distorsión de cuando menos el 20% es requerido para tener un error significativo.⁵⁹

Dispositivos de protección

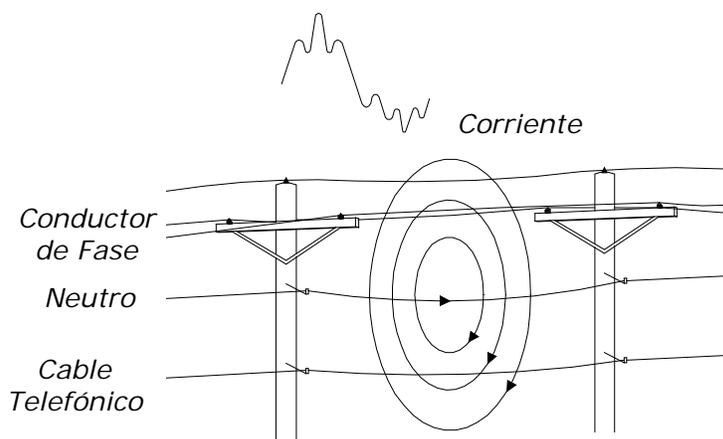
La presencia de armónicas en los sistemas eléctricos puede influir en la operación de los relevadores de protección provocando disparos indeseables. Los relevadores que dependen de la tensión de cresta o del cruce por cero de la tensión o corriente son afectados por la distorsión armónica en la forma de onda.⁶⁰ Un estudio canadiense documenta los siguientes efectos:

- Un relevador electromecánico puede operar más rápido o más lento que el tiempo de operación esperado para la frecuencia fundamental.
- Los relevadores estáticos de baja frecuencia y relevadores de sobretensión y sobrecorriente son susceptibles a cambios en las características de operación.
- Dependiendo del contenido armónico, el para de los relevadores puede ser revertida.

Se requieren niveles de distorsión armónica entre el 10 y 20% para que se presenten problemas con la operación de los relevadores. Estos niveles son mucho mayores que los tolerados en el sistema de potencia.⁶¹

3.9.3 Efectos en los circuitos de comunicaciones

El flujo de corrientes armónicas en los conductores de los sistemas de distribución induce tensiones que caen dentro del ancho de banda de los sistemas de telefonía. Las armónicas triples son particularmente problemáticas en sistemas de cuatro hilos; ya que tienen una secuencia cero, lo cual implica que están en fase con los conductores de las tres fases y que se agreguen directamente al neutro del circuito, el cual está más cercano al circuito de comunicación.⁶²



Tensiones inducidas en los circuitos de telefonía

Las corrientes armónicas del sistema eléctrico se acoplan a los circuitos de comunicación ya sea por inducción o por conducción directa. Éste fue un grave problema en tiempos pasados; hoy en día, predominan los cables de comunicaciones de par trenzado con apantallamiento que disminuyen significativamente dicho efecto.

3.10 Referencias

- ¹ ENRÍQUEZ, Gilberto H. *“El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica”*. México, Limusa, 1999, p. 78
- ² DUGAN, Roger C. (et al). *“Electrical Power Systems Quality”*. 2da. Ed., USA, Mc Graw Hill, 1996, p. 168
- ³ Enríquez, op. cit., p. 20
- ⁴ Dugan, op. cit., pp. 25-27
- ⁵ Enríquez, op. cit., p. 75
- ⁶ IEEE Std 141-1993, *“Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants”*, pp. 445-446
- ⁷ Enríquez, op. cit., p. 75-76
- ⁸ Dugan, op. cit., pp. 171-172
- ⁹ BURKE, James J. *“Power Distribution Engineering: Fundamentals and applications”*. USA, Marcel Dekker Inc, 1994, p. 288
- ¹⁰ Ibidem, p. 168
- ¹¹ Ibidem, p. 169 e IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 447
- ¹² Ibidem, p. 178
- ¹³ VIQUEIRA, Jacinto, L. *“Redes Eléctricas”* Tomo II. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2004, p. 19
- ¹⁴ Ibidem, pp. 19-21
- ¹⁵ Dugan, op. cit., pp. 178-179
- ¹⁶ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 448
- ¹⁷ Dugan, op. cit., pp. 181-182
- ¹⁸ Enríquez, op. cit., pp. 78-79
- ¹⁹ Ibidem, p. 79
- ²⁰ DAS, J. C. *“Power System Analysis: Short circuit load flow and harmonics”*. USA, Marcel Dekker Inc, 2002, pp. 560-564 y Enríquez, op. cit., p. 79
- ²¹ ARRILLAGA, J. y Watson, Neville R. *“Power System Harmonics”*. 2da. Ed., Gran Bretaña, John Wiley & Sons Ltd, 2003, p. 62
- ²² Burke, op. cit., pp. 285-286
- ²³ Das, op. cit., p. 562; Arrillaga, op. cit., pp. 62-63 y Dugan, op. cit., p. 196
- ²⁴ Das, op. cit., p. 562
- ²⁵ Arrillaga, op. cit., pp. 69-70
- ²⁶ Dugan, op. cit., pp. 194-195
- ²⁷ Ibidem, p. 195 y Arrillaga, op. cit., p. 74
- ²⁸ Idem y Das, op. cit., pp. 582-583
- ²⁹ Dugan, op. cit., p. 186
- ³⁰ VIQUEIRA, Jacinto, L. *“Redes Eléctricas”* Tomo I. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2004, p. 34
- ³¹ Ibidem, p. 35
- ³² Dugan, op. cit., p. 199
- ³³ Ibidem, pp. 199-200
- ³⁴ Ibidem, p. 200
- ³⁵ Ibidem, p. 201
- ³⁶ Idem
- ³⁷ Ibidem, pp. 201-202
- ³⁸ IEEE Std 141-1993, op. cit., pp. 456-457
- ³⁹ Dugan, op. cit., p. 203
- ⁴⁰ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 457
- ⁴¹ Idem
- ⁴² Dugan, op. cit., p. 206
- ⁴³ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 457
- ⁴⁴ Dugan, op. cit., p. 207
- ⁴⁵ Ibidem, p. 282
- ⁴⁶ Ibidem, p. 283
- ⁴⁷ Ibidem, p. 210
- ⁴⁸ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 458

⁴⁹ Ibidem, pp. 458-459

⁵⁰ Dugan, op. cit., pp. 215-216

⁵¹ SANKARAN, C. *"Power Quality"*. USA, CRC Press, 2002, p. 94

⁵² Idem

⁵³ Dugan, op. cit., pp. 211-213

⁵⁴ Ibidem, pp. 212-213 y Arrillaga, op. cit., p. 153

⁵⁵ Das, op. cit., p. 608

⁵⁶ Sankaran, op. cit., p. 95 e IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 462

⁵⁷ Das, op. cit., p. 607; Sankaran, op. cit., p. 99 e IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 461

⁵⁸ Dugan, op. cit., p. 218

⁵⁹ IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 462 y Das, op. cit., p. 615

⁶⁰ Das, op. cit., p. 615

⁶¹ Idem e IEEE Std 141-1993, op. cit., p. 463

⁶² Dugan, op. cit., pp. 216-217

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.

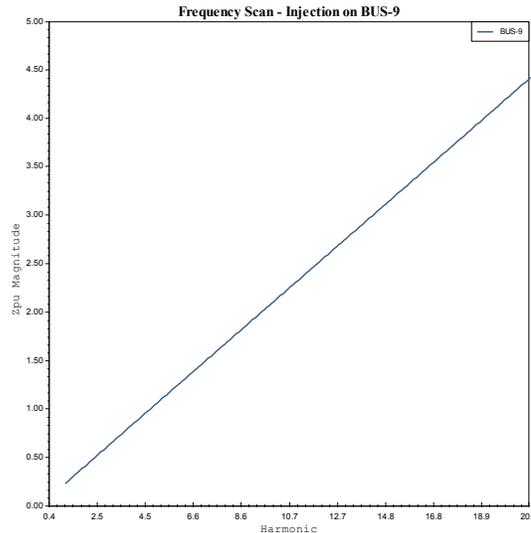
Sin embargo estos compensadores inherentemente incrementan las armónicas en el sistema, los cuales pueden ser suprimidos internamente o pueden ser filtrados esto se da por la siguiente razón:

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:

$$X_l = \omega l$$

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

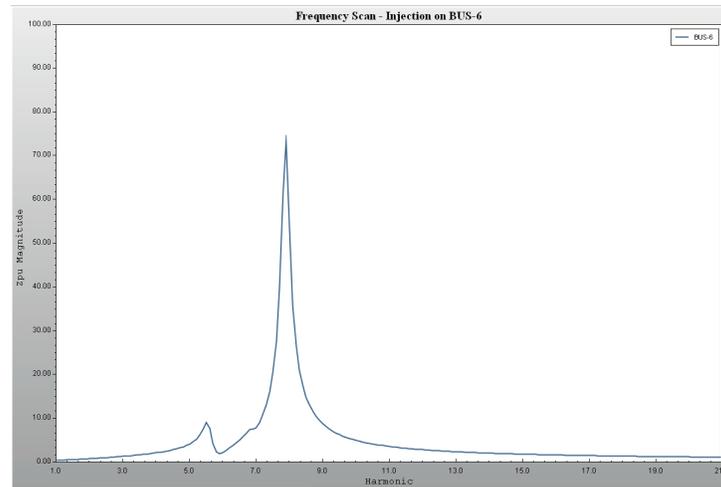
$$X_l \parallel X_c = \frac{(X_l)(X_c)}{X_l - X_c}$$

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:

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

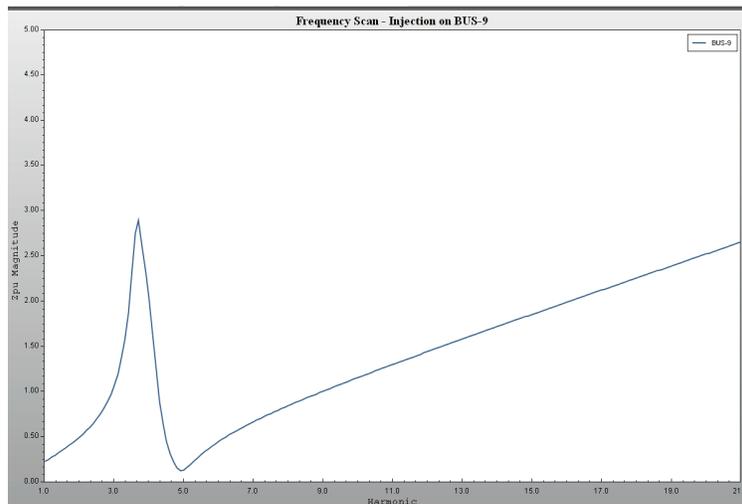
Donde la inductancia (L) representa la red equivalente, mientras la (C) representa la capacitancia equivalente del banco de capacitores, donde se conectan al bus por lo que podemos también calcular la frecuencia de resonancia con la siguiente expresión:

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

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.



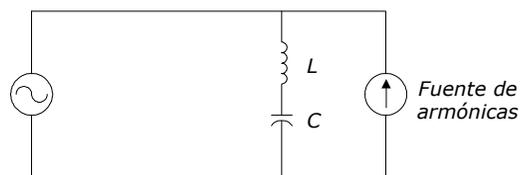
La aplicación de estos dispositivos cumple diferentes propósitos; unos son para bloquear el flujo de las corrientes armónicas hacia cargas sensibles, a pesar de seguir circulando por la red, mientras alimenta de potencia reactiva a la carga.

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

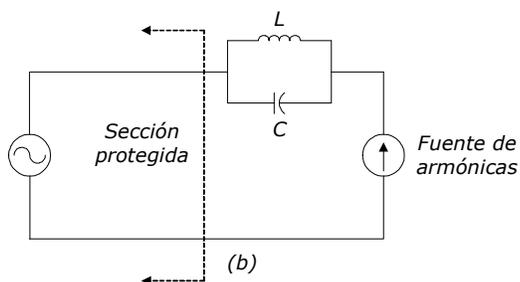
Por lo tanto, la aplicación de filtros no elimina corrientes armónicas, únicamente desvía o controla el flujo de corriente armónica en el sistema de potencia.

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

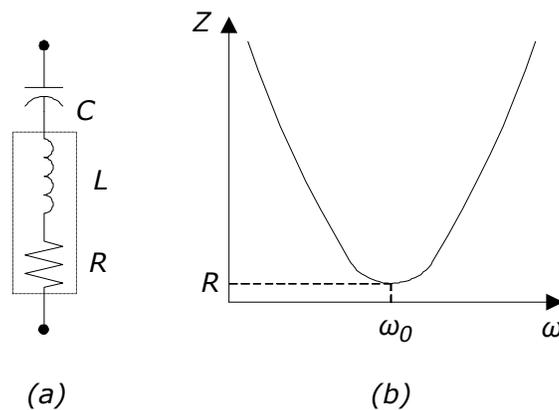
4.2.1 Filtros en derivación

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:

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

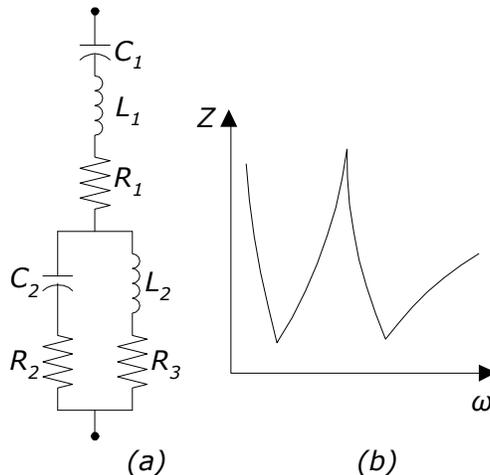
Por lo que al conectar en serie estas 2 reactancias se anulan, ya que estas tienen signos contrarios,

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

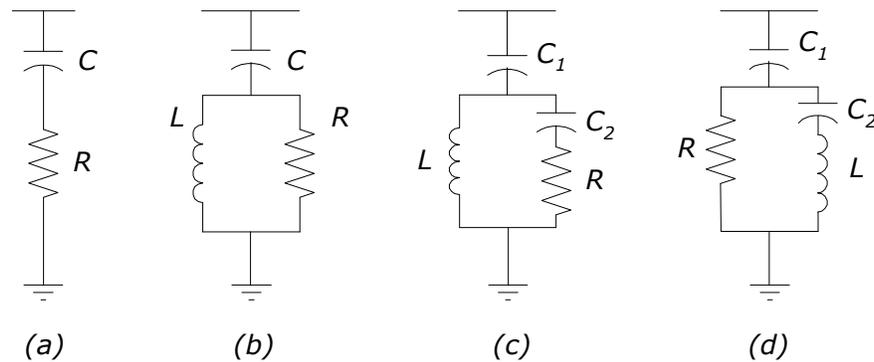
El propósito de diseñar filtros sintonizados es reducir la desviación de frecuencia máxima. La sintonización del filtro puede llevarse a cabo ya sea por el switcheo automático de la capacitancia o por la variación de la inductancia. Un sistema de control mide la potencia reactiva de frecuencia armónica 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

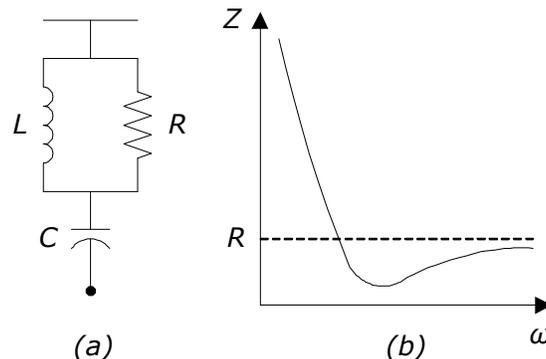
a) Filtro de primer orden

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.

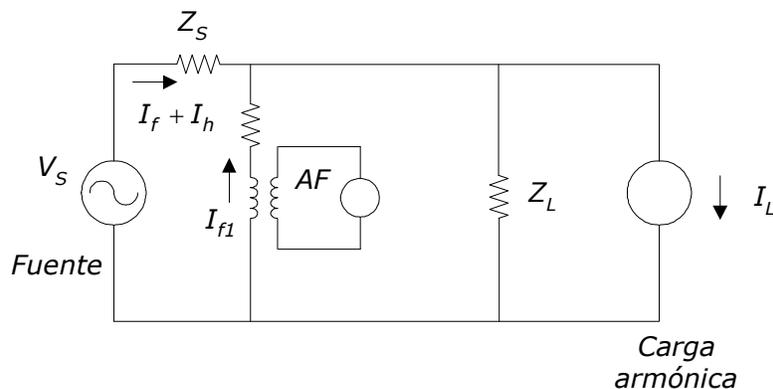
La aplicación de filtros activos está limitada, pese a todas sus ventajas, porque tienen costos iniciales altos y no constituyen una solución efectiva para cargas por encima de 500 [kW].²⁹

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

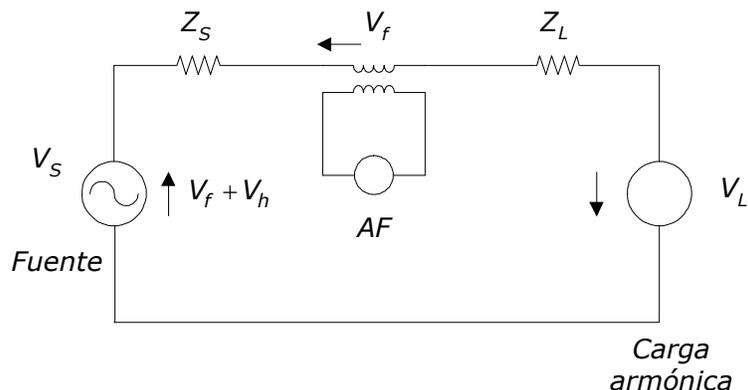
Aunque el filtro activo en derivación tiene varias ventajas sobre los filtros pasivos, su uso en aplicaciones industriales ha sido limitado, ya que el costo de la inversión siempre es mayor que la que se tiene con los filtros pasivos. Recientemente, se ha propuesto la conexión en serie de un filtro activo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

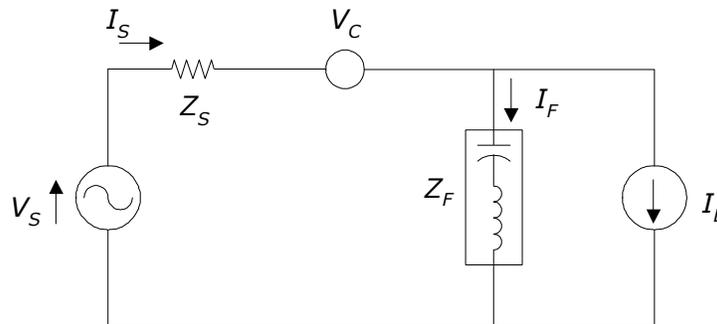
En ésta conexión se inyecta una tensión en serie con la línea para compensar la distorsión de tensión producida por la carga no lineal. Un filtro activo serie es recomendable para la compensación armónica de diodos rectificadores.³³



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.

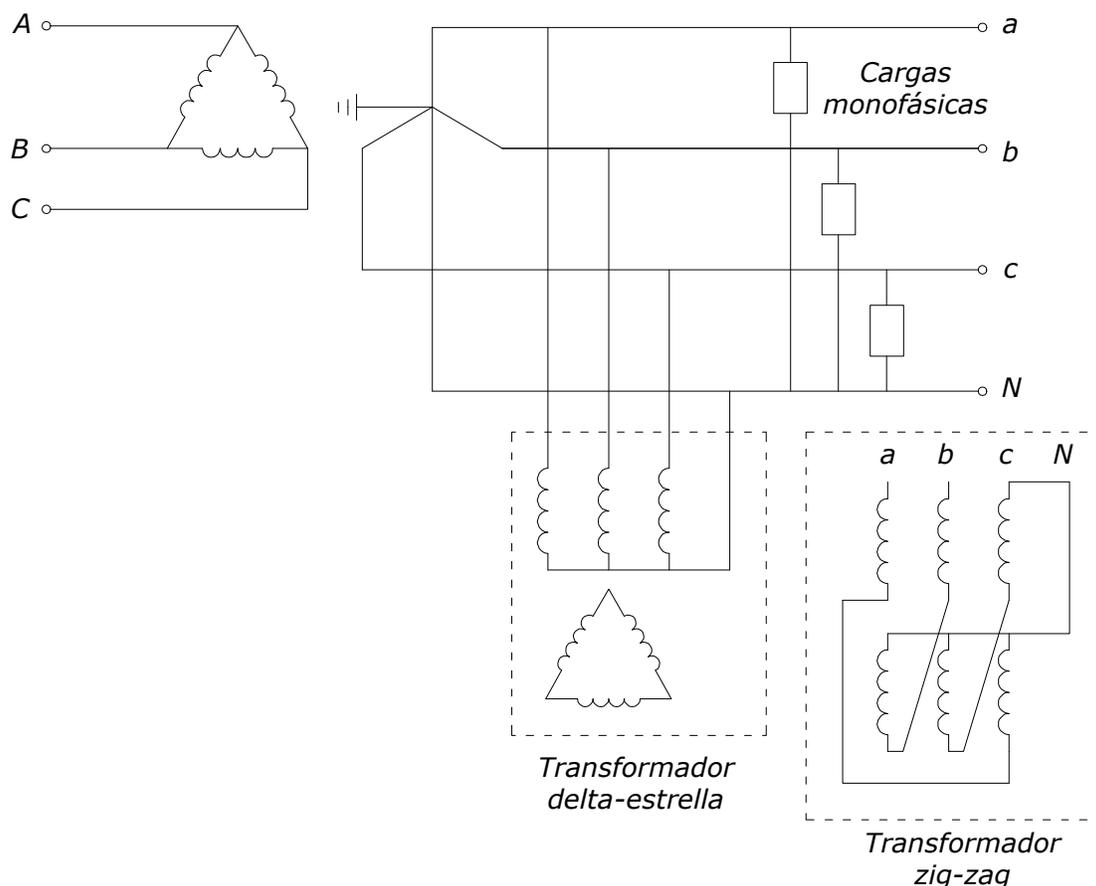
La configuración de doce pulsos es utilizada como un método para controlar armónicas. Por ejemplo, aplicada a dos dispositivos de velocidad variable, uno conectado a través de un transformador en delta-estrella y otro por medio de un transformador en delta-delta; se obtiene una forma de onda, inyectada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

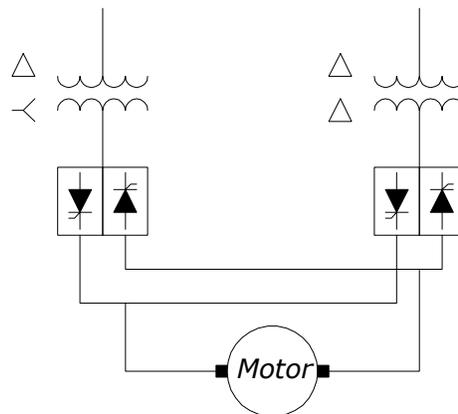
En la figura se muestra un sistema trifásico de cuatro hilos, con neutro sólidamente aterrizado que suministra potencia a cargas monofásicas. Las corrientes en el neutro tienen dos caminos, ambos de baja impedancia, a través del transformador delta-estrella o del transformador zig-zag, así como el neutro 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:

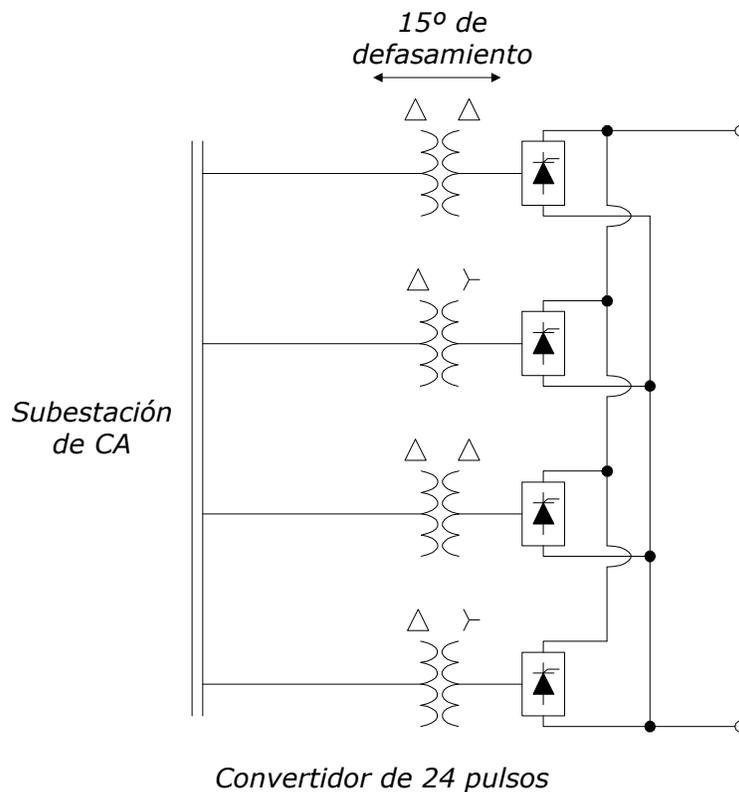
$$h = kq \pm 1$$

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

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

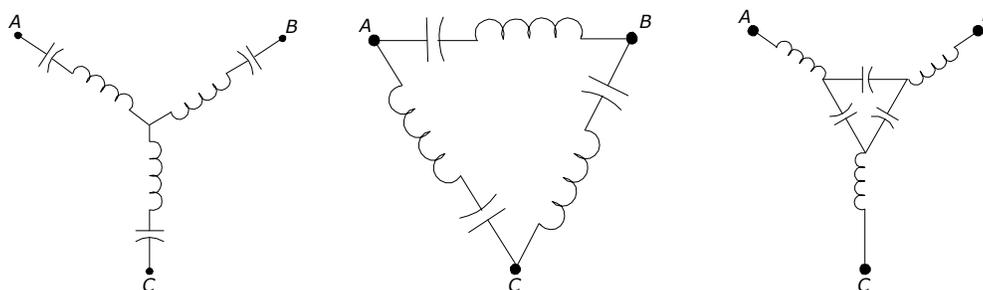
Al evaluar los componentes del filtro de armónicas, se usan los mismos factores que en condiciones normales de operación del filtro, pero con rangos más amplios. Además, cuando se aplican filtros de armónicas múltiples en la misma ubicación, se considera la salida de un filtro para verificar la capacidad 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 en 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 pérdidas 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 pérdida de unidades capacitivas por lo que hay un aumento en la reactancia capacitiva.
- Cambio de impedancia en el sistema con el que se planificó el estudio.

Para poder calcular las pérdidas 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.

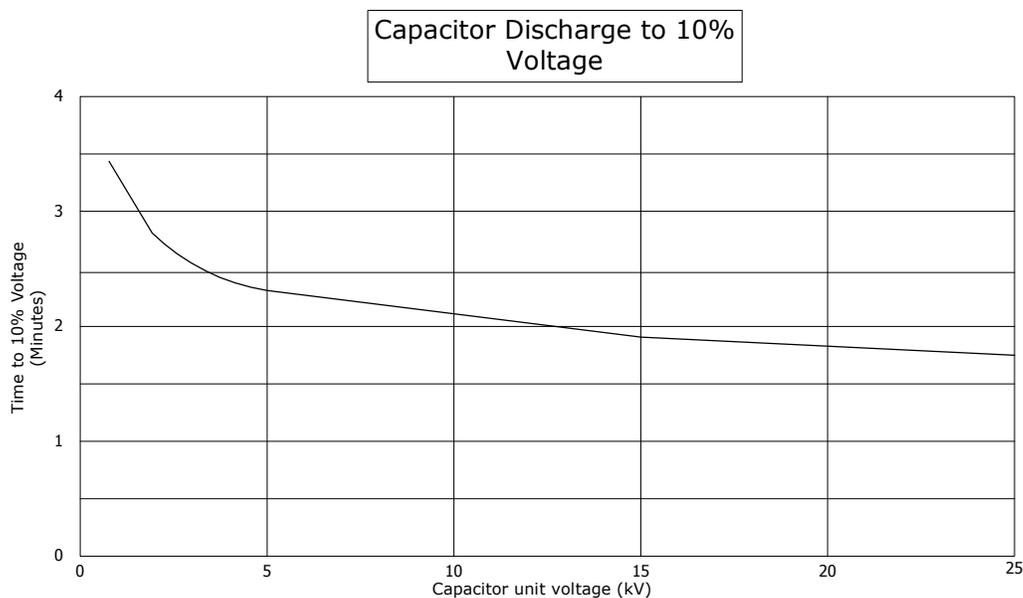
Las categorías para el control de switcheo para filtros de armónicas son:

- 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

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

Donde:

- X_{eff} – Reactancia efectiva del filtro
- Q_{eff} – Potencia reactiva del filtro
- $V_{\phi-\phi S}$ – 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

Dimensionamiento y especificación del filtro de corriente armónica de 5^o orden en la Industria Mittal

6.1 Dimensionamiento del filtro de 5^a armónica de 1.5 [MVAR] en 4.16 [kV], 45 MVAcc, 6.245 KAcc, de la Industria Mittal

Con base al requerimiento de un filtro de 5^a armónica de 1.5 [MVAR] en el bus 9 de la industria Mittal, a una tensión de 4.16 KV, determinado por los estudios de flujos de potencia y análisis armónico del sistema eléctrico de la planta, se dimensionaron y especificaron los componentes de dicho filtro como se indica a continuación.

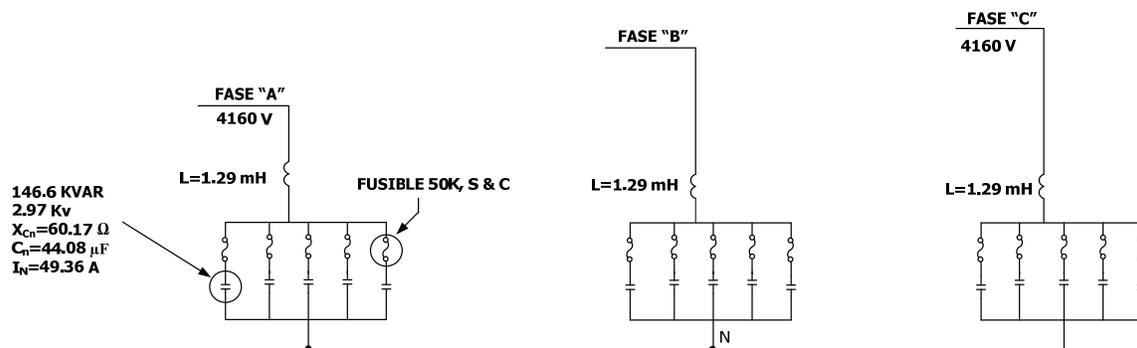
6.1.1 Componentes del filtro

Filtro formado por banco de capacitores trifásico conectado en estrella flotante, formada cada fase por un grupo serie con 5 unidades capacitoras (UC) en paralelo de 146.6 KVAR en 2970 V en serie con un reactor de filtro de 1.29 mH.

El banco de capacitores al incluirle un reactor en serie se le aplica un voltaje mayor al del sistema de potencia, así que debe sobredimensionarse en voltaje y potencia ya que en éste caso, la tensión aumenta hasta en un 5 % con respecto al bus al que está conectado.

Las Unidades Capacitoras (U.C.) que forman el Banco de Capacitores de 1.5 [MVAR], en 4.16 [kV] de la Industria Mittal.

FILTRO DE 5a ARMÓNICA



Por medio de una serie de iteraciones podemos, deducir la tensión nominal de las unidades capacitoras por lo que consideramos un valor mayor a la tensión del bus donde se encuentra conectado.

El filtro está conectado en estrella flotante y la tensión de la frecuencia fundamental del banco de capacitores se calcula como:

La tensión de frecuencia fundamental del banco de capacitores considerando el reactor de filtro es:

$$U_{c(1)} = (U_2 / \sqrt{3}) \cdot n^2 / (n^2 - 1)$$

Donde 'n' es la sintonía del filtro, es decir., $n = f_0 / f_{(1)} = 4.9 f_0$, siendo la frecuencia de sintonía (294 Hz) y $f_{(1)}$ la frecuencia fundamental (60 Hz).

La máxima tensión de frecuencia fundamental de los capacitores incluyendo el voltaje máximo de operación del sistema y el reactor del filtro es:

$$U_{c(1),max} = 1.06 \left(\frac{4.16}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{4.9^2}{4.9^2 - 1} \right) = 2.656 \text{ kV}$$

La tensión por corrientes armónicas generadas por los controladores de velocidad de los motores es $I_5 = 100 \text{ A}$ e $I_7 = 50 \text{ A}$:

$$\sum_{n=2}^{33} U_{c(n)} = 314 \text{ V}$$

La tensión nominal del capacitor será:

$$\sum_{n=2}^{33} U_{c(1),max} + \sum_{n=2}^{33} U_{c(n)} = 2970 \text{ V}$$

Esto da como resultado la siguiente potencia reactiva nominal para el banco de capacitores trifásico (se considera una tolerancia de fabricación de unidades capacitadoras de +3%):

$$Q = 3 \cdot U_{C,rated}^2 \cdot \omega_{(1)} \cdot C = 2.265 \text{ MVAR}; \quad \text{donde: } C = 226.9 \text{ microfarad}$$

Cálculo (teórico) de los parámetros de los componentes del filtro de 5ª armónica, sintonizado a 4.9 PU:

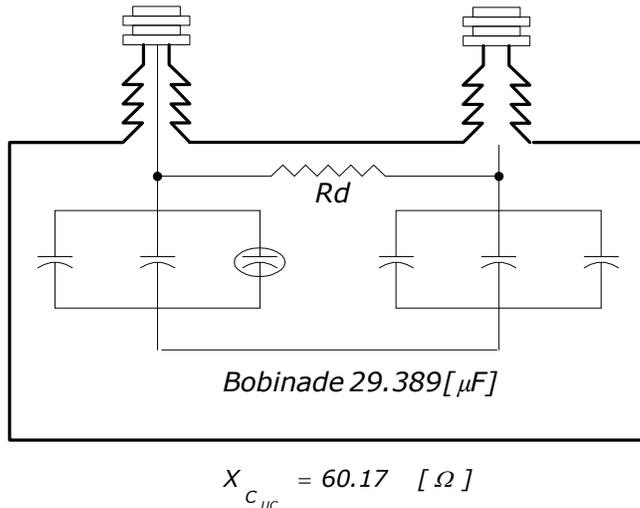
$$X_{eff} = \frac{4.16^2}{1.5} = 11.537 \ \Omega \quad ; \quad X_C = \frac{4.9^2}{4.9^2 - 1} 11.537 = 12.0384 \ \Omega$$

$$C = (220.338 \ \mu\text{F}) (1.03) = 226.9 \ \mu\text{F}$$

Esta capacitancia se considera debido a que el fabricante considera una tolerancia de 3 %

6.1.2 Especificación de la unidad capacitadora utilizando el concepto de gradiente de potencial

Unidad Capacitora de 95.729 [kVAR] y 2.4 [kV] nominales formada por 2 grupos serie con 3 bobinas en paralelo por grupo serie, con 2 películas de polipropileno, de 10 [μm] de espesor, entre bobinas como dieléctrico.



Tensión por bobina

$$V_B = \frac{2401}{2} = 1200[\text{V}]$$

Gradiente de potencial a tensión nominal de la Unidad Capacitora

$$G = \frac{1200}{2(10)} = 60[\text{V}/\mu\text{m}]$$

Capacitancia Unidad Capacitora (UC)

$$C_N = \frac{0.095729}{(2.4)^2 (377)} = 44.08[\mu\text{F}]$$

$$C_N = \frac{C_B B_P}{B_S}$$

Capacitancia por bobina

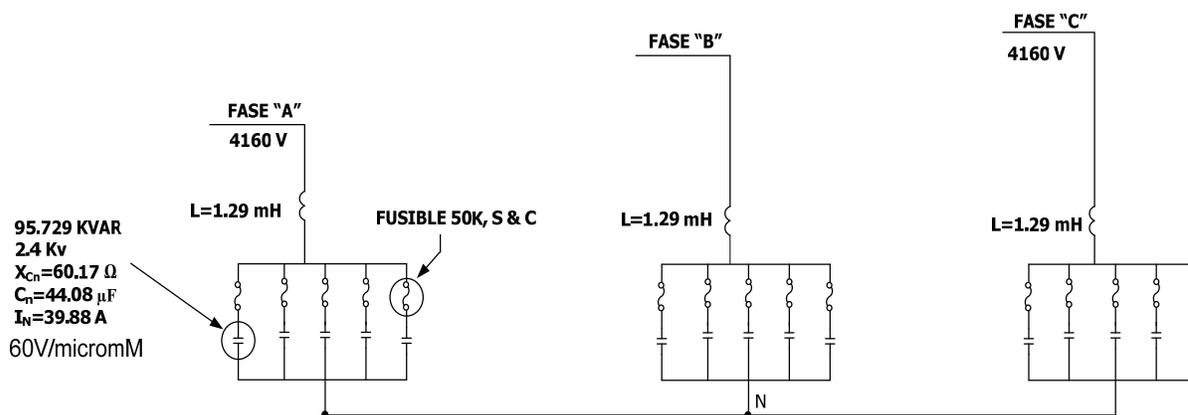
$$C_B = 44.08 \left(\frac{2}{3} \right) = 29.389[\mu\text{F}]$$

La Unidad Capacitora de 95.729 [kVAR], 2.4 [kV] con gradiente de potencial a tensión nominal de la unidad capacitadora de 60 [V/ μm] es equivalente a una de 146.6 [kVAR] y 2.97 [kV] nominales según la Norma IEC 60871-1,2.

El gradiente de operación máximo de la unidad capacitadora (UC) es de 75 V/ μm , si a la UC de 95.729 KVAR-2.4 KV se le aplica una tensión de 1.2375 PU (voltaje de frecuencia fundamental mas armónicos) es decir de 1.2375 (2.4) = 2.97 KV se le aplicaría un gradiente de potencial de 1.2375 (60) = 74.25 V/ μm que es menor a 75 V/ μm (de aguante) y suministraría una potencia reactiva de 1.2375² (95.729) = 146.6 KVAR, por tanto, se demuestra la equivalencia entre especificar unidades capacitadoras sobredimensionadas en potencia y voltaje o UC para la potencia y voltaje nominales con su gradiente de potencial de operación a voltaje nominal y su gradiente de operación máximo de aguante.

Dimensionamiento del filtro de 5ª armónica de 1.5 MVAR-4.16 KV formado con unidades capacitoras con gradiente de potencial de operación de 60 V/ μm .

FILTRO DE 5a ARMÓNICA



6.1.3 Reactor del filtro para la 5ª armónica

El reactor de filtro se determina a partir de la potencia reactiva requerida:

El banco de capacitores trifásico debe ser de 2265 KVAR para 2970 V, al ser sobredimensionados para poder considerando un voltaje máximo en el bus de 1.06 pu. Mientras que la capacidad del filtro se sobredimensiona con el voltaje máximo posible en dicho bus debido a las armónicas, mientras que tomamos en cuenta la tolerancia del fabricante que aumenta en un 3 % la capacitancia del banco por lo que de esta manera se dimensiona considerando que cada fase se encuentra formado por un grupo serie de 5 unidades capacitoras de:

$$\frac{2265}{(1.03)15} = 146.6 \text{ KVAR}$$

Parámetros eléctricos de unidades capacitoras de 146.6 KVAR-2.97 KV, $X_{cn} = \frac{2.97^2}{0.1466} = 60.17 \Omega$; $C_n = 44.08 \mu\text{F}$; $I_n = 49.36 \text{ A}$, $X_{c\text{real}} = \frac{60.17}{1.03} = 58.4 \Omega$; $C_{\text{real}} = 45.4 \mu\text{F}$; $Q_{\text{real}} = 151 \text{ KVAR}$.

Parámetros eléctricos del banco de capacitores por fase: 755 KVAR-2.97 KV, $X_{c\text{real}} = \frac{58.4}{5} = 11.68 \Omega$; $C_{\text{real}} = 227 \mu\text{F}$ (se considera una tolerancia de fabricación de +3%).

Inductancia del reactor del filtro de 5ª armónica para una sintonía a 4.9 PU:

$$L = \frac{1}{377^2(4.9^2)(227E-6)} = 1.290 \text{ mH} \leftrightarrow 0.486 \Omega.$$

Corriente fundamental del filtro al voltaje nominal y máximo de operación:

$$I_{F1} = \frac{\frac{4160}{\sqrt{3}}}{(11.68-0.486)} = 214 \text{ A} \quad I_{F1\text{máx}} = \frac{\frac{(1.06)4160}{\sqrt{3}}}{(11.68-0.486)} = 227 \text{ A}$$

Corriente RMS del filtro considerando la fundamental máxima y armónicas $I_5 = 100$ A, $I_7 = 50$ A:

$$I_{RMS} = \sqrt{227^2 + 100^2 + 50^2} = 253 \text{ A}$$

Voltaje máximo aplicado al banco de capacitores:

$V_c = (11.68) (253) = 2955 \text{ V}$ que es menor a 2970 V siendo correcta la selección de unidades capacitoras.

Potencia reactiva trifásica suministrada por el filtro de 5ª armónica al voltaje nominal:

$$Q_{3\phi} = 3 (11.68 - 0.486) 214^2 = 1\,537\,921 \text{ VAR} = 1.53 \text{ MVAR}$$

Especificaciones de reactores de filtro:

Especificación Técnica	
No. de Reactores por Fase:	1
Reactancia Inductiva:	0.486 Ω
Inductancia Nominal:	1.29 mH
Corriente Nominal 60 HZ:	227 A
Corriente RMS: $\sqrt{I_{60\text{ Hz}}^2 \pm \sum I_{ARM}^2}$	253 A
Corriente Térmica:	3.88 KA, 1 Seg.
Pico Mecánico:	9.9 KA
Altitud:	1800 msnm
Norma:	IEC 289-1988
Uso exterior:	
Enfriamiento:	Aire Natural
Elevación de Temperatura:	80°C
Clase de Aislamiento:	B
Tensión de Impulso:	70 kV
Voltaje de Sistema:	4.16 kV
Voltaje de Diseño:	5 kV
Potencia Reactiva Nominal:	31.1 KVAR
Caída de Voltaje:	123 Volts

Nota:

Se requieren 3 reactores monofásicos por banco de capacitores.

6.1.4 Calidad del filtro:

El rango de la calidad de filtros industriales oscila entre $20 \leq Q \leq 50$

Para éste caso, $Q=30$. La calidad del filtro está definida como:

$$Q = \frac{X_{L_{4.9}}}{R}$$

De donde:

$$R = \frac{X_{L_{4.9}}}{Q}$$

$$X_{L_{4.9}} = 4.9 X_{L_1} = 4.9 (0.486) = 2.3814 \Omega.$$

$$R = \frac{2.3814}{30} = 0.08 \Omega.$$

6.1.5 Protecciones del filtro:

Protección contra sobretensiones (59):

Voltaje de operación del banco de capacitores.

$$V_s = 1.1(4160) = 4.576[\text{kV}]$$

$$V_c = \frac{(4.9)^2}{(4.9)^2 - 1} \left(\frac{4576}{\sqrt{3}} \right)$$

$$V_c = 2.756[\text{kV}]$$

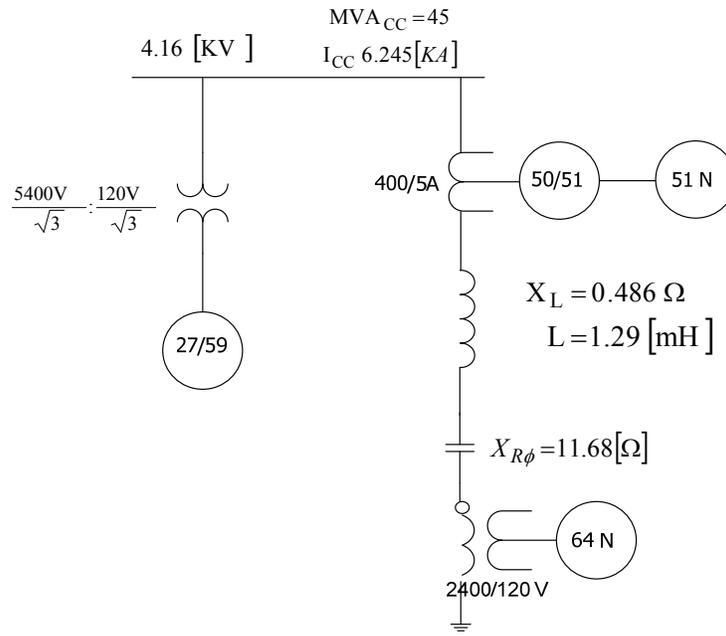
$$V_{uc} = 2.756[\text{kV}]$$

Las unidades capacitoras son de 146.6 KVAR- 2970 V, así que se ajusta el 59 a:

$$\text{RTP} = \frac{5400 \text{ V}}{\sqrt{3}} : \frac{120 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 45:1 \text{ V} \quad V_{sec} = \frac{(2970 \text{ V})}{45} = 63 \text{ V}; \quad \text{Tiempo de retardo} = 2 \text{ Seg.}$$

Protección contra baja tensión (27):

$$V_{sec} = \frac{0.8(2401)}{45} = 43 \text{ V}; \quad \text{Tiempo de retardo} = 2 \text{ Seg.}$$



Esquema de protección del filtro de 5ª armónica

Ajuste del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso (51):

La corriente RMS Máxima es de 253 A (considerando el voltaje máximo del sistema y corrientes armónicas). RTC = 400/ 5 A

$$I_{pickup} = 1.2 (214) = 256 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{256}{80} = 3.2 \text{ A} \quad ; \quad \text{Dial} = 0.1, \text{ Característica de tiempo muy inverso}$$

Ajuste del relevador de sobrecorriente instantánea (50) = (50 N)

Capacidad de corto-circuito en las terminales del capacitor:

Conociendo la reactancia inductiva del reactor podemos conocer la capacidad de corto circuito en el banco de capacitores.

La capacidad de corto circuito en el bus 9 de la industrial Mittal es de 45 MVAcc. y en las terminales del banco de capacitores es:

$$\frac{1}{MVAcc} = \frac{1}{45} + \frac{1}{\frac{4.16^2}{0.486}}$$

$$MVAcc = 19.9$$

$$I_{cc} = \frac{19900}{\sqrt{3}(4.16)} = 2760 \text{ A}$$

$$I_{inrush} = \sqrt{2} \sqrt{2760 (214) (.9)} = 978 \text{ A}$$

$$I_{ajuste \ sec} = \frac{1.3 (978)}{80} = 16 \text{ A} \quad ; \quad \text{Sin retardo intencional}$$

Ajuste del relevador 51-N

$$10\%I_{op} \leq I_{pickup} \leq 20\%I_{op}$$

En nuestro caso, tomamos el 15% de la corriente de operación del filtro.

$$I_{pickup} = 0.15 (214) = 32 \text{ A}$$

$$TAP = \frac{32}{80} = 0.4 \text{ A}; \quad Dial = 0.1, \text{ Característica de tiempo inverso}$$

Ajuste del relevador 64-N

➤ Alarma

Voltaje en unidades restantes de un grupo serie cuando sale de operación una unidad capacitadora:

$$V_{c1} = \frac{3(V_{LG})P}{[3S(P-F)] + 2F} = 2684V.$$

2684 V menor a 2970 V, así que puede seguir operando el filtro hasta que se den las condiciones para sacarlo de operación, verificar la unidad capacitadora y reponer el fusible.

Cuando falla una o más Unidades Capacitoras de un grupo serie del banco de capacitores, se tiene una tensión en el neutro igual a:

$$V_{NG} = \frac{V_{LG}F}{[3S(P-F)] + 2F}$$

Donde:

- V_{NG1} – Tensión de neutro a tierra
- V_{LG} – Tensión entre fases
- P – Número de Unidades Capacitoras en paralelo
- F – Número de Unidades Capacitoras falladas
- S – Número de grupos serie

Para una Unidad Capacitora fallada se tiene:

$$V_{NG_1} = \frac{\left(\frac{4160}{\sqrt{3}}\right)(1)}{[3(1)(5-1)] + 2(1)}$$

$$V_{NG_1} = \frac{2401.8}{14} [V] = 172 \text{ V}$$

➤ Disparo

Cuando fallen dos Unidades Capacitoras de un grupo serie del banco de capacitores, las unidades capacitoras restantes (3) tendrán un voltaje aplicado de 2891 V que es mayor a 2970 por tanto, el filtro debe salir de operación después de un cierto tiempo (5 Seg) :

Cuando fallen dos Unidades Capacitoras de un grupo serie del banco de capacitores, se tendrá una tensión en el neutro igual a:

$$V_{NG_2} = \frac{\left(\frac{4160}{\sqrt{3}}\right)(2)}{[3(1)(5-2)] + 2(2)}$$

$$V_{NG_2} = \frac{4803.55}{13} [V] = 370 \text{ V}$$

➤ Desbalance severo

Tensión en el neutro cuando se está corto circuitando una Unidad Capacitora del banco de capacitores.

$$V_n = 2400 \text{ V}$$

Para los siguientes valores de relación de transformación:

$$RTP = 2400/120[V]$$

$$RTP = 20/1[V]$$

Y ajustando al 80% de tensión en el neutro se tiene:

- Voltaje primario:

$$V_{\text{alarma}} = 0.8(172) = 138[V]$$

$$V_{\text{disparo}} = 0.8(370) = 236[V]$$

$$V_{\text{severo}} = 0.5(2400) = 1200[V] \text{ (50\% del voltaje de neutro)}$$

$$V_{\text{severo}} = 0.5 (2400 \text{ V}) = 1200 \text{ V}$$

- Voltaje secundario:

$$V_{\text{alarma}} = \frac{138}{20} = 6.9[V]$$

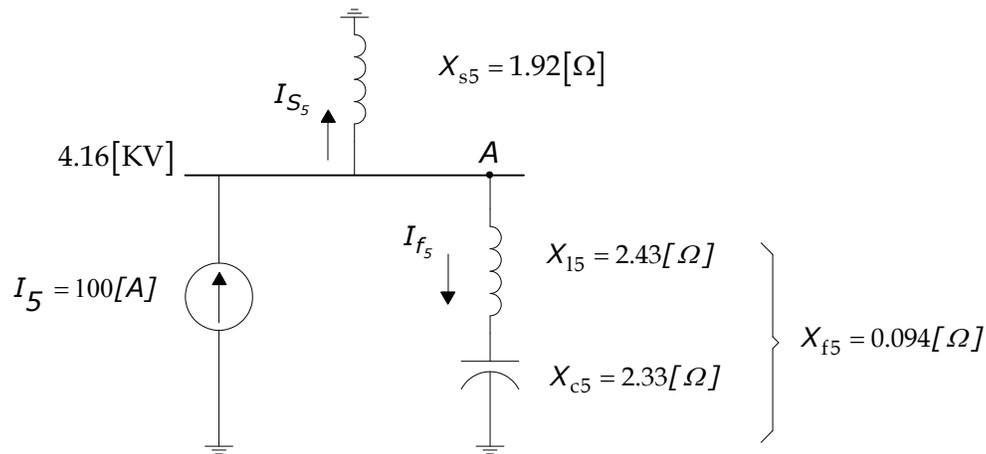
$$V_{\text{disparo}} = \frac{236}{20} = 11.8[V]$$

$$V_{\text{severo}} = \frac{1200}{20} = 60[V]$$

AJUSTES DEL RELEVADOR 64-N	V _{PRIMARIO} [V]	V _{SECUNDARIO} [V]	TIMER [S]
Alarma	138	6.9	5
Disparo	236	11.8	5
Desbalance severo	1200	60	0.2

6.1.6 Análisis armónico para la corriente de 5º orden

Con filtro de 5ª armónica:



Reactancia del sistema a la frecuencia fundamental

$$X_{S_1} = \frac{kV^2}{MVA_{CC}} = \frac{4.16^2}{45}$$

$$X_{S_1} = 0.38 [\Omega]$$

Reactancia del sistema debida a la 5ª armónica

$$X_{S_5} = 5X_{S_1} = 5(0.38)$$

$$X_{S_5} = 1.92 (\Omega)$$

Reactancia del reactor debida a la 5ª armónica

$$X_{L_5} = 5X_{L_1} = 5(0.486)$$

$$X_{L_5} = 2.43 [\Omega]$$

Reactancia del banco de capacitores debida a la 5ª armónica

$$X_{C_5} = \frac{X_{C_1}}{5} = \frac{11.68}{5}$$

$$X_{C_5} = 2.33[\Omega]$$

Reactancia del filtro debida a la 5ª armónica

$$X_{f_5} = X_{L_5} - X_{C_5} = 2.43 - 2.336$$

$$X_{f_5} = 0.094[\Omega]$$

Corriente en el filtro

$$I_{f_5} = \frac{X_{S_5} I_5}{X_{S_5} + X_{f_5}} = \frac{(1.92)(100)}{1.92 + 0.094}$$

$$I_{f_5} = 95.33[A]$$

Corriente de 5ª hacia el sistema

$$I_{S_5} = I_5 - I_{f_5} = 100 - 95.33$$

$$I_{S_5} = 4.67[A]$$

Tensión de 5ª armónica en el punto A

$$V_5 = I_{S_5} X_{S_5} = (4.67)(1.92)$$

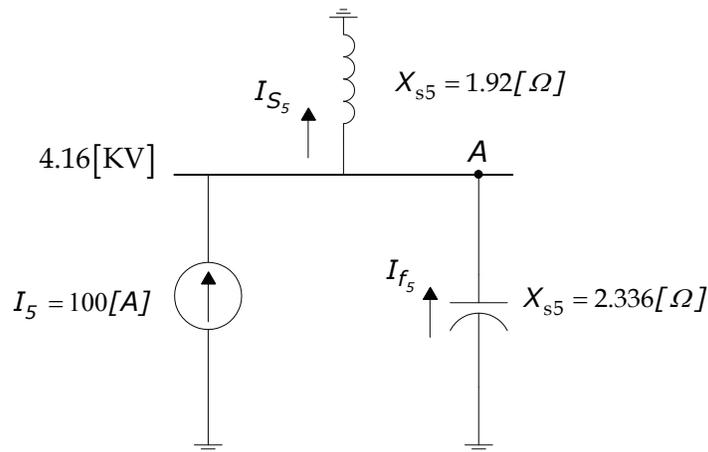
$$V_5 = 8.966[V]$$

Distorsión individual de tensión de 5ª armónica

$$DHV_5 = \frac{V_5}{V_N} \times 100 = \frac{8.966}{\frac{4160}{\sqrt{3}}} \times 100$$

$$DHV_5 = 0.373\%$$

Con banco de capacitores de 1.5 MVAR de \$16 KVen lugar de filtro de 5ª armónica



Corriente en el capacitor

$$I_{C_5} = \frac{X_{S_5} I_5}{X_{S_5} + X_{C_5}} = \frac{(1.92)(100)}{1.92 - 2.33}$$

$$I_{C_5} = -461.53 [A]$$

Corriente de 5ª hacia el sistema

$$I_{S_5} = I_5 - I_{C_5} = 100 - (-461.53)$$

$$I_{S_5} = 561.53 [A]$$

Tensión de 5ª armónica en el punto A

$$V_5 = I_{S_5} X_{S_5} = (561.53)(1.92)$$

$$V_5 = 1078.15 [V]$$

Distorsión individual de tensión de 5ª armónica

$$DHV_5 = \frac{V_5}{V_N} \times 100 = \frac{1078.15}{\frac{4160}{\sqrt{3}}} \times 100$$

$$DHV_5 = 45\%$$

6.1.7 Resonancia serie-paralelo del filtro con el sistema de potencia

Frecuencia de resonancia serie

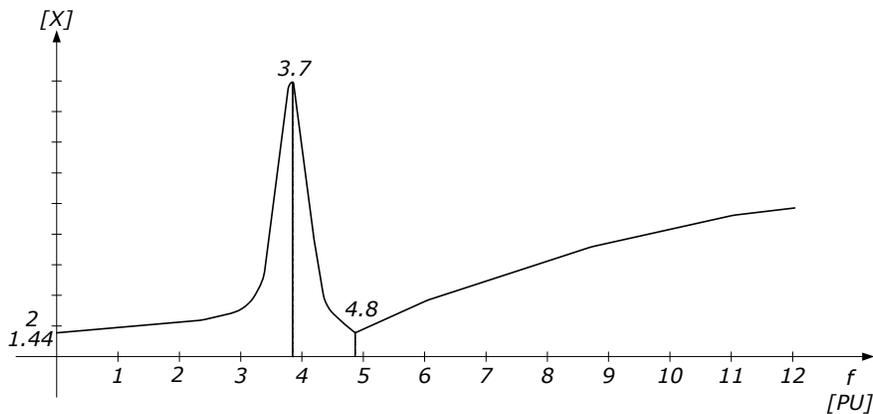
$$f_{rs} = \sqrt{\frac{X_{C_1}}{X_{L_1}}} = \sqrt{\frac{11.68}{0.486}}$$

$$f_{rs} = 4.9[\text{PU}]$$

Frecuencia de resonancia paralelo

$$f_{rp} = \sqrt{\frac{X_{C_1}}{X_{S_1} + X_{L_1}}} = \sqrt{\frac{11.68}{0.384 + 0.486}}$$

$$f_{rp} = 3.7[\text{PU}]$$



Gráfica de magnitud de reactancia contra frecuencia

6.1.8 Aplicación de la especificación CFE L0000-45-2005

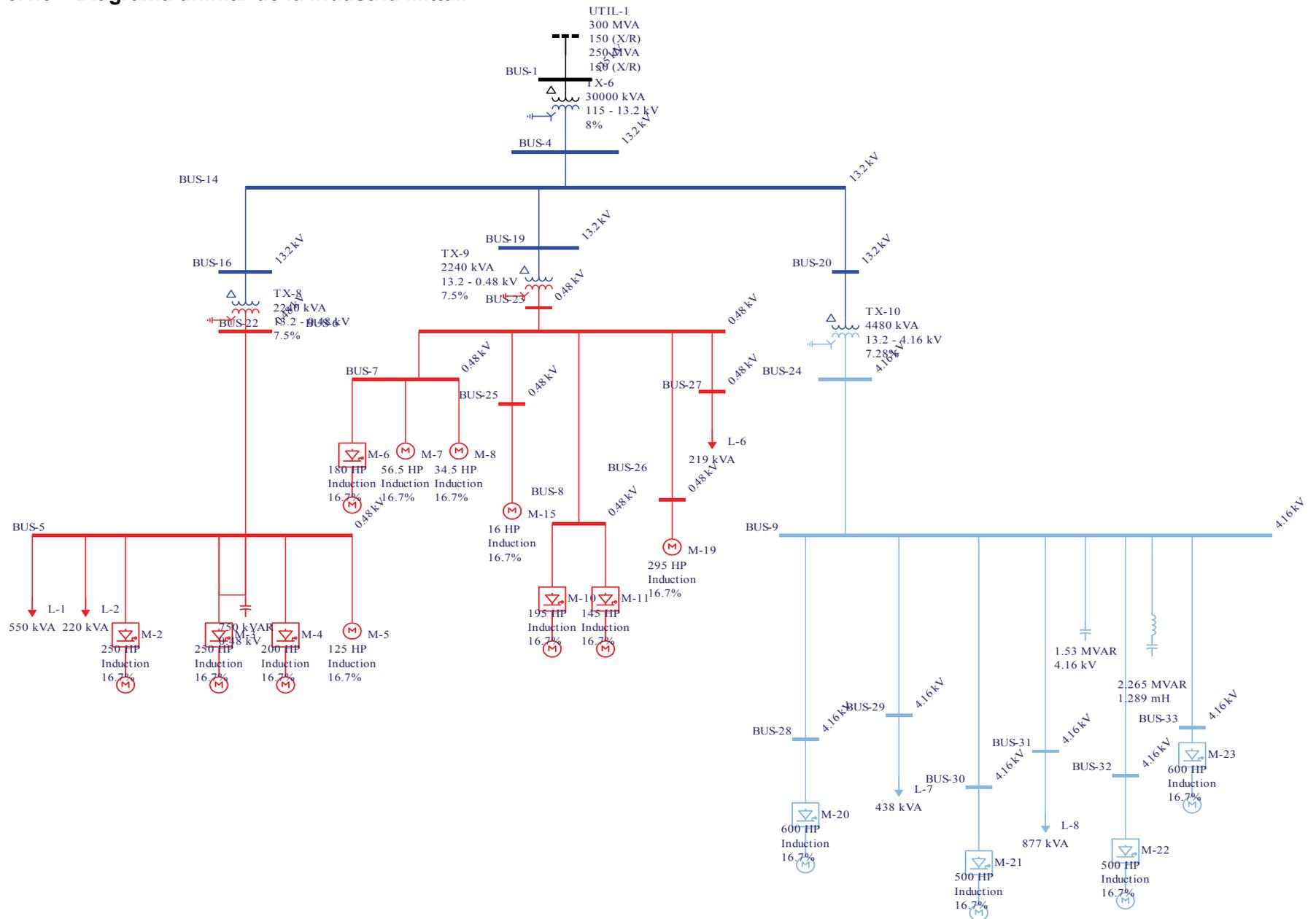
Con base en la norma “Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica” de CFE, tenemos que:

- ✓ Para un nivel de tensión de 4.16 [kV], se tiene que el límite de distorsión armónica individual de tensión, HDv=6.5%. (Ver anexo A)

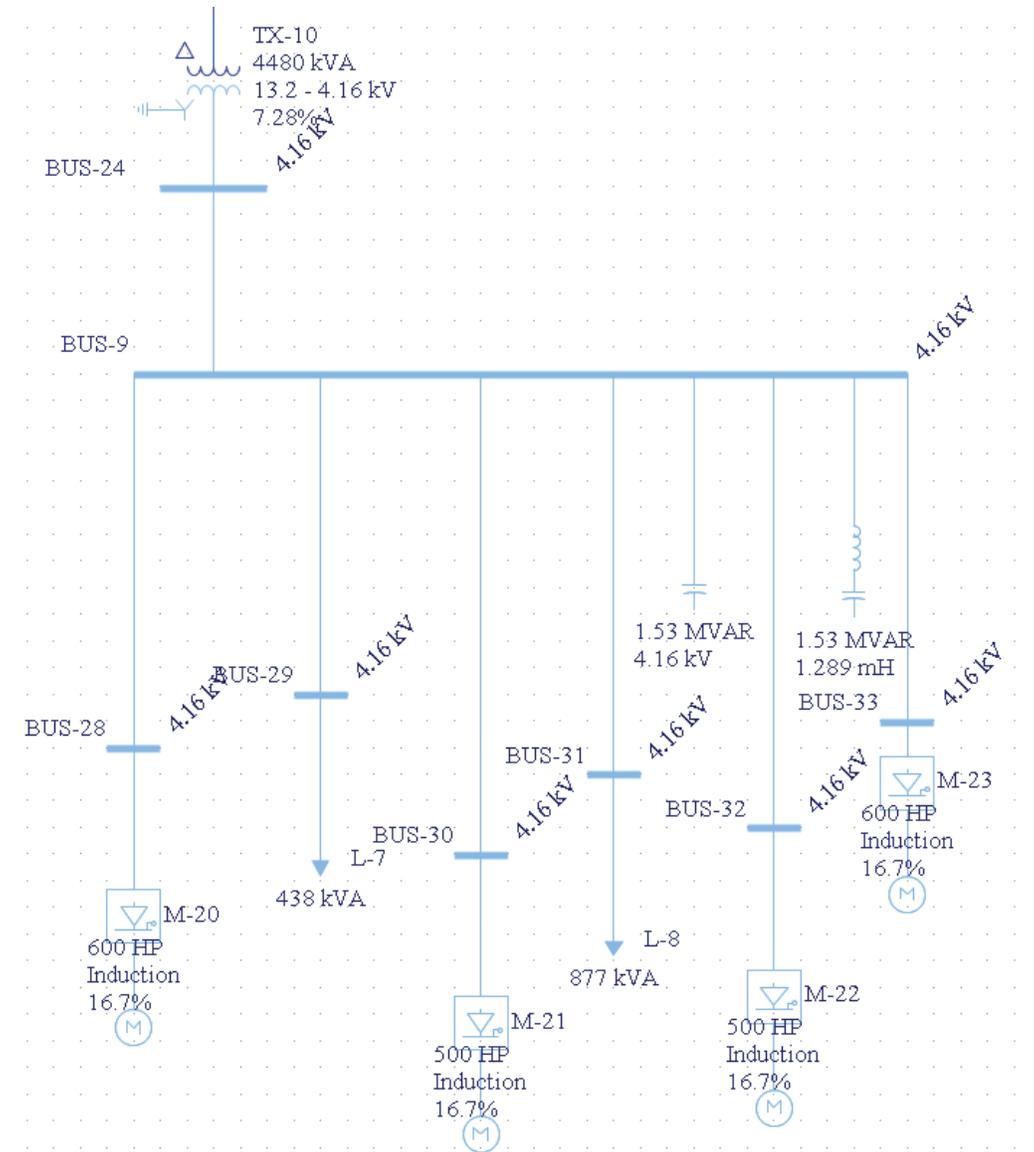
El filtro de 5ª armónica diseñado tiene un HDv=0.373%, lo cual nos ubica dentro de los rangos permisibles de distorsión armónica.

A diferencia del filtro, el banco de capacitores, utilizado únicamente para compensación reactiva, presenta un HDv=45 %. Dicho valor está totalmente fuera de rango, lo cual nos indica que a pesar de la compensación de potencia que pueda tenerse, habrá altas corrientes armónicas de 5º orden fluyendo en el banco de capacitores y sistema de potencia.

6.1.9 Diagrama unifilar de la Industria Mittal.



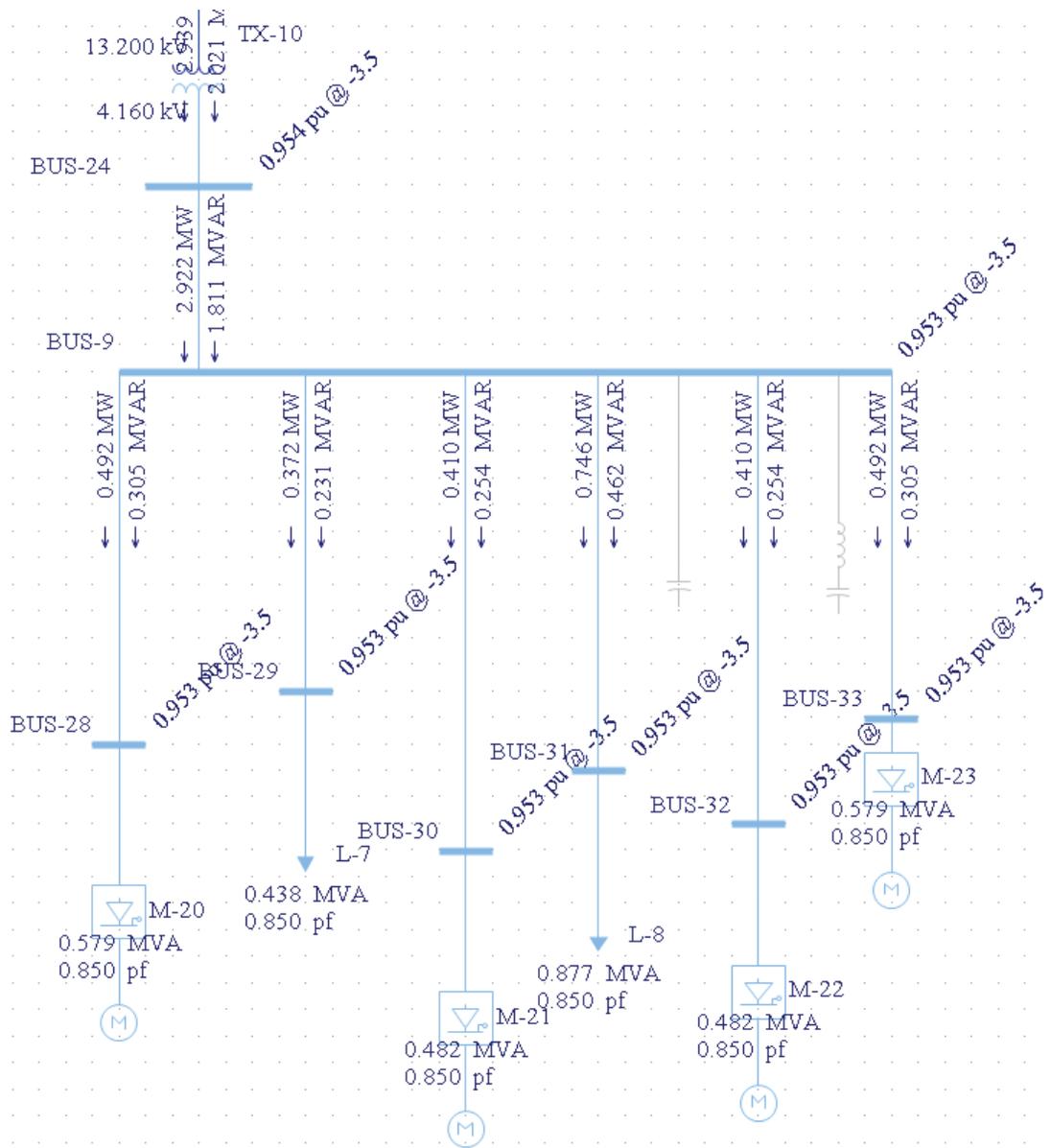
Bus 9 de industria Mittal



Este estudio de comportamiento armónico se centra en el bus 9, ya que al igual que los buses que tengan conectados motores con controladores de velocidad se verán afectados de la misma forma por lo que el dimensionamiento de los filtros se realiza con la misma lógica que este bus.

Flujos de Potencia en el Bus 9 de la industria Mittal con los siguientes casos:

- sin compensación de potencia reactiva,
- con compensación de potencia reactiva (banco de Capacitores de 1500 KVAR)
- y con compensación de potencia reactiva (Filtro de quinta armónica).



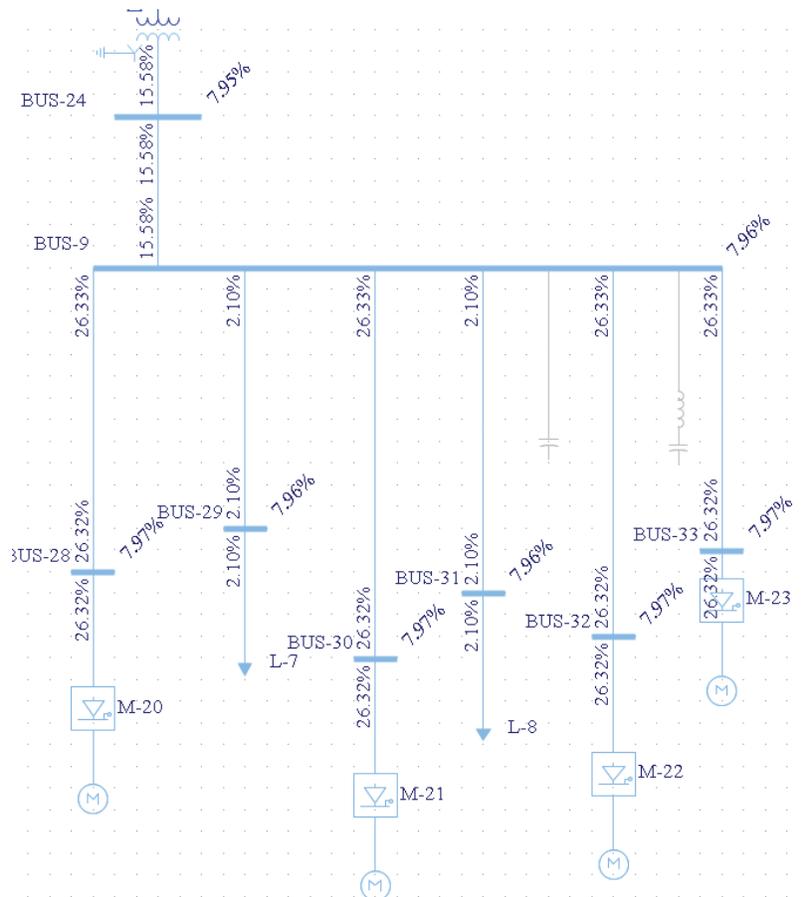
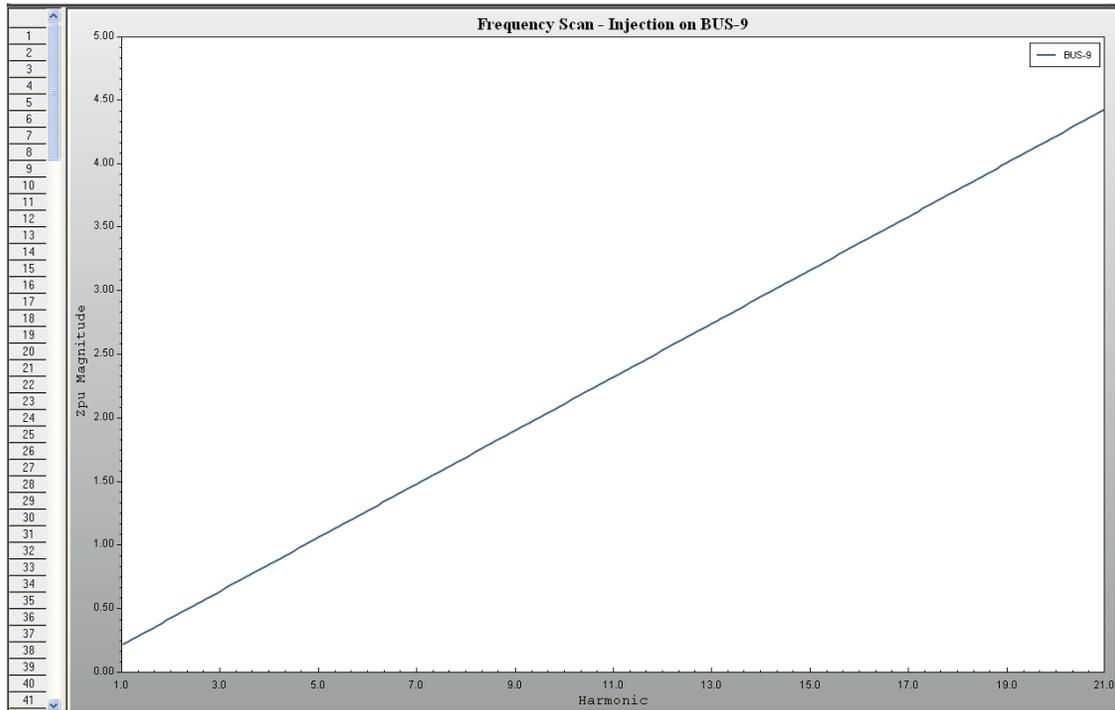
Al realizar el estudio de flujos de potencia del sistema, se observa que hay bajos voltajes en los buses y es necesaria la compensación de potencia reactiva y corregir el F.P.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(2.922)^2 + (1.811)^2} = 3.43 [MVA]$$

$$F.P. = \frac{P}{S} = \frac{2.922}{3.43} = 0.84$$

Sin embargo podemos observar que la caída de tensión en el bus esta dentro de los límites permitidos de la norma, sin embargo se tienen mayores pérdidas en el sistema industrial.

Impedancia vs Frecuencia."vista" en el bus 9, sin considerar la compensación de potencia reactiva.

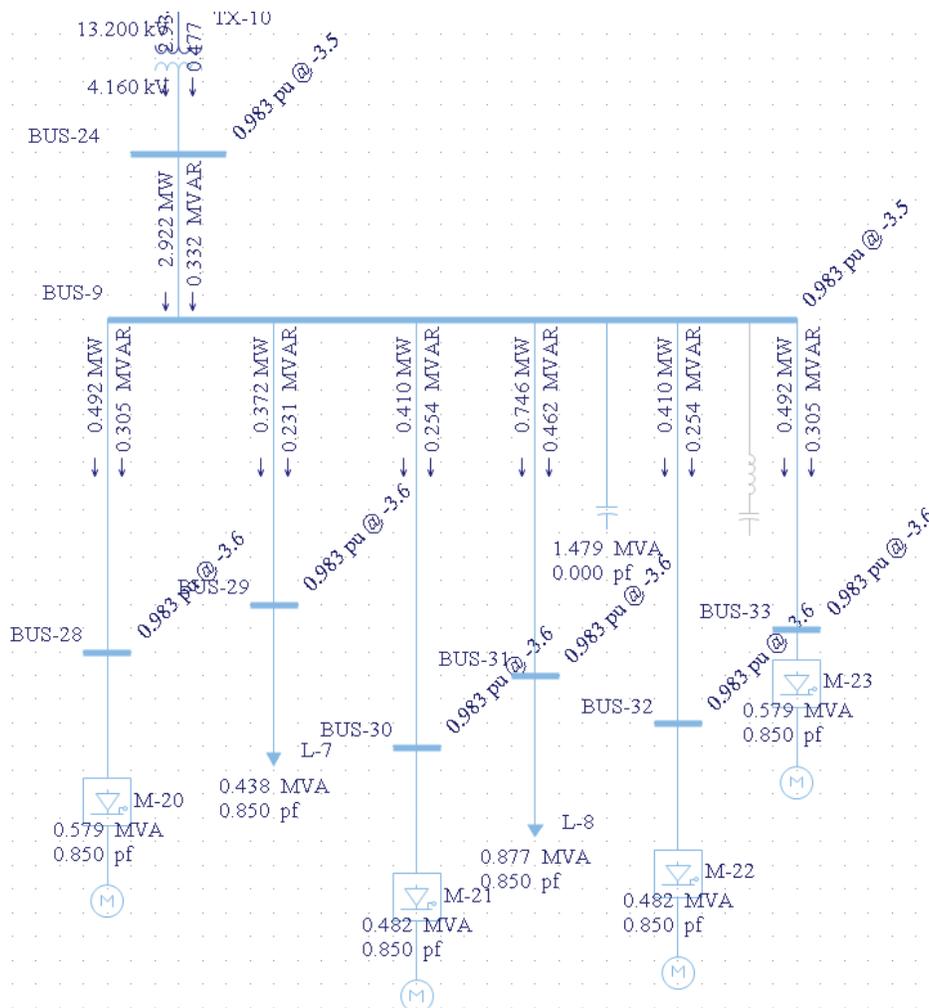


Este es el comportamiento de Impedancia vs Frecuencia del bus 9 de la industria Mittal, donde se puede observar que al no estar conectado en paralelo con algún elemento compensador, este se ve afectado solo por la reactancia inductiva del sistema de potencia por lo que al ir aumentando la frecuencia su impedancia crece de manera proporcional.

Sin embargo las cargas no lineales instaladas en dicho bus provocan un aumento en la distorsión armónica del voltaje siendo el THD un 7.96 % , esto representa un problema a las demás cargas instaladas ya que son alimentadas con voltajes armónicos indeseables.

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

Flujos de Potencia con compensación de Potencia Reactiva por medio de un Banco de Capacitores de 1500 KVAR.



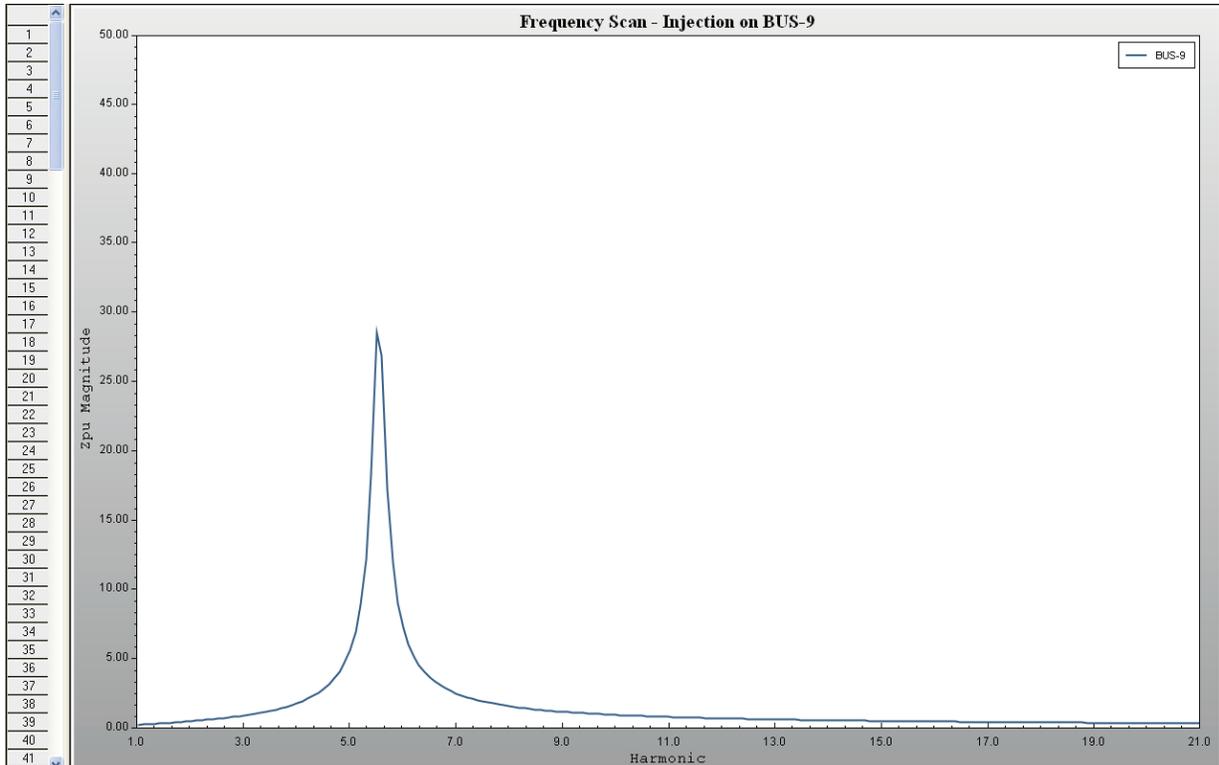
Por medio de la compensación de Potencia Reactiva a través de los bancos de capacitores evitamos que dicha potencia reactiva sea alimentada por el sistema así que se corrige el F.P. y a su vez tener una tensión estable en los buses, en este caso de 0.98 PU.

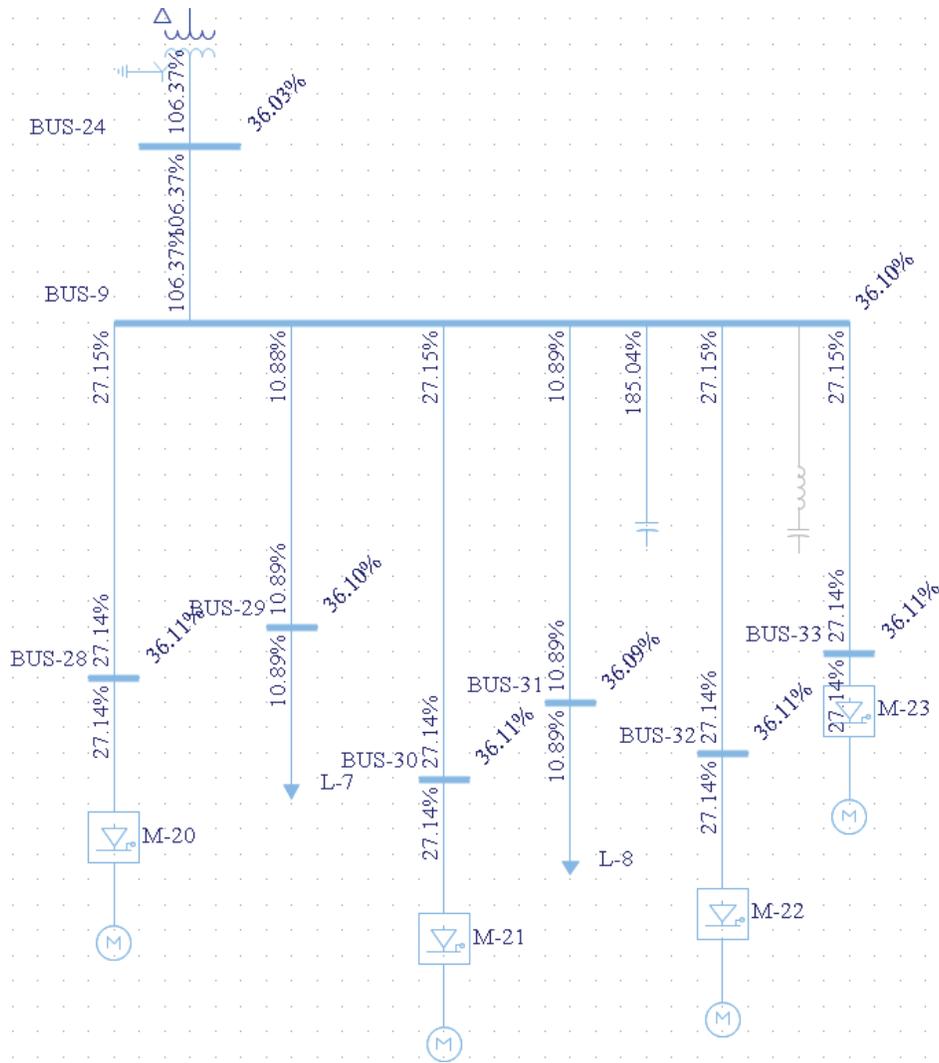
$$S = \sqrt{2.922^2 + 0.332^2} = 2.94 [MVA]$$

$$F.P. = \frac{P}{S} = \frac{2.922}{2.94} = 0.99$$

Podemos observar que el banco de capacitores influye directamente en la potencia reactiva necesaria del bus 9 mas no en la potencia activa del bus.

Impedancia vs Frecuencia."vista" en el bus 9, considerando la compensación de potencia reactiva (banco de capacitores de 1500 KVAR).



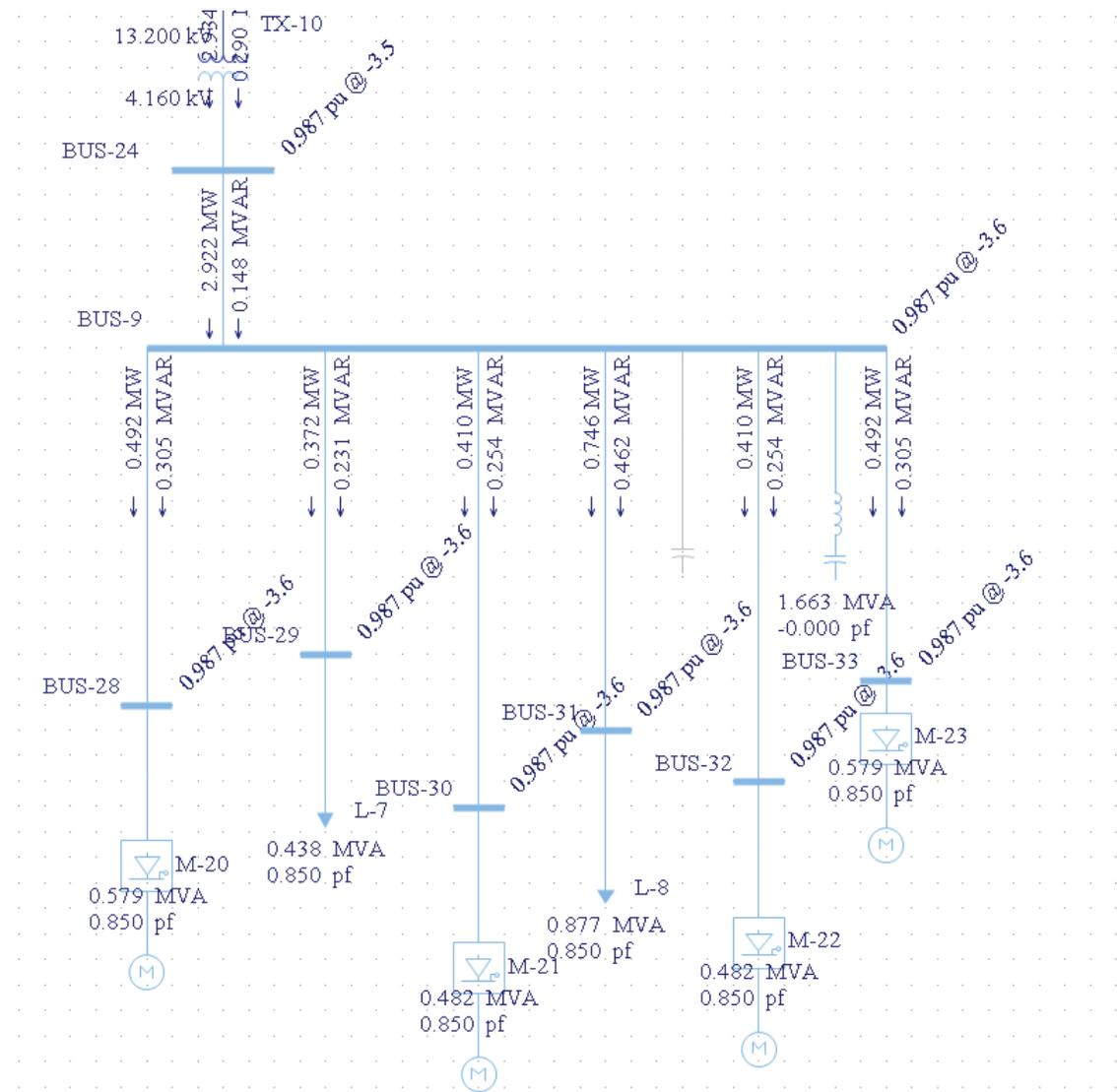


Por medio de este estudio de impedancia vs frecuencia podemos observar que la reactancia inductiva equivalente en dicho bus entra en resonancia con el banco de capacitores provocando así un aumento excesivo en los voltajes armónicos, ya que la carga representa una fuente de corriente de quinta y séptima armónica.

Como podemos observar no necesariamente la frecuencia de resonancia debe de estar sintonizada exactamente a las corrientes armónicas generadas por las cargas no lineales para generar una distorsión armónica excesiva en el bus.

Se presentan altos voltajes armónicos en el bus 9 por lo que es necesaria la instalación de un filtro encargado de mantener los voltajes armónicos bajo cierto límite.

Compensación de Potencia Reactiva en el Bus 9 por medio de un filtro de quinta armónica de 1500 KVAR-4.16 KV.



La compensación de potencia reactiva es capaz de mantener el F.P. del sistema en un nivel aceptable al igual que hay una mejora en la tensión nominal del bus.

$$S = \sqrt{2.922^2 + .148^2} = 2.925$$

$$F.P. = \frac{P}{S} = \frac{2.922}{2.925} = 0.99$$

Por lo que en cuanto a los flujos de Potencia no representa diferencia alguna entre un banco de capacitores sin embargo tiene la capacidad de atenuar las corrientes armónicas al sistema, representando un camino de baja impedancia para las mismas.

Podemos ver que al instalar un filtro sintonizado a la quinta armónica se representa un camino de baja impedancia a las corrientes armónicas suministradas por las cargas no lineales en este caso los controladores de velocidad de los motores de dicha empresa por lo que podemos comprender la importancia que tienen los filtros en las industrias que tienen cargas no lineales.

La distorsión armónica total de voltaje en el bus es de 2.31 % que es menor al límite recomendado por la Norma CFE L0000 45-2005 (6.5%), así que es correcta la instalación del filtro.

Conclusiones

Este trabajo de tesis tiene como objetivo principal servir de guía para los estudios de compensación de potencia reactiva en los sistemas eléctricos de potencia industriales, comerciales, residenciales y de empresas suministradoras, ya que se muestra los pasos a seguir sin la utilización de un simulador (cálculo manual) y confirmando el estudio con el simulador EasyPower V9.

Se realiza el análisis armónico considerando el sistema eléctrico de potencia industrial con cargas lineales y no lineales (con la generación de la corriente de 5° orden) para los casos sin compensación de potencia reactiva, con la aplicación de un banco de capacitores y por último con el filtro de corriente de 5° orden y así determinar el flujo de ésta corriente por el sistema de potencia y por el banco de capacitores o filtro de 5ª armónica según sea el caso, también se determina la distorsión armónica individual de voltaje de 5° orden en el bus 9 del sistema (que es donde está conectada la compensación de Q) y se comparara con el límite permitido por la Norma CFE L0000 45-2005 y por último se determinan las gráficas de impedancia contra frecuencia haciéndose énfasis en las frecuencias de resonancia paralelo y serie, confirmándose que donde aparece la resonancia paralelo las corrientes armónicas circundantes se amplifican y para la resonancia serie las corrientes armónicas se filtran.

Ésta tesis también sirve de guía para el dimensionamiento de bancos de capacitores y filtros ya que se realiza el cálculo manual del filtro de corriente de 5° orden con las consideraciones requeridas para las especificaciones técnicas de sus componentes (reactores y banco de capacitores trifásico), se consideran la tensión máxima del sistema de potencia, la frecuencia de sintonía, la calidad y las corrientes armónicas que circularán por el filtro.

Por último se proporcionan los criterios y cálculos de ajustes de los dispositivos de protección del filtro (Capacidad de fusibles que protegen a unidades capacitoras, ajustes de los relevadores 50/51/51N, 64N alarma, disparo y disparo severo) que es aplicable a cualquier banco de capacitores y filtro de cualquier capacidad y tensión.

Anexo A
Tabla 1.- Voltajes máximos permisibles de Unidades capacitadoras según Norma IEC 60871-1/1997 y IEEE Std-18 o 1036.

Tipo	IEC 60871-1	IEEE-1036	Duración Máxima
	Factor de voltaje por V_N ($V_{r.m.s.}$)	Factor de voltaje por V_N ($V_{r.m.s.}$)	
60 Hz.	1.00	1.1	Continua
60 Hz.	1.10	---	8H en C/24H
60 Hz.	1.15	✓ 1.25	30 min. En C/24H
60 Hz.	❖ 1.20	---	5 minutos
60 Hz.	❖ 1.30	✓ 1.30	1 minuto
60 Hz.	---	✓ 1.40	15 seg.
60 Hz.	---	✓ 1.70	1 seg.
60 Hz.	---	✓ 2.20	6 ciclos
Frecuencia Fund. y armónica	$(1.3 I_N \leq I_C \leq 1.5 I_N)$ a V_N y F_N sin transitorios(*)	$1.1 V_{RMS}$, $1.2 V_P$, $1.81 I_{RMS}$ y $1.35 Q_N$	Continua

Tabla 2.- Voltaje y potencia nominales, número de fases y BIL de unidades capacitadoras

Volts, RMS (terminal a terminal)	Kilovar	No. de fases	BIL (kV)
216	5, 7.5, 13.3, 20, y 25	1 y 3	30*
240	2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, y 50	1 y 3	30*
480	5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60, y 100	1 y 3	30*
600	5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60, y 100	1 y 3	30*
2 400	50, 100, 150, y 200	1	75
2 770	50, 100, 150, y 200	1	75
4 160,	50, 100, 150, y 200,	1	75
4 800	50, 100, 150, y 200	1	75
6 640	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	95
7 200	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	95
7 620	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	95
7 960	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	95
8 320	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	95
9 540	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	95
9 960	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	95
11 400	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	95
12 470	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	95
13 280	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	125
13 800	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	125
14 400	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	125
15 125	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	125
19 920	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	125 y 150
19 920+	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	125 y 150
20 800+	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	150 y 200
21 600+	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	150 y 200
22 800+	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	150 y 200
23 800+	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	150 y 200
24 940+	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1	150 y 200
4160 GrdY/2400	300 y 400	3	75
4800 GrdY/2770	300 y 400	3	75
7200 GrdY/4160	300 y 400	3	95
8320 GrdY/4800	300 y 400	3	95
12 470 GrdY/7200	300 y 400	3	125
13 200 GrdY/7620	300 y 400	3	125
13 800 GrdY/7960	300 y 400	3	125
14 400 GrdY/8320	300 y 400	3	125

* No aplicable a instalación interior.

+ Unidad con una boquilla (bushing).

Tabla 3.- Número mínimo recomendado de unidades capacitadoras en paralelo por grupo serie para limitar el voltaje a 1.1 p.u. en unidades restantes del grupo serie con una UC fuera.

Número de grupos serie	Estrella Aterrizada o Delta	Estrella flotante	Estrella flotante (secciones iguales)
1	—	4	2
2	6	8	7
3	8	9	8
4	9	10	9
5	9	10	10
6	10	10	10
7	10	10	10
8	10	11	10
9	10	11	10
10	10	11	11
11	10	11	11
12 y mayor	11	11	11

Tabla 4.- Voltaje en PU's de grupos serie sanos.

No. de gpos. serie	Estrella Aterrizada o Delta			Estrella flotante			Doble estrella flotante		
	V_a	V_b	V_c	V_a	V_b	V_c	V_a	V_b	V_c
1	—	1.00	1.00	—	1.73	1.73	—	1.73	1.73
2	2.00	1.00	1.00	1.50	1.15	1.15	1.71	1.08	1.08
3	1.50	1.00	1.00	1.29	1.08	1.08	1.38	1.04	1.04
4	1.33	1.00	1.00	1.20	1.05	1.05	1.26	1.03	1.03
5	1.25	1.00	1.00	1.15	1.04	1.04	1.20	1.02	1.02

Anexo B

Desviaciones Permisibles en las Formas de Onda de Tensión y Corriente en el Suministro y Consumo de Energía Eléctrica (CFE L-000045)

Las siguientes tablas indican las desviaciones máximas permisibles indicadas en la especificación CFE L-000045, aplicables tanto al suministrador como al consumidor que se encuentren conectados a la red eléctrica de CFE.

Tabla 2 Desbalance máximo permitido en la tensión en el punto de acometida

Tensión (kV)	Desbalance (%)
Menor de 1	3,0
Mayor de 1	2,0

Tabla 3 Límites máximos de distorsión armónica total en tensión y de CAIMT en el punto de acometida

Tensión (kV)	Distorsión Armónica Individual en % (CAIMT)	Distorsión Armónica Total de Tensión en % (DAT)
Menor de 1	6,0	8,0
de 1 a 35	5,0	6,5
Mayor de 35	2,0	3,0

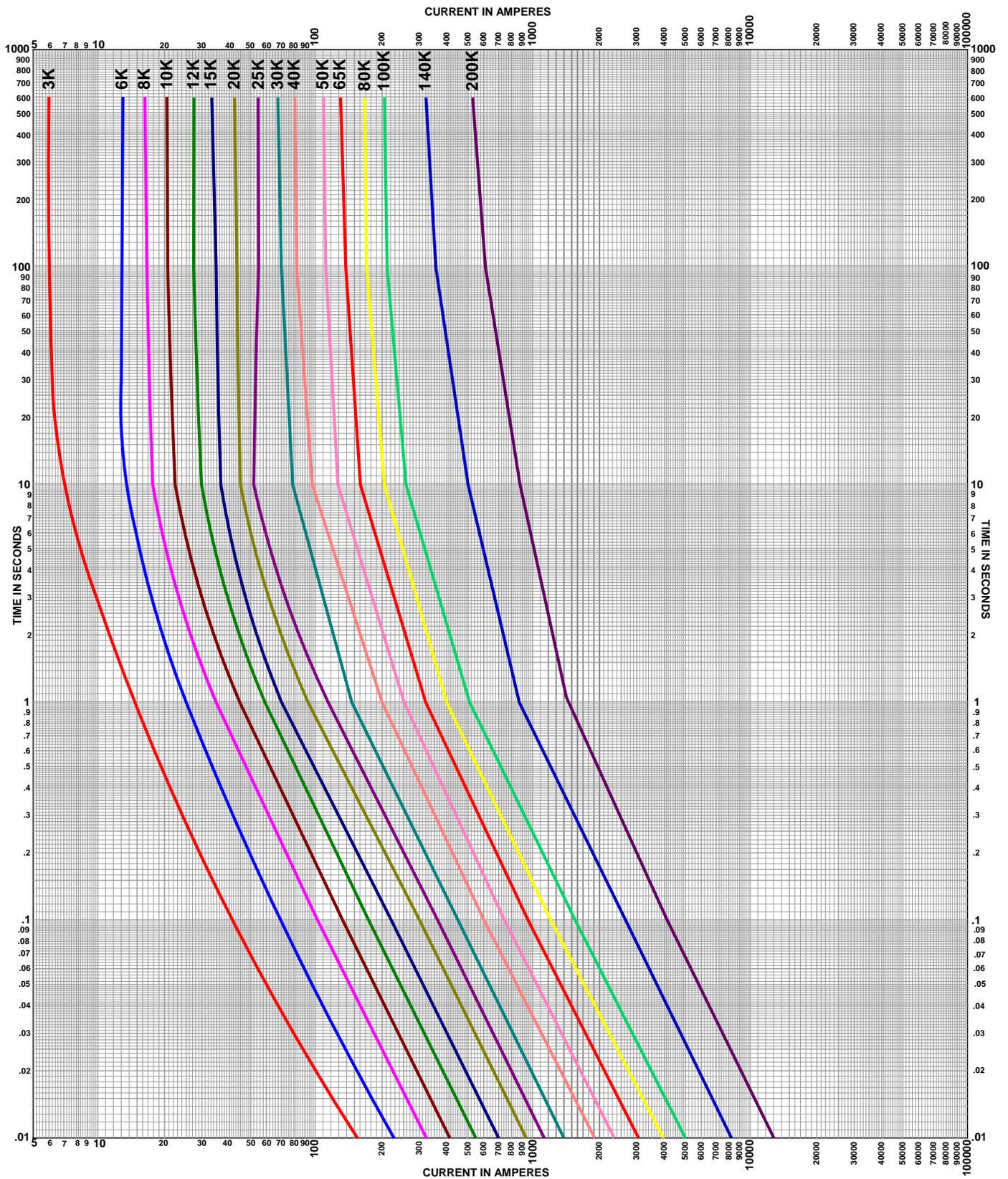
Tabla 4 Límites máximos de distorsión armónica total de corriente y de CAIMC para baja, media y alta tensión hasta 69 kV

Impedancia Relativa (I _{cc} / I _L)	para Armónicas Impares en % (CAIMC)					Distorsión Armónica Total de Corriente en % (DTC)
	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	h≥35	
(I _{cc} / I _L) < 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 ≤ (I _{cc} / I _L) < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 ≤ (I _{cc} / I _L) < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 ≤ (I _{cc} / I _L) < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
(I _{cc} / I _L) ≥ 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

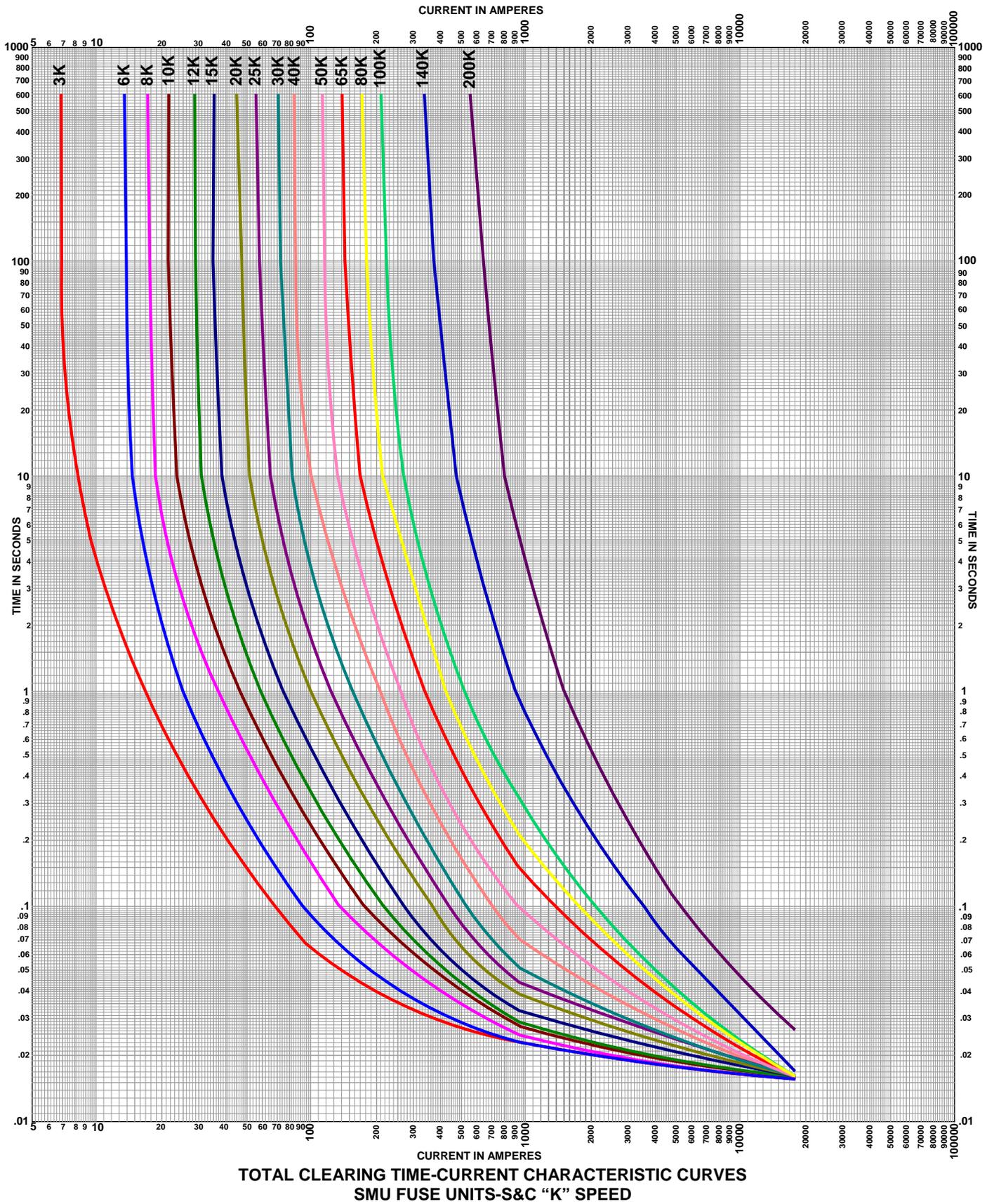
Tabla 5 Límites máximos de distorsión armónica total de corriente y de CAIMC para alta tensión (mayor de 69 kV y hasta 161 kV)

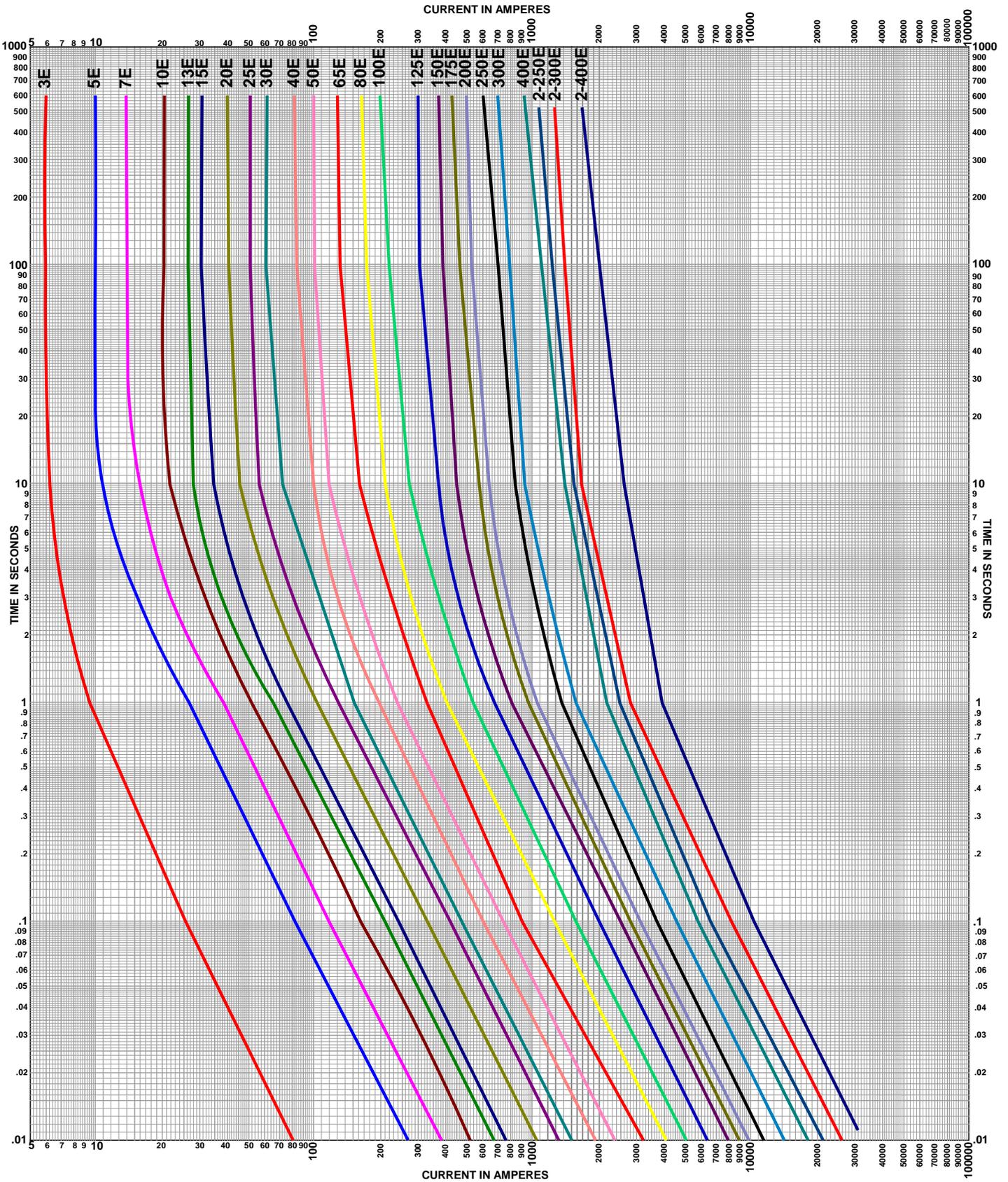
Impedancia Relativa (I _{cc} / I _L)	para Armónicas Impares en % (CAIMC)					Distorsión Armónica Total de Corriente en % (DTC)
	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	h≥35	
(I _{cc} / I _L) < 20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 ≤ (I _{cc} / I _L) < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 ≤ (I _{cc} / I _L) < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 ≤ (I _{cc} / I _L) < 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
(I _{cc} / I _L) ≥ 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

Anexo C

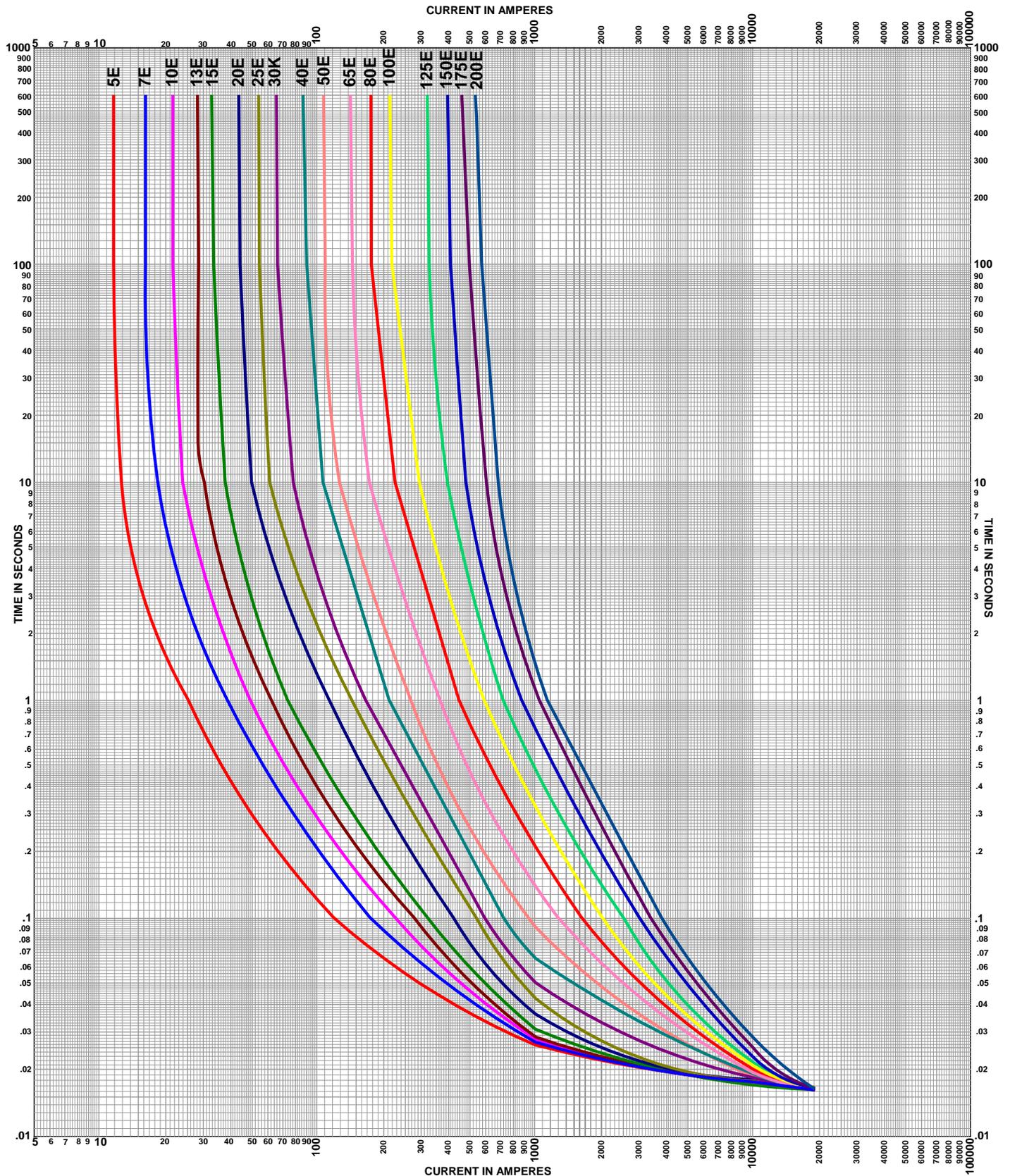


MINIMUM MELTING TIME-CURRENT CHARACTERISTIC CURVES
SMU FUSE UNITS-S&C "K" SPEED





MINIMUM MELTING TIME-CURRENT CHARACTERISTIC CURVES
SMU FUSE UNITS-S&C STANDARD SPEED



**TOTAL CLEARING TIME-CURRENT CHARACTERISTIC CURVES
SMU FUSE UNITS-S&C STANDARD SPEED**