



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“APLICACIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE FILTROS
DE ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA”**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO**

PRESENTAN:

**MARTINEZ JACOBO DAVID
VALENCIA MIGUEL ROBERTO**

DIRECTOR DE TESIS:

ING. FRANCISCO CUEVAS ARTEAGA



MÉXICO, D.F., CD UNIVERSITARIA MAYO DEL 2008

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por darme la vida, salud y la oportunidad de finalizar esta carrera universitaria, por guiarme en todo momento, por la paz y tranquilidad que otorga.

A mis Padres

Por creer en mi, por su apoyo, amor y comprensión que me hacen sentir en todo momento, por los valores que me inculcan, por sus sacrificios, porque me han dado todo lo que he necesitado para que juntos terminemos una etapa mas en mi formación integral.

Gracias Mamá por ser una luchadora incansable de nuestras metas y sueños, siempre con amor y paciencia y sin pedir nada a cambio.

Gracias Papá por tu confianza y por las oportunidades que me has brindado, por tu sustento y la lealtad incondicional a tu familia.

A mis Hermanos

Por la ayuda que siempre me han dado incondicionalmente en esta fase de mi vida, por la confianza en mis actividades y por creer en mi.

A mi Universidad

Por darme la formación académica, por hacerme parte de sus principios humanísticos, por su sentido ético de responsabilidad y de servicio social y por supuesto a la Facultad de Ingeniería y a mis profesores, gracias.

A mi Director de tesis

Por su atención y colaboración de esta tesis, por aclarar todas nuestras dudas, por toda la información proporcionada, así como los conocimientos y la experiencia del tema.

David Martínez Jacobo

AGRADECIMIENTOS

Estas palabras son dedicadas de parte de Roberto Valencia Miguel, a todas aquellas personas que de alguna forma tuvieron que ver con la realización de esta tesis:

A mis padres

A quien gracias a su esfuerzo, dedicación y valor, culmino el ideal que mis padres deseaban que obtuviera; este logro alcanzado es también suyo, ya que este esfuerzo fue inspirado en ustedes.

A mis hermanos

Gracias a su apoyo, comprensión, y por la ayuda que me dieron para lograr superar las adversidades en los momentos más difíciles.

Al Ing. Francisco Cuevas Arteaga

De antemano gracias por la confianza, y el privilegio de ser nuestro director de tesis, por el tiempo para guiarme y ayudarme en la realización de esta tesis, ya que sus conocimientos fueron fundamentales para lograr culminar este objetivo.

A los Ingenieros de la DGOyC

Mi mas sincero agradecimiento por el apoyo recibido durante las asesorías para la realización de esta tesis, por la espera y confianza en mí, y por el gusto de haberlos conocido y haberme aceptado como uno mas de ustedes.

APLICACIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE FILTROS DE ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Objetivo	1
Justificación	2
Introducción	3
1. Armónicas en los Sistemas Eléctricos de Potencia	4
1.1 Definición	4
1.2 Representación de las Armónicas	4
1.3 Características de las Armónicas	5
1.4 Elementos Generadores de Armónicas	6
1.5 Problemas Ocasionados por Armónicos	12
1.6 Solución a Problemas de Armónicas	14
1.6.1 Filtros de Armónicas	14
1.6.1.1 Filtros Pasivos	14
1.6.1.2 Filtros Activos	15
1.7 Resonancia	15
1.7.1 Resonancia Serie	15
1.7.2 Resonancia Paralelo	16
1.8 Condiciones de Resonancia	18
2. Perturbaciones en los Sistemas Eléctricos de Potencia	19
2.1 Transitorios	19
2.2 Variaciones de Corta Duración	19
2.3 Variaciones de Larga Duración	20
2.4 Desbalance de Voltaje	20
2.5 Distorsión de la Forma de Onda	21
2.6 Fluctuaciones de Tensión	22
2.7 Variaciones de Frecuencia	22
3. Consideraciones para el Diseño de Filtros de Armónicas	23
3.1 Potencia Reactiva Capacitiva del Filtro	24
3.2 Índices para la Medición de Armónicos	25
3.2.1 Índices para Armónicos de Corriente	25
3.2.2 Índices para Armónicos de Tensión	25
3.3 Límites Permisibles de Corrientes y Voltajes Armónicos	26
3.3.1 Límites de Corrientes Armónicas	26
3.3.2 Límites de Voltajes Armónicos	27
3.4 Capacidad de Aguante del Equipo	28
3.4.1 Transformadores	28

3.4.2	Capacitores	29
3.5	Condiciones Normales de Operación del Sistema	31
3.6	Condiciones Normales de Operación del Filtro de Armónicas	31
3.7	Condiciones de Contingencia del Sistema	32
3.8	Condiciones de Contingencia del Filtro de Armónicas	32
3.9	Localización de Filtros de de Armónicas	33
3.10	Uso de Bancos de Capacitores Existentes	33
3.11	Configuración de Filtros de Armónicas	33

4.	Filtros de Armónicas en los Sistemas Eléctricos de Potencia	35
4.1	Filtros de Armónicas Desintonizados o Antirresonantes	35
4.2	Filtros de Armónicas en Derivación	36
4.3	Razones de Sobrecarga Armónica	37
4.4	Especificaciones Técnicas de los Componentes	38
4.4.1	Capacitores para Filtros de Armónicos	38
4.4.1.1	Pruebas a Capacitores	39
4.4.2	Reactores para Filtros de Armónicas	39
4.4.2.1	Reactores en Línea	41
4.4.2.2	Pruebas a Reactores	41
4.5	Tolerancias de Capacitores y Reactores	42
4.6	Conductores	42
4.7	Contactores	43
4.8	Fusibles	43
4.9	Interruptores	44
4.10	Cuchillas de Puesta de Tierra y Bloqueos	46
4.11	Apartarrayos	46
4.12	Control de Switcheo para Filtros de Armónicas	47
4.13	Protecciones del Filtro de Armónicas	49
4.13.1	Consideraciones en Relevadores para Aplicaciones en Filtros Armónicos	49
4.13.2	Protección de Sobrevoltaje	50
4.13.3	Protección de Sobrecorriente	51
4.13.4	Protección de Desbalance y de Desintonización del Filtro de Armónico	52
4.13.5	Protección de Sobrecarga de Sobrecarga del Filtro Armónico	54
4.14	Selección de Componentes	55
4.14.1	Selección del Capacitor del Filtro de Armónicas	56
4.14.2	Selección del Reactor del Filtro de Armónicas	56
4.14.3	Selección del Apartarrayos	57
4.15	Selección del Punto de Conexión	59
4.15.1	Filtro de Armónicas en una Carga Individual	59
4.15.2	Filtros de Armónicas en un Bus de Distribución	61
4.15.3	Combinación Bus –Carga	64
4.16	Ensamble de Filtros de Armónicos	64
4.17	Ensamble de la Resistencia a los Filtros de Armónicos Paso Altas	65
4.18	Ensamble del Capacitor en el Filtro de Armónicos	66
4.19	Ensamble del Reactor en el Filtro de Armónicos	74

5.	Diseño de Filtros de Armónicos	78
5.1	Procedimiento de Diseño del Filtro de Armónicas	78

5.2	Determinación de la Capacidad en kVAR del Filtro de Armónicas	79
5.3	Selección Inicial de la Sintonía del Filtro	79
5.4	Optimizar la Configuración del Filtro con Guías de Armónicas Apropriadadas	82
5.5	Determinar la Capacidad de los Componentes	83
5.5.1	Los Capacitores del Filtro de Armónicas	84
5.5.2	El Reactor del Filtro de Armónicas	86
5.5.3	La Resistencia del Filtro de Armónicas	88
5.5.4	El Interruptor del Filtro de Armónicas	89
5.5.5	Conductores	89
5.5.6	Apartarrayos	90
5.5.7	Cuchillas de Puesta a Tierra y Bloqueos	90
5.5.8	Fusibles para el Filtro de Armónicas	90
5.5.9	Transitorios por Switcheo	91
5.6	Ejemplo Numérico	92
5.6.1	Filtro de Armónicas para Baja Tensión	92
5.6.2	Forma de Onda del Convertidor de 6 Pulsos	93
5.6.3	Señal en el Espacio de la Frecuencia	93
5.6.4	Verificación de Límites Basados en la Norma IEEE-519-1992	94
5.6.5	Corrección de Factor de Potencia	95
5.6.6	Sintonía del Filtro	95
5.7	Simulación del Filtro de Armónicas	97
5.8	Optimización del Filtro	99
5.8.1	Determinar la Capacidad de los Componentes del Filtro	99
5.8.1.1	Banco de Capacitores	99
5.8.1.2	Corrientes Armónicas que Fluyen por el Filtro	100
5.8.1.3	Método de Sobredimensionamiento del Banco de Capacitores	102
5.9	Simulación del Sistema	104
5.9.1	Resonancia Serie	104
5.9.2	Resonancia Paralela	104
5.9.3	Cálculo de la Impedancia del Sistema	105
5.9.4	Análisis Armónico sin Filtro	106
5.9.5	Análisis Armónico con Filtro	107
5.10	Filtro de Armónicas en Alta Tensión	109
5.10.1	Distorsión Armónica del Convertidor	110
5.10.2	Diseño del Filtro de Armónicas	113
5.10.2.1	Corrección de Factor de Potencia (Capacidad de Potencia Reactiva del Filtro)	113
5.10.2.2	Sintonización del Filtro de Armónicas	113
5.10.2.3	Cálculo de la Reactancia Capacitiva del Filtro a Frecuencia Fundamental	114
5.10.2.4	Cálculo de la Reactancia Inductiva del Filtro a Frecuencia Fundamental	114
5.10.2.5	Cálculo de la Resistencia de un Filtro	114
5.10.2.6	Cálculo de la Reactancia Inductiva y Capacitiva del Filtro	115
5.10.2.7	Resonancia Serie	115
5.10.2.8	Resonancia Paralela	116
5.10.2.9	Simulación del Filtro de Armónicos	116
5.10.3	Análisis de Impedancias	117
5.10.3.1	Impedancias del Sistema en P.U.	118
5.10.3.2	Impedancia del Filtro	121

	5.10.3.3	Impedancias del Sistema a Distintas Frecuencias	123
	5.10.3.4	Simulación del Sistema	124
5.10.4		Optimización del Filtro de Armónicos	125
	5.10.4.1	Banco de Capacitores	125
	5.10.4.2	Corrientes Armónicas que Fluyen por el Filtro	125
	5.10.4.3	Método de Sobredimensionamiento del Banco de Capacitores	127
	5.10.4.4	Arreglo del Banco de Capacitores	129
	5.10.4.5	Dimensionamiento del Conductor del Filtro	131
	5.10.4.6	Análisis Armónico con el filtro	131

Conclusiones	133
---------------------------	-----

Anexos

Anexo A - Límites de Distorsión de Voltajes y Corrientes Armónicos	134
Anexo B - Serie Trigonométrica de Fourier	140
Anexo C - BIL de Sistema para Interruptores y Ensamble de Capacitor	146
Anexo D - Tabla para Corregir Factor de Potencia	149
.....	
Anexo E - Tipos de Filtros Armónicos	151
Anexo F - Especificaciones de Filtros Armónicos	152

Referencias	157
--------------------------	-----

Figuras

Figura 1.1 - Configuración Típica de un Compensador Estático de VAR ...	7
Figura 1.2 - Aplicación típica de un CEV	8
Figura 1.3 - Configuración Típica de un Compensador Estático de VAR ...	8
Figura 1.4 - Configuración Típica de un Rectificador Monofásico.....	10
Figura 1.5 - Rectificador de Onda Completa Trifásico	11
Figura 1.6 - Diagrama Unifilar	16
Figura 1.7 - Resonancia Paralelo Diagrama de Impedancias	17
Figura 3.1 - Filtro de Armónicas Conectado en Derivación para Absorber las Corrientes Armónicas Generadas por la Carga no Lineal	23
Figura 3.2 - Configuraciones Diferentes con Filtrado Idéntico	34
Figura 4.1 - Tiempo de Descarga a 10% del Voltaje Nominal para Unidades Capacitoras de Media Tensión Teniendo 50 Volts en 5 Minutos ...	49
Figura 4.2 - Selección del Punto de Conexión	60
Figura 4.3 - Flujo de Corrientes Armónicas	61
Figura 4.4 - Capacidad de Aguante de los Capacitores a Sobrevoltajes Transitorios	70
Figura 4.5 - Máximos Sobrevoltajes de Contingencia a Frecuencia del Sistema de Unidades Capacitoras (sin transitorios superpuestos ni contenido armónico)	72
Figura 4.6 - Filtro con Reactor de Lado de la Fuente en Estrella con Capacitores con Neutro Flotante	77
Figura 4.7 - Filtro con Capacitor de Lado de la Fuente en Estrella con Reactor con Neutro Flotante	77
Figura 5.1 - Diagrama Unifilar del Sistema a Estudiar	92
Figura 5.2 - Forma de Onda Distorsionada del Convertidor de 6 Pulsos ...	93
Figura 5.3 - Análisis Armónico en el Espacio de las Frecuencias	94
Figura 5.4 - Curva de Impedancia Contra Frecuencia	98
Figura 5.5 - Curva de Respuesta Angular del Filtro	98
Figura 5.6 - Curva de Impedancia Contra Frecuencia del Sistema	105
Figura 5.7 - Respuesta Angular del Sistema	105
Figura 5.8 - Forma de Onda de la Señal en el Bus de 440 V sin Filtro de Armónicos	106
Figura 5.9 - Análisis Armónico en el Espacio de las Frecuencias en el Bus de 440 V	106
Figura 5.10 - Forma de Onda de la Señal en el Bus de 440 V con el Filtro de Armónicos	107
Figura 5.11 - Análisis Armónico en el Espacio de las Frecuencias en el Bus de 440 V con Filtro de Armónicos	107
Figura 5.12 - Distorsión Armónica Total de Voltaje en el PAC	108
Figura 5.13 - Diagrama Unifilar sin Filtro	110
Figura 5.14 - Forma de Onda Distorsionada	111
Figura 5.15 - Análisis Armónico en el Espacio de las Frecuencias	111
Figura 5.16 - Respuesta a la Frecuencia del Filtro	116
Figura 5.17 - Respuesta Angular del Filtro	117

Figura 5.18 - Diagrama Unifilar	117
Figura 5.19 - Diagrama de Impedancias	118
Figura 5.20 - Diagrama de Impedancias ara la Carga	120
Figura 5.21 - Diagrama Equivalente	121
Figura 5.22 - Impedancia de Respuesta a la Frecuencia	124
Figura 5.23 - Arreglo de Banco de Capacitores	129
Figura 5.24 - Arreglo de Unidad Capacitora	130
Figura 5.25 - Forma de Onda de Corriente en el PAC	131
Figura 5.26 - Forma de Onda de Voltaje en el PAC	132

Figuras de los Anexos

Figura B.1 - Función con Componente de Corriente Directa	141
Figura B.2 - Función de Período T	141
Figura B.3 - Gráfica de Función en Serie de Fourier	143
Figura B.4 - Pulso Rectangular	144
Figura B.5 - Transformada de Fourier de una Función Pulso Rectangular ..	145
Figura E.1 - Tipos de Filtros de Armónicas Comúnmente Aplicados	149
Figura F.1 - Los Filtros de Armónicos Reducen la Distorsión de Armónicos de Tensión y Corriente y Corrigen el Factor de Potencia	151
Figura F.2 - Típico Filtro Armónicos Automático de Dos Etapas Mostrando las Características de Ubicación de los Compartimientos Aislados	153
Figura F.3 - Típico Diagrama de Tres Líneas. Número de Etapas, Evaluaciones y Configuración Específica del Banco y Componentes son Dependientes de la Evaluación de Tensión, Carga Armónica, Requerimientos de Sintonización y Requerimientos del Cliente	155
Figura F.4 - Típica Clasificación de Diagrama de Tres Líneas, Configuración Específica de Bancos, Componentes y Dependientes de los Requerimientos del Cliente y Clasificación de Tensión	156

Tablas

Tabla 1 - Límites Máximos de Distorsión Armónica Total de Corriente (THDi) y Distorsión Armónica Individual de Corriente (HDi). Para Baja, Media y Alta Tensión Hasta 69 kV	27
Tabla 2 - Límites Máximos de Distorsión Armónica Total de Voltaje (THDi) y Distorsión Armónica Individual de Voltaje (HDi). Para Baja, Media y Alta Tensión Hasta 69 kV	27
Tabla 3 - Factor K para Transformadores	29
Tabla 4 - Voltajes Máximos Permisibles en Unidades Capacitoras Según Norma IEEE-1036-1992	30
Tabla 5 - Características de los Reactores con Núcleo de Hierro y con Núcleo de Aire	41
Tabla 6 - Espectro de Corrientes Armónicas del Convertidor de 6 Pulsos ..	93
Tabla 7 - Espectro de Corrientes Armónicas	110
Tabla 8 - Base en por Unidad	118

Tablas de los Anexos

Tabla A - Límites Máximos de Distorsión Armónica Total en Tensión en el
--

Punto de Acometida, para Alta Tensión	134
Tabla B - Límites Máximos de Distorsión Armónica Total en Tensión en el Punto de Acometida para Baja Tensión	134
Tabla C - Desbalance Máximo Permitido en la Tensión en el Punto de Acometida	134
Tabla D - Límites para Redes de Bajo Voltaje	135
Tabla E - Límites para Redes en Plantas Industriales	135
Tabla F - Límites de Distorsión Armónica de Voltaje	135
Tabla G - Límites de Distorsión Armónica para Bajo Voltaje	136
Tabla H - Límites de Distorsión Armónica para Medio Voltaje ($1\text{kV} < V < 35\text{kV}$)	136
Tabla I - Límites de Distorsión Armónica Según la NORSOK E -001	136
Tabla J - Límites de Distorsión Armónica (H _{Di} %), para Sistemas de Distribución para Armónicas Impares	137
Tabla K - Límites de Distorsión Armónica (H _{Di} %), para Sistemas de Subtransmisión para Armónicas Impares	137
Tabla L - Límites de Distorsión Armónica (H _{Di} %), para Sistemas de Alto Voltaje para Armónicas Impares	137
Tabla M - Límites Máximos de Distorsión Armónica Total e Individual de Corriente. Para Baja, Media y Alta Tensión Hasta 69 kV (para Armónicas Impares)	138
Tabla N - Límites Máximos de Distorsión Armónica Total de Corriente. Para Alta Tensión (Mayor de 69 kV y Hasta 161 kV), para Armónicas Impares	138
Tabla Ñ - Límites Máximos de Distorsión Armónica Total de Corriente. Para Alta Tensión (Mayor de 161 kV), para Armónicas Impares	138
Tabla O - Límites de Distorsión Armónica de Corriente. (Corriente de Entrada al Equipo < 16 A por Fase)	139
Tabla P - Límites de Distorsión Armónica de Corriente para Convertidores de 6 y 12 Pulsos	139
Tabla Q - Niveles de Aislamiento Estándar para Voltajes Nominales Menores de 52 kV Serie I (Para Europa y otros Países)	146
Tabla R - Niveles de Aislamiento Estándar para Voltajes Nominales Menores de 52 kV Serie II (Para Norteamérica y otros Países)	146
Tabla S - Niveles de Aislamiento para Voltajes $52\text{ kV} \leq U_m < 300\text{ kV}$	147
Tabla T - Niveles de Aislamiento para Voltajes $U_m \geq 300\text{ kV}$	148
Tabla U - Multiplicador para Corregir Factor de Potencia	150

OBJETIVO

Contar con una guía para el dimensionamiento y especificación de filtros de armónicas, así como la selección de los componentes, protecciones y su control, para aplicarse a sistemas comerciales y empresas suministradoras.

Suministrar pautas para filtros armónicos usados en sistemas de 50 y 60 Hz, para la reducción de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos de potencia.

JUSTIFICACIÓN

Las redes eléctricas alimentan un gran número de cargas no lineales las cuales han crecido de forma considerable, con lo cual también aumenta la distorsión armónica en los sistemas eléctricos. La necesidad de filtrar armónicas de las redes eléctricas y aumentar el factor de potencia es necesario si se quiere ser eficiente en la transmisión, distribución y el consumo de energía.

El proceso de diseño de un filtro de armónicas requiere información acerca del sistema de potencia y del ambiente en el cual el filtro armónico será instalado, como son; voltaje nominal del sistema de potencia de, el BIL típico del equipo para el nivel de voltaje del sistema y la frecuencia fundamental. Es necesario hacer el dimensionamiento del filtro de armónicas tomando en cuenta las características de operación de cada uno de los componentes del filtro.

En esta tesis se analizará la normatividad existente para la especificación de los componentes de un filtro de armónicas como son; capacitores, reactores, resistencias, interruptores, fusibles, contactores, apartarrayos, cuchillas, equipo de control y conductores. También los tipos de configuraciones de un filtro de armónicas así como la capacidad de banco de capacitores, la sintonía del filtro y requerimientos de sus elementos, para que funcionen correctamente.

Se analizarán las desviaciones máximas permisibles de tensión, los límites máximos de distorsión armónica de corriente y distorsión armónica de tensión, la corrección del factor de potencia entre otros. Se suministrará una guía para el diseño de filtros de armónicos donde sus componentes cumplan con las normas vigentes y tengan el desempeño deseado. No existen normas específicas para filtros de armónicas, aunque existen normas para prácticamente todos los componentes que se usan en un filtro de armónicas.

Con este trabajo se da una guía para la selección de los componentes así como de las protecciones que debe tener el filtro de armónicas. También se dan los pasos necesarios para diseñar el filtro, ya sea para bajo, medio o alto voltaje.

INTRODUCCIÓN

Las armónicas han existido en los sistemas de potencia por varios años. No obstante, estas consecuencias, han adquirido mayor importancia, debido a los ajustes simultáneos de dos tendencias: el incremento en el uso de bancos capacitores en el sistema eléctrico, con el fin de mejorar el factor de potencia; y el uso de convertidores electrónicos de potencia en la industria, buscando una eficiencia y confiabilidad mas alta en el sistema de eléctrico de potencia.

En los sistemas eléctricos por lo general se trata de tener un factor de potencia alto, lo cual tiene la ventaja de reducir; la capacidad del equipo requerido, menores perdidas en líneas y transformadores, caídas de voltaje; y también disminuye la necesidad de usar equipos reguladores de voltaje. Por otro lado, el mejoramiento del factor de potencia, viene acompañado por un incremento en el uso de variadores de velocidad y equipo electrónico que se maneja en la industria. El uso de estos equipos en la industria genera fenómenos indeseables, los cuales pueden interactuar con los bancos de capacitores dando como resultado la amplificación de corrientes y voltajes.

El siguiente desarrollo que ha experimentado la industria recientemente es la electrónica de estado sólido, resultando en la introducción de equipos delicados, los cuales son más sensibles a la calidad de la energía en comparación con la robustez de equipos antiguos, al mismo tiempo estos aparatos provocan distorsión de voltaje y corriente en las formas de onda.

Los generadores convencionales del SEP están diseñados para operar con formas de onda senoidales, así de esta manera los servicios públicos eléctricos luchan por proporcionar a los consumidores energía eléctrica confiable y limpia, con formas de onda senoidales de frecuencia fundamental que no representan daño a los equipos.

Debido a estas situaciones se han puesto las bases para poner atención considerable a la calidad de la energía y seriamente reevaluar la generación de voltajes y corrientes distorsionadas. Una manera de disminuir el contenido de armónicos en un sistema eléctrico es por medio de filtros de armónicas los cuales serán analizados en el presente trabajo.

1. ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Armónica es un adjetivo general usado para describir fenómenos de tipo oscilatorio o repetitivo. Sin embargo este término ha ganado un significado específico cuando lo aplicamos al análisis de los sistemas eléctricos de potencia.

1.1 DEFINICIÓN

Las **armónicas** son componentes de una forma de onda distorsionada cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

Armónicas Características: Son aquellas producidas por equipos convertidores que utilizan semiconductores, por ejemplo para convertidores de seis pulsos, las armónicas características son armónicas impares no múltiplos de tres, 5, 7, 11, 13, etc.

Las armónicas características se pueden determinar con la siguiente fórmula:

$H = kQ \pm 1$; $K =$ cualquier entero; $Q =$ número de pulsos del convertidor

Las armónicas características se producen bajo las siguientes condiciones "ideales":

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

Armónicas no Características: Son producidas por los convertidores estáticos de potencia, y se generan por un desequilibrio en el sistema de potencia de corriente alterna, ángulos de retraso asimétricos, y/o la operación de un cicloconvertidor, por la diferencia en las impedancias de las fases, cuando no se cumplen las condiciones ideales de las armónicas características, desbalances en el sistema o pulsos de encendido no uniformes.

1.2 REPRESENTACIÓN DE LAS ARMÓNICAS

Las series de Fourier representan una manera efectiva de estudiar y analizar la distorsión armónica. Esto nos permite inspeccionar los distintos componentes de una onda distorsionada a través de la

descomposición de la misma. Generalmente, cualquier onda periódica puede ser expandida en una serie de Fourier como se muestra a continuación:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi t}{T} + b_n \sen \frac{n\pi t}{T} \right)$$

$f(t)$: Es una función periódica de frecuencia f_0 , frecuencia angular $\omega_0 = 2\pi f_0$ y periodo

$$T = \frac{1}{f_0} = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

Los coeficientes de la serie de Fourier están dados por:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_a^{a+2T} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_a^{a+2T} f(t) \cos \frac{n\pi t}{T} dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_a^{a+2T} f(t) \sen \frac{n\pi t}{T} dt$$

1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS ARMÓNICAS

Simetría

- Simetría impar se caracteriza por $f(-t) = -f(t)$ dando como resultado solo términos senoidales en la serie de Fourier.
- Simetría par se caracteriza por $f(-t) = f(t)$ dando como resultado solo términos cosenoidales en la serie de Fourier.
- Simetría de media onda, $f(t \pm T/2) = -f(t)$ tienen cero componentes de DC y el resultado es la cancelación de armónicas de orden par (2, 4, 6,...), esta característica nos permite ignorar armónicas pares en sistemas de potencia esto consiste en componentes bilaterales que producen corrientes y voltajes las cuales tienen simetría de media onda.

Secuencia de Fases

En sistemas trifásicos balanceados, los componentes armónicos son enteramente de secuencia positiva, negativa o cero en la frecuencia individual, esto es:

- La fundamental así como las armónicas cuarta, séptima,... son de secuencia positiva
- Las armónicas segunda, quinta, octava,... son de secuencia negativa
- Las armónicas triples (tercera, sexta, novena)... son de secuencia cero

h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Sec.	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Linealidad

La propiedad de las formas de onda en sistemas de potencia balanceados es que tienen sus respuestas a diferentes armónicas independientes unas de otras, pudiendo usar cada armónica por separado. Esto es construir el circuito equivalente para cada armónica (en el dominio de la frecuencia) y resolver para corrientes y voltajes. La respuesta total es obtenida sumando las componentes de la armónica en el dominio del tiempo.

1.4 ELEMENTOS GENERADORES DE ARMÓNICAS

Las armónicas de corriente tienen su origen en la existencia de cargas no lineales conectadas al sistema de potencia. Hay que tener en cuenta que todas las cargas reales son, en mayor o menor medida, no lineales, aunque en muchos casos, existe un alto grado de homogeneidad entre la tensión y la corriente asociadas a las mismas, por lo que su característica no lineal resulta despreciable. Sin embargo, existe otro grupo de cargas en las que su característica no lineal resulta predominante dentro de su rango de operación. Esto se debe al material semiconductor (diodos, tiristores) mediante el cual son fabricados, y a que la operación de este tipo de equipos se basa en pulsos, lo cual genera armónicas. A continuación se detallan las cargas más relevantes no lineales:

Los compensadores estáticos de vars

Controlan voltaje por el ajuste de la cantidad de potencia reactiva suministrada o absorbida del sistema. El CEV usa reactores y capacitores los cuales son controlados o switcheados con tiristores. Como los controladores de voltaje operan por fase, estos generan armónicas típicas de convertidores de dos pulsos, en condiciones de desbalance u otras condiciones anormales, podrán también producir armónicas no características. El uso primario de un controlador de voltaje en el sistema de potencia reactiva (var) o CEV. Algunas aplicaciones de los CEV son en cargas industriales que varían rápida y significativamente, tales como hornos de arco eléctrico, un CEV es usado para suministrar potencia reactiva local a la carga. Esto reduce el flicker e incrementa la eficiencia del horno. Otra aplicación es en los sistemas de potencia donde el CEV opera continuamente para regular el voltaje y mejorar la capacidad de transferencia de potencia a través del sistema de transmisión.

Hay muchos diseños de CEV, el más común consiste de capacitores en derivación con un reactor controlado por tiristores conectado en paralelo.

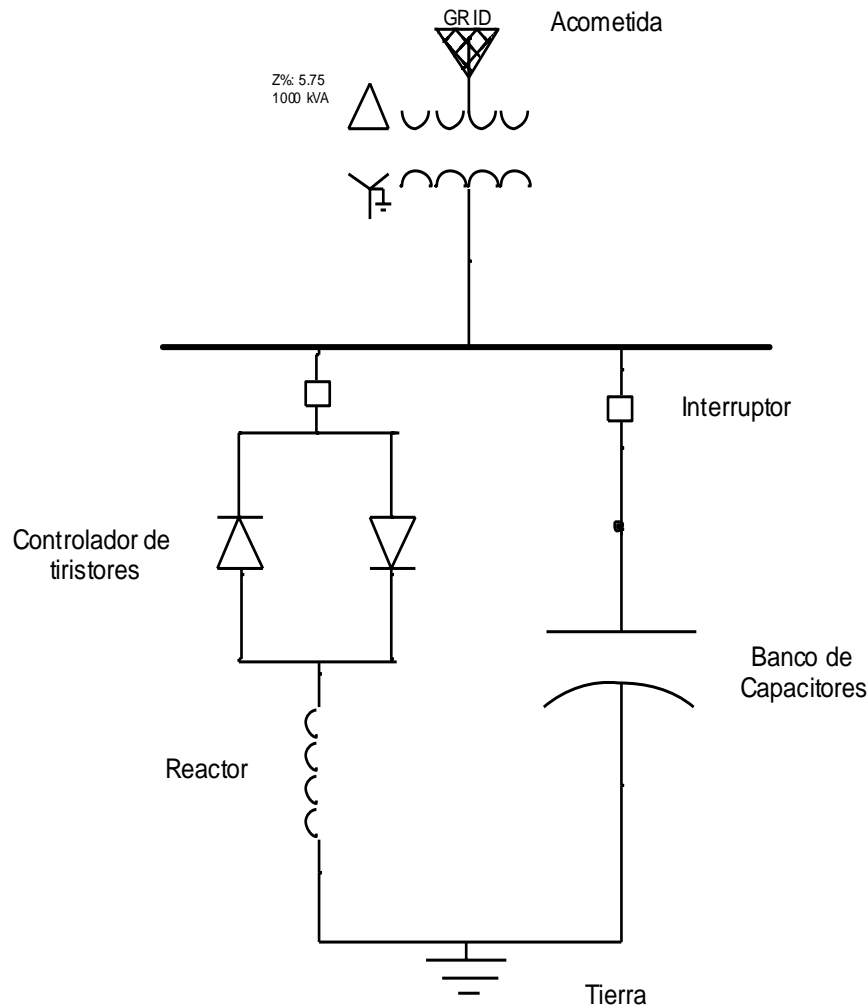


Figura 1.1 – Configuración típica de un compensador estático de var (CEV).

En la figura 1.2 ilustra el ejemplo de una aplicación industrial donde se tiene un horno conectado al primario del transformador o al bus de distribución principal. El compensador estatico de var´s consiste en un reactor en derivación controlado por tiristores y filtros LC en derivación. Los filtros están sintonizados para eliminar la 2º, 3º, 4º y 5º armónicas.

El CEV dentro de algunas aplicaciones que se le da es en las empresas suministradoras, en donde desempeña la función de suministrar vars cuando el voltaje es bajo y absorberlo cuando el voltaje es alto.

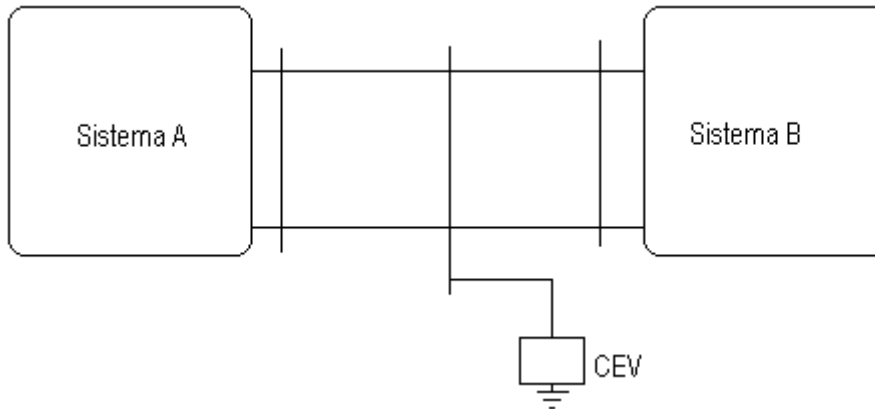


Figura 1.2 – Aplicación típica de un CEV.

El suministro o absorción de vars se realiza por el control de fase de los tiristores del reactor. Los filtros de 5^a, 7^a, 11^a y 13^a armónicas pueden ser instalados, las corrientes de 3^a armónica generadas por la modulación de corriente son confinadas en la conexión delta del reactor trifásico.

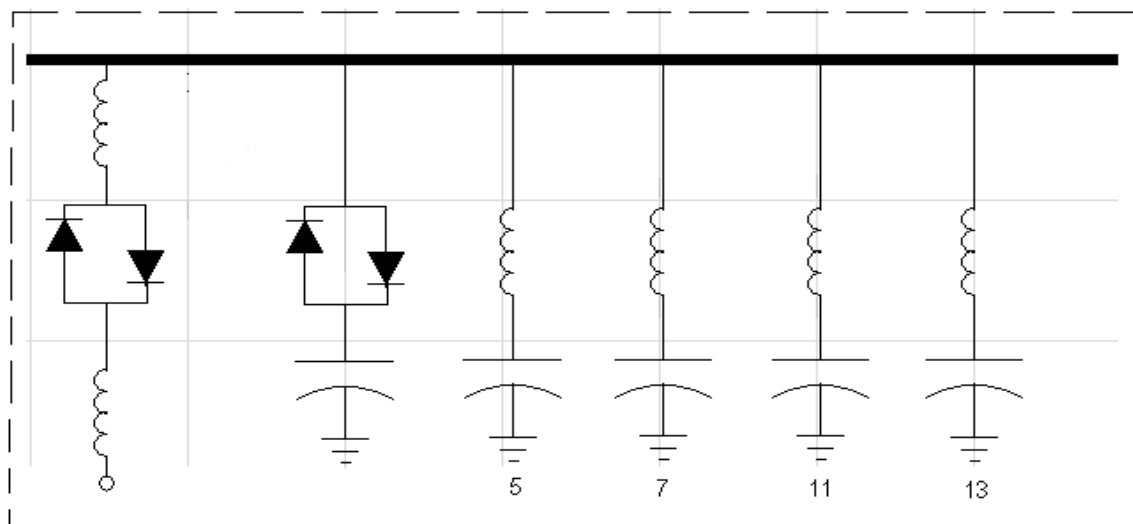


Figura 1.3 – Configuración típica de un compensador estático de var con filtros

Los hornos de arco

Presentan una característica tensión-corriente severamente no lineal, que además es muy variable en el tiempo, en función del estado de fusión del material, del refinado de este y de la longitud del arco eléctrico dentro del horno. Según lo expuesto, estos dispositivos no presentan una distorsión armónica constante de régimen permanente y su característica se describe a partir de valores probabilísticos.

Las lámparas de descarga

Se basan en la existencia de arco eléctrico controlado en su interior, por lo que también presentan una característica tensión – corriente altamente no lineal. Aunque los fluorescentes son lámparas de descarga, en este caso se está haciendo alusión a lámparas de vapor de sodio, aditivos metálicos o vapor de mercurio, que suelen ser de mayor potencia y se utilizan principalmente en la iluminación de grandes locales. La concentración de este tipo de lámparas conectadas entre fase y neutro da lugar a serios problemas relacionados con la corriente circulante por el conductor de neutro, las armónicas generadas por este tipo de fuente son predominantemente de 3ª armónica, esto se debe a que la balastra es un dispositivo ferromagnético que requiere corriente de excitación que contiene 3ª armónica.

Los transformadores

Generan armónicos de corriente debido a la característica no lineal de su núcleo ferromagnético. Para que exista un flujo senoidal en el núcleo de los transformadores, se requiere de la I_{exc} la cual contiene I_3 , I_5 , I_7 , principalmente. Este fenómeno se ve agravado cuando se opera a los transformadores con un sobrevoltaje, saturándose su núcleo e incrementando la I_{exc} y las magnitudes de 3ª, 5ª, y 7ª, armónica.

Las máquinas rotatorias

También pueden generar armónicos, aunque en menor medida que los transformadores. Dichas corrientes armónicas se deben principalmente a las variaciones periódicas de velocidad o de carga, a la saturación de la máquina, a la disposición de los embobinados o de las ranuras y a las imperfecciones en los polos de las máquinas síncronas, el tipo de devanado de un motor también influyen la generación de armónicas, los devanados típicos del motor tienen 5 o 7 ranuras por polo, produciendo corrientes de 5ª y 7ª armónica, las armónicas que se producen en los generadores de C.A. son por que desde un punto de vista práctico y económico, es imposible distribuir los devanados del estator para que ellos generen ondas de voltaje senoidales puras. El voltaje inducido en el estator es ligeramente distorsionado y contiene una componente predominante de 3ª armónica, esto causa que corriente de 3ª armónica fluya cuando el generador opera bajo carga.

Convertidores estáticos de potencia

Los CEP presentan la categoría más grande de los dispositivos que producen armónicas en los SEP. Los convertidores por su operación pueden ser convertidores de, C.A. a C.D., C.D. a C.A., ó de C.A.

a C.A., los CEP están compuestos básicamente por circuitos como son el rectificador y el inversor; por lo que las armónicas producidas por los CEP son la conjunción de sus circuitos básicos. La mayor aplicación de los convertidores estáticos está en los dispositivos variadores de velocidad para el control de motores. Estos dispositivos (drive) estáticos se usan ahora en todos los motores industriales, ofreciendo mayor eficiencia, mejor control de la velocidad, y mayor operación libre de mantenimiento que otros dispositivos convencionales.

Los convertidores usan dispositivos de "switchero" de estado sólido para convertir la potencia de una frecuencia a otra (comúnmente entre CA y CC). Estos dispositivos de "switchero" pueden ser diodos, tiristores, GTO, o muchos otros dispositivos de electrónica de potencia. Dentro de los convertidores estáticos de potencia tenemos los siguientes:

- **Los rectificadores monofásicos**

Constituyen la principal fuente de distorsión de los consumos domésticos. Estos rectificadores dan lugar a formas de onda de corriente severamente distorsionadas, y se usan como etapa de entrada de la mayoría de los equipos electrónicos domésticos para obtener una fuente continua. Las fuentes de alimentación conmutada de los ordenadores, las reactancias electrónicas para alumbrado con lámparas fluorescentes, las cocinas de inducción y los reguladores de velocidad de los sistemas de aire acondicionado son un claro ejemplo de estos equipos electrónicos de uso masivo que utilizan un rectificador como etapa de entrada. Aunque la corriente demandada por cada uno de estos rectificadores no puede considerarse como inaceptable, su acción conjunta da lugar a una fuerte distorsión en las corrientes del sistema de potencia y originan la circulación de grandes corrientes armónicas en el conductor de neutro. Dentro de este grupo de cargas también habría que incluir los rectificadores monofásicos de gran potencia que utilizan en la tracción eléctrica los cuales, además de provocar una elevada distorsión de corriente, también dan lugar a severos desequilibrios en la red.

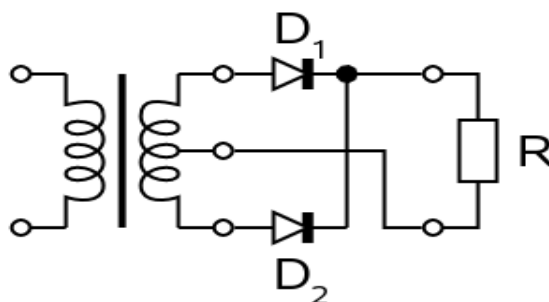


Figura 1.4 – Configuración típica rectificador monofásico

- **Los rectificadores polifásicos**

Son una fuente importante de distorsión armónica dentro de las cargas industriales. Estos rectificadores se usan para obtener un bus de continua en los inversores de los sistemas electrónicos de potencia. El principal exponente de este tipo de equipos constituyen los variadores de velocidad para motores. La potencia de estos equipos industriales suele ser superior a los del sector doméstico y la amplitud de los armónicos que inyectan en la red dependen de la impedancia del lado de alterna y del tipo de filtrado utilizado en el lado de continua (capacitiva, inductiva, o ambos). En las aplicaciones de gran potencia, como pueden ser los procesos electroquímicos, la transmisión en alta tensión (corriente directa), o grandes inversores utilizados en presas y molinos, se utilizan rectificadores de 12 pulsos o más. Tanto los rectificadores monofásicos y polifásicos controlados o no controlados generan microcortes en la tensión a consecuencia de los cortos circuitos instantáneos que se producen en las fases del sistema de potencia cuando la corriente conmuta de una fase a otra del rectificador.

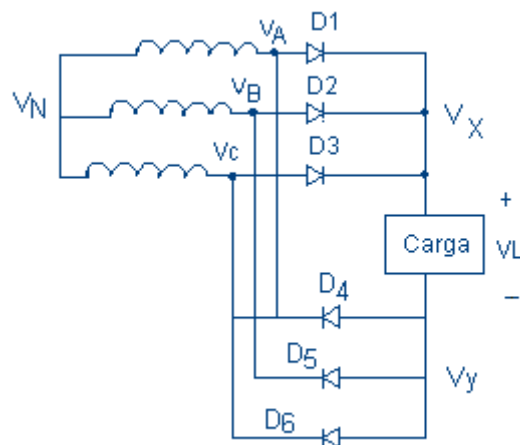


Figura 1.5 – Rectificador de onda completa trifásico

- **Los convertidores de alterna**

Basados en el recorte de la onda de tensión mediante tiristores o triacs se utilizan de forma extensiva en los compensadores estáticos de potencia reactiva, en los arrancadores suaves de motores de inducción y en los reguladores de lámparas de incandescencia. En estos sistemas, los armónicos de corriente aparecen como consecuencia de que no existe conducción durante todo el periodo de la onda de tensión.

- **Controladores de velocidad**

Dentro de este tipo de controladores se encuentran los de corriente alterna y corriente directa. El circuito típico de de estos controladores de C.D. es un rectificador estático de 6 pulsos que alimenta con C.D. a la armadura del motor cuando los motores a controlar son trifásicos y cuando los controladores son para motores monofásicos el circuito de alimentación de C.D. es un rectificador monofásico, para este tipo de controladores las armónicas predominantes son las impares, y principalmente la 5ª y la 3ª armónica para controladores trifásicos y monofásicos respectivamente, esto se debe a que la forma de onda que requieren para su alimentación es no senoidal. En el caso de los controladores de C.A. el circuito típico consta de un rectificador de 6 pulsos y un inversor de conmutación forzada lo cual genera las armónicas características del rectificador e inversor.

- **Cicloconvertidores**

Son dispositivos que controlan motores de C.A., su funcionamiento consiste en convertir potencia de C.A. de una frecuencia (típicamente 60 Hz) a potencia de C.A. de una frecuencia menor. Las corrientes armónicas generadas por cicloconvertidores son bastante diferentes a las de un rectificador de 6 pulsos. Las armónicas generadas de un cicloconvertidor se pueden determinar con la siguiente ecuación:

$$f_h = f_i(k_1q \pm 1) \pm 6k_2f_0$$

f_h : Frecuencia armónica de la corriente de línea

f_i : Frecuencia de entrada al cicloconvertidor

q : Número de pulsos del cicloconvertidor

f₀ : Frecuencia de salida del cicloconvertidor

k₁, k₂ : Enteros 1,2,3,4...

Los cicloconvertidores difieren de un controlador con enlace de C.D., debido a que las frecuencias armónicas de un cicloconvertidor dependen de la frecuencia de salida, la cuál es variada en operación para controlar la velocidad del motor.

1.5 PROBLEMAS OCASIONADOS POR ARMÓNICAS

La presencia de armónicas en las redes eléctricas ocasiona diferentes problemas que pueden ser graves cuando su contenido es elevado, estos son:

- a) Sobrecarga en los conductores de fase, los armónicos de corriente generan un incremento de pérdidas por efecto Joule. Las corrientes de alta frecuencia solo circulan por la superficie de los conductores, concentrando el calentamiento en estas zonas.
- b) La tercera armónica trae como consecuencia que en el neutro se lleve una corriente la cual es igual o mayor que las corrientes de fase, esto provoca el sobredimensionamiento del cable de neutro.
- c) Sobrecarga en el conductor de neutro.
- d) Sobrecarga y vibraciones en máquinas eléctricas conectadas a la red. Las corrientes y tensiones armónicas aumentan las pérdidas de la máquina. Además, la presencia de armónicos provoca la aparición de oscilaciones electromecánicas que reducen la vida útil de la máquina.
- e) Disparo indebido de interruptores automáticos. También aumenta el valor pico de la corriente asociado con la presencia de armónicos, puede dificultar la extinción del arco eléctrico.
- f) Mal funcionamiento de los relevadores de protección. Los sistemas de protección experimentan efectos indeseables como consecuencia de los armónicos, generando disparos intempestivos y retardos en la actuación de dichas protecciones o disparos erróneos debido a las altas corrientes armónicas.
- g) Mediciones erróneas en equipos de medición particularmente en condiciones de resonancia.
- h) Presencia de perturbaciones en equipos de control, particularmente en el encendido de los tiristores.
- i) Fallas en los bancos de capacitores, además de daños como son el calentamiento del capacitor y del deterioro del dieléctrico lo que provoca la reducción de vida útil del capacitor.
- j) Variaciones y reducción del torque en equipos rotatorios.
- k) Incrementa el ruido audible en equipos estáticos y rotatorios como son transformadores y máquinas eléctricas.
- l) Fallas en la operación de equipos sensibles a formas de ondas.
- m) Amplificaciones substanciales de corriente y voltaje debido a la resonancia.
- n) Interferencia en las comunicaciones debido a la presencia de aparatos conversores de potencia, los cuales producen campos eléctricos y magnéticos, que dañan el desempeño de los equipos de comunicación.
- o) Pérdidas en acero, se presentan en núcleos de acero los cuales están siendo magnetizados o se encuentran girando en un campo magnético, estas pérdidas consisten en pérdidas de histéresis y en pérdidas en corrientes de Eddy, esto trae como consecuencia una reducción en la eficiencia y un incremento de temperatura en el núcleo.

- p) Mal funcionamiento en equipo electrónico, ya que estos equipos dependen de un preciso punto de referencia de cruce por cero, y debido a la presencia de armónicas causan que cambie el voltaje de cruce por cero o el punto en el cual un voltaje de fase a fase se vuelve mas grande que el otro voltaje de fase a fase.
- q) Interfieren en las cargas de los clientes que están conectados al sistema eléctrico de potencia especialmente en equipos de computación.
- r) Acorta el tiempo de vida de lámparas incandescentes y provoca mal funcionamiento en lámparas fluorescentes.
- s) Uno de los problemas más graves ocasionados es en equipo de instrumentación médico, provocando un desempeño poco práctico y lecturas de datos erróneos.

Estos problemas ocasionan que la vida útil de los equipos se reduzca principalmente porque las corrientes armónicas circulantes ocasionan un calentamiento excesivo en los equipos, lo que repercute en un incremento de las pérdidas eléctricas, además los voltajes armónicos en los equipos hacen que el aislamiento sea esforzado mas de lo normal.

1.6 SOLUCIÓN A PROBLEMAS DE ARMÓNICAS

Algunas técnicas usadas para mitigar armónicas son el aterrizamiento y conexión del transformador, multifaseo o multipulsación de los convertidores estáticos, cancelación de armónicas por inyección de armónicas y la utilización de filtros.

1.6.1 FILTROS DE ARMÓNICAS

Filtro: Es cualquier combinación de elementos RLC y/o transistores o amplificadores diseñados para seleccionar o rechazar un rango de frecuencias, este término es usado para describir a aquellos equipos cuyo propósito es reducir los flujos armónicos de corriente y voltaje, en el sistema eléctrico de potencia.

1.6.1.1 FILTROS PASIVOS

Se les denomina **filtros pasivos**, por que están formados únicamente por elementos pasivos, es decir, resistencias, capacitores y bobinas.

Entre las soluciones más comunes de estos problemas es instalar un filtro de armónicas. Estos están compuestos por una o varias secciones L – C (Reactor – Capacitor). Los filtros de armónicas cuentan con reactores de sintonía (3^a , 5^a , 7^a , 11^a ,..., armónicas) sintonizados a la frecuencia de la

armónica que se desea filtrar. La frecuencia de resonancia o sintonía del filtro de armónicas será aquella para la cual coincidan los valores de X_C y X_L en donde la impedancia a dicha frecuencia es mínima, creando un camino de baja impedancia para la frecuencia de las armónicas que se desea cancelar.

1.6.1.2 FILTROS ACTIVOS

Un filtro activo genera un espectro de corrientes armónicas que son opuestas en fase a la corriente de distorsión armónica determinada.

Los filtros activos son desarrollados para compensar las desventajas de un filtro pasivo convencional como son:

- Las características del filtrado son dependientes de una fuente de impedancia.
- Afectan la impedancia llevándola al nivel mas bajo de la sintonía de la armónica.
- Son inadecuados para filtrar armónicas no características.

1.7 RESONANCIA

La resonancia es una condición establecida por la aplicación de una frecuencia particular (frecuencia de resonancia) a una configuración RLC, ya sea, en serie o en paralelo. La transferencia de potencia al sistema es máxima cuando el sistema se encuentra excitado a la frecuencia de resonancia, y para frecuencias arriba o debajo de la frecuencia de resonancia, la transferencia de potencia cae significativamente.

1.7.1 RESONANCIA SERIE

La **resonancia serie** ocurre cuando en un circuito RLC se tienen reactancias capacitivas e inductivas iguales, así que la impedancia del circuito es baja, y un pequeño voltaje de excitación ocasiona una gran corriente. En un sistema eléctrico de potencia se presenta como resultado de la combinación serie de bancos de capacitores, líneas o inductancias del transformador. La resonancia serie constituye una ruta de baja impedancia a corrientes de armónicas, y tiende a atrapar cualquier corriente armónica, dicha corriente fue previamente sintonizada. La resonancia serie puede resultar en niveles de distorsión de alto voltaje entre la inductancia y el capacitor en el circuito serie. La resonancia serie se calcula mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

f_r : Frecuencia de resonancia

f_1 : Frecuencia fundamental

X_C : Reactancia de los capacitores

X_L : Reactancia del sistema

Un ejemplo de circuito serie es el que se muestra en la figura 1.2:

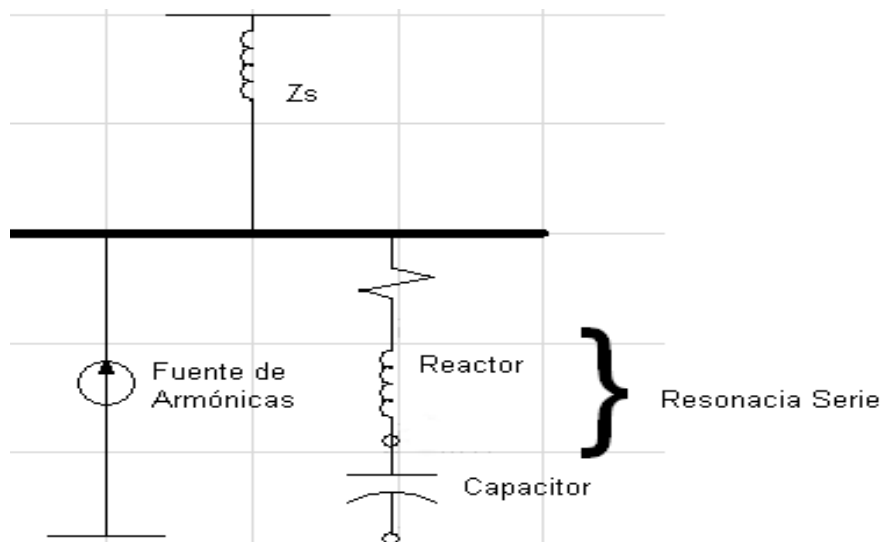


Figura 1.6 - Diagrama unifilar

1.7.2 RESONANCIA PARALELO

La **resonancia en paralelo** ocurre en un circuito RLC en paralelo con reactancias capacitivas e inductivas iguales, así que la admitancia del circuito es pequeña, y una pequeña corriente de excitación provoca un gran voltaje. En un sistema eléctrico de potencia se presenta cuando las reactancias capacitiva e inductiva del sistema son iguales a una misma frecuencia. Si la combinación de bancos de capacitores e inductancias del sistema resulta en una resonancia paralelo cerca de una de las armónicas características generadas por una carga no lineal, esta corriente armónica excitará el circuito y por medio de esto causará una corriente amplificadas que oscilará entre la energía almacenada en el inductor y la energía almacenada en el capacitor. Esta gran corriente de oscilación causa distorsión de voltaje, e interferencia telefónica, cuando el circuito

de distribución y el circuito telefónico están físicamente cerca uno del otro. La resonancia paralelo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_L + X_S}}$$

Donde:

f_r : Frecuencia de resonancia

f_1 : Frecuencia fundamental

X_C : Reactancia de los capacitores

X_L : Reactancia del transformador

X_S : Reactancia del sistema

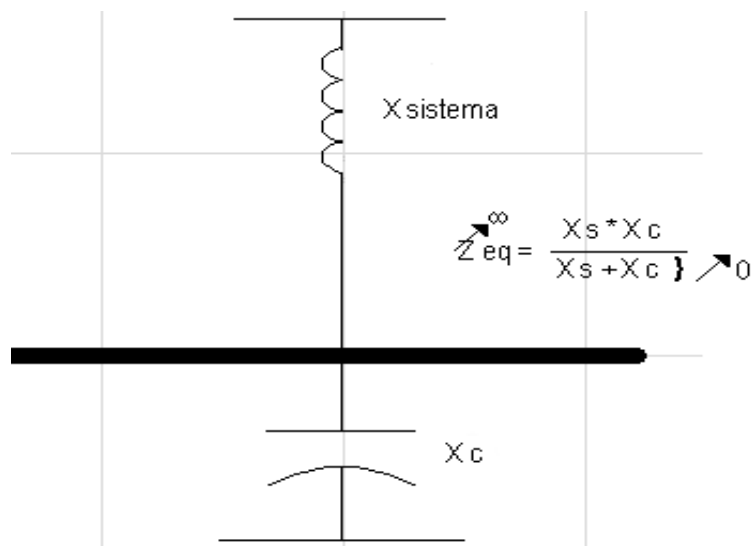


Figura 1.7 - Resonancia paralelo diagrama de impedancias

La severidad de la resonancia paralelo es mayor si la capacidad de la carga no lineal es grande en relación a la capacidad de cortocircuito y esto se determina de la siguiente manera:

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

1.8 CONDICIONES DE RESONANCIA

Son los factores más importantes que afectan los niveles de armónicas en el sistema. La resonancia en paralelo se caracteriza por su alta impedancia al flujo de corrientes armónicas, mientras que la resonancia serie tiene baja impedancia al flujo de corrientes, cuando las condiciones no son un problema, el sistema tiene la capacidad de absorber cantidades significativas de corrientes. Esto solo ocurre cuando estas corrientes detectan una alta impedancia debido a la resonancia en paralelo.

La corriente armónica tiende a fluir de una carga no lineal a la mas baja impedancia, usualmente la impedancia de la fuente del Sistema eléctrico de potencia es mucho mas pequeña que el paralelo de las cargas. De cualquier forma la corriente armónica se dividirá dependiendo de la relación de impedancias, los armónicos mas altos fluirán a los capacitores que tienen la más baja impedancia a frecuencias altas.

2. PERTURBACIONES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Un problema en la *calidad de la energía* se puede entender como una perturbación que hace que la tensión o la corriente, del sistema eléctrico difiera de su apariencia real, por lo que es necesario disponer de un catálogo detallado de dichas perturbaciones y describir cada fenómeno electromagnético que provoca problemas en la calidad de energía.

2.1 TRANSITORIOS

Son variaciones de muy corta duración en las tensiones o corrientes del sistema y pueden ser clasificados en dos categorías:

- a) **Impulsos unidireccionales.** Corresponden a respuestas sobreamortiguadas que duran desde algunas decenas de nanosegundos hasta algunos milisegundos. Un ejemplo de esta perturbación es la corriente impulsional provocada por el impacto de un rayo.
- b) **Ondas Oscilatorias.** Corresponden a respuestas subamortiguadas que duran desde algunos microsegundos hasta algunas decenas de milisegundos y cuyas frecuencias abarcan desde algunos cientos de Hz hasta algunos MHz. Un ejemplo de esta perturbación son las oscilaciones transitorias de tensión y corriente que aparecen en la carga inicial de bancos de capacitores.

2.2 VARIACIONES DE CORTA DURACIÓN

Están ligadas con variaciones de corta duración en tensión y son causadas por fallas en las líneas, por elevadas corrientes de energización de grandes cargas o por fallos en las conexiones del sistema. Según su duración se clasifican:

- a) **Sags.** Son descensos de tensión entre 10% y 90% de su valor nominal, con una duración que abarca desde medio ciclo hasta un minuto. Los *sags* son asociados a cortocircuitos en las líneas, a la energización de grandes cargas, o al arranque de grandes motores. Cuando el *sag* es debido a un cortocircuito, el tiempo de respuesta de la protección de sobrecorriente limita la duración del mismo a un

periodo comprendido entre 3 y 30 ciclos. Un *sag* debido al arranque de grandes motores puede durar varios segundos.

b) Swells. Sobretensiones momentáneas, una subida de tensión entre un 110% y un 180% de su valor nominal, con una duración que abarca de 0.5 ciclos o hasta un minuto. Los *swells* son usualmente asociados a fallas en el sistema, aunque no son tan frecuentes como los *Sags*. Un ejemplo de este tipo de fenómeno sería la sobretensión que aparece en las fases "sanas" cuando se produce un cortocircuito monofásico a tierra.

2.3 VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN

Están ligadas con variaciones en la tensión que duran más de un minuto. Generalmente estas variaciones no son debidas a fallas en las líneas, sino que suelen estar originadas por las variaciones de carga y por operaciones de reconexión en el sistema.

- a) Sobretensiones.** Consisten en subidas de la tensión de más de 110% de su valor nominal durante más de un minuto. Las sobretensiones suelen ser debidas a la desconexión de grandes cargas o fallas en la regulación de la tensión.
- b) Atenuaciones de voltaje.** Son reducciones de la tensión de más de 90% de su valor nominal durante más de un minuto. Las atenuaciones de voltaje al contrario de las sobretensiones, suelen aparecer en la conexión de las grandes cargas, o la energización de bancos de capacitores y se mantiene hasta que el sistema de regulación lleva la tensión a su nivel de referencia.
- c) Interrupciones mantenidas.** Son cortes absolutos de la alimentación durante periodos de tiempo superiores a un minuto. Este tipo de perturbaciones suelen producirse cuando la restauración del sistema requiere de la intervención humana.

2.4 DESBALANCE DE VOLTAJE

Esta ligado a la aparición de componentes de secuencia negativa y/o homopolar de frecuencia fundamental en las tensiones de red. Este tipo de perturbaciones suelen deberse a la conexión de cargas monofásicas en sistemas trifásicos, o a la desconexión de una fase en un banco de capacitores.

2.5 DISTORSIÓN DE LAS FORMAS DE ONDA

Se da cuando los efectos de los armónicos dan lugar a que la forma de onda de tensión o corriente de régimen permanente difiera de onda senoidal pura. En general existen cinco tipos elementales de distorsión de la forma de onda:

- a) **Armónicos.** Son tensiones o corrientes sinusoidales cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. La combinación de los armónicos y de la senoide de frecuencia fundamental da lugar a formas de onda distorsionadas. Generalmente las cargas no lineales dan lugar a la inyección de corrientes de armónicos, los cuales al circular por el sistema eléctrico de potencia dan lugar a distorsión armónica en las tensiones.
- b) **Interarmónicas.** Son componentes armónicas de la tensión o de la corriente, cuya frecuencia no es múltiplo entero de la fundamental. Los interarmónicos pueden presentarse a frecuencias discretas, o distribuidos a lo largo de una determinada banda del espectro. Las principales fuentes generadoras de interarmónicos son los convertidores estáticos de potencia, los ciclo convertidores, los hornos de inducción y los dispositivos generadores de arco eléctrico.
- c) **Microcortes (ranura de Voltaje).** Son huecos estrechos, que aparecen periódicamente en la forma de onda de la tensión como consecuencia de la conmutación de la corriente entre fases de los convertidores estáticos conectados en la red. Los microcortes o *Notch* suelen ser de microsegundos, generalmente son provocados por la conmutación de los rectificadores controlados y no controlados. Es el área trapezoidal de un pulso de corta duración que se superpone, con la polaridad opuesta, a la onda de tensión de 60 Hz en ese instante, se expresa en μs .
- d) **Componentes de continua.** Es la aparición de componentes de continua en las formas de onda de tensión o corriente. Corresponde al valor promedio de $f(t)$ en cada periodo y corresponde a la componente a_0 de la serie de Fourier. Un ejemplo sería los dispositivos que utilizan electrónica de potencia como son tiristores (SCR)
- e) **Ruido de alta Frecuencia.** Son señales indeseables con un espectro armónico disperso, cuya frecuencia suele ser inferior a 200 KHz. Estas señales se encuentran superpuestas a las formas de onda de tensión o corriente y suelen estar originadas por sistemas electrónicos de potencia

2.6 FLUCTUACIONES DE TENSIÓN

Son variaciones asimétricas de la envolvente de la tensión, las cuales pueden ser continuas o aleatorias. Las cargas que provocan variaciones continuas y rápidas en la corriente pueden causar fluctuaciones en la tensión que a menudo se conocen como “*Flicker* de tensión”.

- a) **Flicker de tiempo corto (Pst)**. Expresa la severidad de la fluctuación durante un periodo de 10 minutos, siendo $Pst = 1$ en el umbral de irritabilidad.
- b) **Flicker de tiempo largo (Plt)**. Expresa la severidad de la fluctuación durante un periodo mayor de 2 horas, empleando valores sucesivos de Pst.

2.7 VARIACIONES DE FRECUENCIA

Son desviaciones de la frecuencia fundamental del sistema de potencia, respecto a su valor nominal. Estas variaciones de frecuencia suelen ser debidas a desequilibrios bruscos entre la producción y la carga. El comportamiento de la frecuencia esta en función de la generación y la carga y se comporta de la siguiente manera:

- Cuando la producción es igual a la demanda, la frecuencia permanece constante 60 [Hz].
- Cuando la producción sube y la demanda es constante, la frecuencia aumenta.
- Cuando la producción baja y la demanda es constante, la frecuencia disminuye.
- Cuando la producción es constante y la demanda sube, la frecuencia disminuye.
- Cuando la producción es constante y la demanda baja, la frecuencia aumenta.

3. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE FILTROS DE ARMÓNICAS

Los equipos electrónicos de potencia son llamados no-lineales porque generan formas de ondas no senoidales o distorsionadas. La Norma *IEEE 519 – 1992*, define a una armónica como "Una componente senoidal de una onda periódica que tiene una frecuencia que es múltiplo entero de la frecuencia fundamental". Las corrientes de cargas no lineales son ricas en armónicas. Las armónicas presentes son función de la configuración del sistema de distribución. Las conexiones típicas son las siguientes:

- Conexión Delta, 3 fases con cargas conectadas fase a fase.
- 3 fases - 4 hilos, con cargas conectadas fase a fase o de fase a neutro.
- Una fase, con carga conectada fase a neutro.

El voltaje y/o corriente armónica excesiva puede causar daño al equipo y al sistema eléctrico. Una de las maneras más comunes de controlar la distorsión armónica es colocar un filtro de armónicas pasivo conectado en derivación cercano a las cargas generadoras de armónicas. El dispositivo generador de armónicas es considerado como una fuente de corrientes 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 corrientes armónicas que fluye hacia el sistema de potencia. Un filtro de armónicas se realiza conectando capacitores en serie o paralelo con reactancias inductivas y en algunos casos resistencias, sintonizándolo a una frecuencia en la que no exista generación de armónicos.

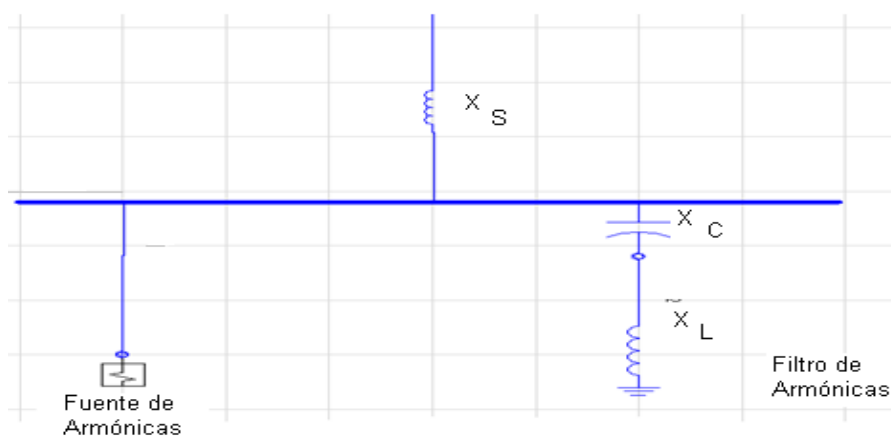


Figura 3.1 - Filtro de armónicas conectado en derivación para absorber las corrientes armónicas generadas por la carga no lineal.

Consideraciones importantes para el diseño de un filtro de armónicas.

- a) Requerimientos de potencia reactiva y máximas magnitudes de corrientes armónicas existentes
- b) Límites permisibles de corrientes y voltajes armónicos
- c) Condiciones normales de operación del sistema incluyendo armónicos
- d) Condiciones normales de operación del filtro de armónicas
- e) Condiciones de contingencia del sistema incluyendo armónicos
- f) Condiciones de contingencia del filtro de armónicas

Estas consideraciones pueden ser agrupadas en los criterios de desempeño y evaluación. 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.

3.1 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 resistencias (algunos). El filtro de armónicas suministra potencia reactiva capacitiva al sistema y al mismo tiempo absorbe corriente(s) armónica(s) disminuyendo así las distorsiones de voltaje. A fin de optimizar costos, es importante conocer que potencia reactiva capacitiva se requiere y que ahorro puede obtenerse agregando potencia reactiva capacitiva. Los requerimientos de potencia reactiva y control de voltaje pueden dictar que el filtro de armónicas sea conmutado en pasos. La norma *IEEE Std 1036 – 1992* indica que la capacidad del paso máximo de potencia reactiva capacitiva está limitado a un valor tal que el cambio en el voltaje a frecuencia fundamental no sea mayor al 3.0 % con el objeto de tener un efecto mínimo en las cargas del sistema.

CONSECUENTEMENTE, LA CAPACIDAD DE POTENCIA REACTIVA TOTAL Y LOS PASOS, GENERALMENTE SON DETERMINADOS POR EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA A FRECUENCIA FUNDAMENTAL Y POR LOS REQUERIMIENTOS DE CONTROL DE VOLTAJE.

3.2 ÍNDICES PARA LA MEDICIÓN DE ARMÓNICOS

Para analizar los efectos producidos por los armónicos se utilizan generalmente unos índices que cuantifican el nivel de contaminación armónica de las ondas. Para el análisis los índices son comparados con valores límites dados por las normas o con valores de aguante de los equipos. A continuación se presentan las definiciones de los índices más utilizados.

3.2.1 ÍNDICES PARA ARMÓNICOS DE CORRIENTE

Para corriente se tienen dos tipos de índices, los de distorsión armónica individual y los de distorsión armónica total.

El índice de distorsión armónica individual se define mediante la siguiente ecuación:

$$HD_I = \frac{I_h}{I_1} \times 100\%$$

Donde:

HD_I: Distorsión armónica individual de corriente

I_h: Corriente de la armónica

I₁: Corriente de carga a frecuencia fundamental

Los índices de distorsión armónica total son:

$$THD = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (I_h)^2} \times 100\%$$

$$TDD = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (I_d)^2} \times 100\%$$

Donde:

THD_I: Distorsión Armónica total de corriente.

TDD: Demanda de Distorsión Total.

I_d: Corriente promedio demandada.

3.2.2 ÍNDICES PARA ARMÓNICOS DE TENSIÓN

El índice de distorsión individual de tensión es de utilidad para las empresas suministradoras en el diseño del filtro de armónicas y como referencia a la calidad de energía que genera.

El índice de Distorsión individual de tensión se define de la siguiente manera:

$$HD_v = \frac{V_h}{V_1} \times 100\%$$

Donde:

HD_v : Distorsión Armónica individual de Tensión

V_h : Tensión de cada armónico.

V₁ : Tensión nominal del alimentador.

El índice de Distorsión Armónica Total de Tensión se define así:

$$THD_v = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (V_h)^2} \times 100\%$$

3.3 LÍMITES PERMISIBLES DE CORRIENTES Y VOLTAJES ARMÓNICOS

Los límites permisibles de voltajes armónicos en el sistema generalmente se definen para asegurar que el equipo no funcione mal o falle debido a distorsión armónica excesiva. En los siguientes subtemas se indican las desviaciones máximas permisibles indicadas en la especificación de *IEEE-519-1992* y *CFE-L-00045*, aplicables tanto al suministrador como a los consumidores que se encuentran conectados a la red de CFE.

3.3.1 LÍMITES DE CORRIENTES ARMÓNICAS

La especificación CFE L-00045 indica que la distorsión armónica total de corriente demandada en el punto de acoplamiento común (PAC) **esta limitada en un rango de 2.5 al 20%** dependiendo de la relación de corto –circuito en el PAC (Capacidad de Corto-circuito trifásico entre la capacidad de la carga generadora de armónicas).

La norma *IEEE Std 519-1992* indica los límites de corrientes armónicas basados en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia al cual la carga es conectada. La relación (I_{SC}/I_L) de corriente de corto-circuito disponible en el punto de acoplamiento común (PAC) y la corriente máxima con carga, indica la distorsión armónica en el PAC.

Impedancia Relativa (I_{sc} / I_L)	para Armónicas Impares (HDI %)					Distorsión Armónica Total de Corriente en %(THD _i)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$(I_{sc} / I_L) < 20$	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 \leq (I_{sc} / I_L) < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 \leq (I_{sc} / I_L) < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 \leq (I_{sc} / I_L) < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
$(I_{sc} / I_L) \geq 1000$	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabla 1 - Límites máximos de distorsión armónica total de corriente (THD_i) y distorsión armónica individual de corriente (HDI). Para baja, media y alta tensión hasta 69 kV

3.3.2 LÍMITES DE VOLTAJES ARMÓNICOS

La norma *IEEE Std. 519-1992*, indica que los límites de distorsión armónica individual de voltaje (HD_v) en los casos de operación normal (tabla 3) son del 2 al 6% y del 3 al 8% para distorsión armónica total de voltaje (THD_v).

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

Tabla 2 - Límites máximos de distorsión armónica total de voltaje (THD_v) y distorsión armónica individual de voltaje (HD_v). Para baja, media y alta tensión hasta 69 kV

Para periodos cortos, durante la energización o condiciones inusuales, los límites pueden exceder el 50%.

3.4 CAPACIDAD DE AGUANTE DEL EQUIPO

3.4.1 TRANSFORMADORES

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.

FACTOR K PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Los transformadores tipo K son diseñados y probados para operar con cargas no-lineales. El factor K indica la severidad de la distorsión armónica que el transformador puede aguantar. La capacidad de un transformador tipo K se calcula como la de uno estándar.

El factor k se calcula a partir del espectro de corriente medido o estimado que genera la carga no lineal.

Ejemplo:

1.- Cálculo del factor "K" para un transformador 12/16/20 [MVA], 115 – 13.8/7.967 [kV], considerando que se miden las siguientes corrientes armónicas en el lado de 115 [kV].

1.1.- Cuando el transformador opera a 12 [MVA]:

$$I_1 = 60 \text{ [A]}; I_3 = 5 \text{ [A]}; I_5 = 10 \text{ [A]}; I_7 = 10 \text{ [A]}; I_{11} = 3 \text{ [A]}; I_{13} = 3 \text{ [A]}$$

1	2	3	4	5
Orden de la armónica h	h^2	Distorsión armónica (H _{Di}) I _h (pu)	I_h^2	$h^2 I_h^2$
1	1	1	1	1
3	9	0.0833	0.0069	0.0625
5	25	0.1666	0.0277	0.6944
7	49	0.1666	0.0277	1.360
11	121	0.05	0.025	0.3025
13	169	0.05	0.025	0.4225

Suma		1.0673	3.8419
------	--	--------	--------

Tabla 3 - Factor K para transformadores

$$\text{Factor "K"} = \frac{\text{Suma de Columna 5}}{\text{Suma de Columna 4}} = \frac{3.8419}{1.0673}$$

Factor "K" = 3.6

$$\text{Corriente RMS Lado 115 kV} = \sqrt{60^2 + 5^2 + 10^2 + 10^2 + 3^2 + 3^2} = 62 \text{ [A]}$$

3.4.2 CAPACITORES

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

- a. 110% del voltaje nominal rms (si los capacitores son construidos en base a la norma *IEC 60871-1,2* el voltaje de operación continuo máximo permitido es de 1.0 PU)
- b. 120% del voltaje pico nominal (el voltaje pico no deberá exceder el $1.2 \sqrt{2}$ el voltaje nominal RMS, incluyendo armónicas y excluyendo transitorios).
- c. 180% de la corriente rms nominal **basada en la potencia y voltaje nominales**
- d. 135% de la potencia nominal

Las unidades capacitoras operan correctamente sin disminuir su vida útil en los siguientes niveles de voltaje.

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 Fundamental y armónica	(1.3 I _N ≤ I _C ≤ 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 4 - Voltajes máximos permisibles en unidades capacitivas según norma IEEE-1036-1992

- ❖ (*) Las unidades capacitivas fabricadas según norma IEC-60871-1,2 podrán soportar una corriente RMS hasta de 1.5 veces la nominal a voltaje nominal senoidal y frecuencia nominal sin transitorios. Cláusula 20 de la norma IEC-60871-1,2
- ❖ Los sobrevoltajes que podrían ser tolerados sin deterioros significativos del capacitor dependen de su duración, su número total y la temperatura del capacitor. para voltajes mayores a 1.15 V_N no se permiten más de 200 aplicaciones en la vida útil del capacitor. Cláusula 19 de la norma IEC-60871-1,2

Estos efectos de sobrecorriente consideran los efectos combinados de armónicos y sobre voltajes para no rebasar el 1.1 V_N.

Para sobrevoltajes ≥ 1.25 V_N no se permiten más de 300 aplicaciones combinadas (sin transitorios, ni armónicos).

Los fusibles de protección de capacitores deben soportar la corriente y el voltaje 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. El límite en la norma IEEE Std 18-2002 está basado en el voltaje de operación máximo (110% del voltaje nominal) y a la tolerancia de fabricación (capacitancia máxima de +10%) $Q_{\text{máx.}} = 1.1 \times 1.1 \times 1.1 \cong 1.33 Q_N$. **Es decir para bancos de capacitores fabricados bajo la Norma IEC 60871-1,2 donde los capacitores deben operar de manera continua al voltaje nominal máximo, el límite de potencia reactiva de éstos capacitores lo establece sólo la tolerancia de fabricación (rango del 3 al 10 % para filtros).**

$$Q = \frac{V^2}{X_C} = 2 * \pi * f_C$$

$$|\sum V(h) I(h)| \leq 1.33 Q_{\text{nominal}}$$

3.5 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 reunirá los requerimientos de desempeño armónico y potencia reactiva requeridos para estas condiciones. Estas condiciones normales de operación del sistema incluyen:

- a) Todas las corrientes y voltajes armónicos:
 - a.1) Armónicas características esperadas
 - a.2) Armónicas no características
 - a.3) Armónicas generadas por cargas cercanas y futuras.
- b) Variación de voltaje del sistema ($\pm 3\%$ en condiciones de plena carga y $+5\%$ en demanda mínima) y en caso de interruptores el filtro debe desconectarse inmediatamente hasta el restablecimiento del sistema.
- c) Variación de frecuencia del sistema: En sistemas interconectados las variaciones de frecuencia arriba de $\pm 0.1\%$ Hz son raras. Se pueden presentar fuertes variaciones de frecuencia en sistemas de generación local.
- d) Configuraciones del sistema de potencia. Se analiza el comportamiento del filtro para todas las configuraciones posibles del sistema.
- e) Condiciones de carga, se analiza el comportamiento del filtro para diferentes condiciones de demanda.
- f) Desbalance de voltaje de sistema. El desbalance del sistema puede incrementar la inyección de corrientes armónicas por parte de las cargas no lineales.

3.6 CONDICIONES NORMALES DE OPERACIÓN DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

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.

- a. **Tolerancias de los componentes** ; se considera la tolerancia de fabricación de la inductancia, capacitancia y resistencia.
- b. **Variaciones de la temperatura ambiente** ; la capacitancia y resistencia varían con la temperatura, por ejemplo disminuye la capacitancia entre 0.4% y 0.8% por cada $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de incremento en la temperatura.
- c. **Fallas en unidades capacitivas** ; las fallas de unidades capacitivas cambian la sintonización del filtro y se tienen sobrevoltajes en algunas unidades del banco de

capacitores. Se evalúa el comportamiento del filtro para un número limitado de unidades capacitivas falladas y podría resultar que para un elemento fallado el filtro tenga que desconectarse inmediatamente.

3.7 CONDICIONES DE CONTINGENCIA DEL SISTEMA

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

- a. **Switcheo** ; El switcheo de filtros, transformadores de gran capacidad y líneas de transmisión pueden generar sobrevoltajes transitorios a los componentes del filtro. Cuando se desenergiza algún filtro es muy importante implementar un tiempo de retardo antes de la siguiente energización (de 5 a 10 minutos para capacitores de potencia). Interruptores con resistencia o reactores de pre-inserción o interruptores diseñados para cerrar con voltaje cercano a cero podrían utilizarse para controlar las sobretensiones del sistema.
- b. **Aplicación de filtros sintonizados a la misma frecuencia** ; cuando se apliquen 2 filtros en la misma localización y en la misma frecuencia de sintonía, debe asegurarse que compartan la misma corriente armónica. La división de corriente armónica está en función de la diferencia de impedancias de los filtros.
- c. **Variación de frecuencia del sistema**
- d. **Configuraciones del sistema de potencia** ; los sistemas eléctricos de potencia son dinámicos y al cambiar la configuración del sistema podría desplazarse la resonancia armónica, afectando el desempeño de los filtros.
- e. **Armónicas características y no características** ; se consideran los valores más altos para evaluar el comportamiento y especificar los componentes del filtro.
- f. **Fuentes de armónicas desconocidas** ; se da un factor de amplificación de las corrientes armónicas por las fuentes desconocidas y por la conexión futura de cargas no-lineales.

3.8 CONDICIONES DE CONTINGENCIA DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

Al evaluar los componentes del filtro de armónicas, se usarán los mismos factores que en condiciones normales de operación del filtro, pero con rangos más amplios. Además, cuando se apliquen filtros de armónicas múltiples en la misma ubicación, frecuentemente se considera la salida

de un filtro para verificar la capacidad de los elementos de otros filtros. En algunas aplicaciones, en la salida de un filtro de armónicas pudiera ser necesario desconectar otros filtros, de tal manera, que sus capacidades no sean excedidas.

3.9 LOCALIZACIÓN DE FILTROS DE ARMÓNICAS

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 bajo voltaje (440 V) o alto voltaje (4.16, 13.8, 23,...115 KV). Las alternativas en una aplicación dada deberán ser evaluadas en la búsqueda de distorsiones de voltajes y corrientes armónicas aceptables y el efecto de los flujos de carga armónica resultante en los equipos y conductores afectados (Pérdidas, calentamiento, etc.).

3.10 USO DE BANCOS DE CAPACITORES EXISTENTES

Se puede considerar convertir un banco de capacitores existente, a filtro de armónicas. Es necesario comparar las capacidades de las unidades capacitores del banco existente con las capacidades requeridas para el filtro de armónicas. Además de incrementar el voltaje armónico, el voltaje a frecuencia fundamental también se incrementará. Otros tópicos, incluyendo potencia reactiva y corriente se presentan en esta guía y deben ser considerados.

Usualmente, los bancos de capacitores existentes no pueden ser usados en un filtro de armónicas, a menos que las unidades capacitivas hayan sido sobredimensionadas en la instalación original o se redimensione el banco de capacitores.

3.11 CONFIGURACIONES DE FILTROS DE ARMÓNICAS

Existen diversas formas de construir un filtro de armónicas, la mas común es el capacitor y reactor en serie sólidamente aterrizado pero se pueden utilizar con neutro flotante, o las configuraciones Delta y/o estrella, dependiendo de las características de nuestro sistema y de una evaluación y la capacidad de las herramientas disponibles.

En la figura 3.2 se muestra las diferentes formas de filtrado con las configuraciones Delta y/o Estrella. El esquema a ser usarse y la posición relativa de los componentes son generalmente dictados por las consideraciones de construcción y protección. Los filtros de armónicos ilustrados son sintonizados a una sola frecuencia.

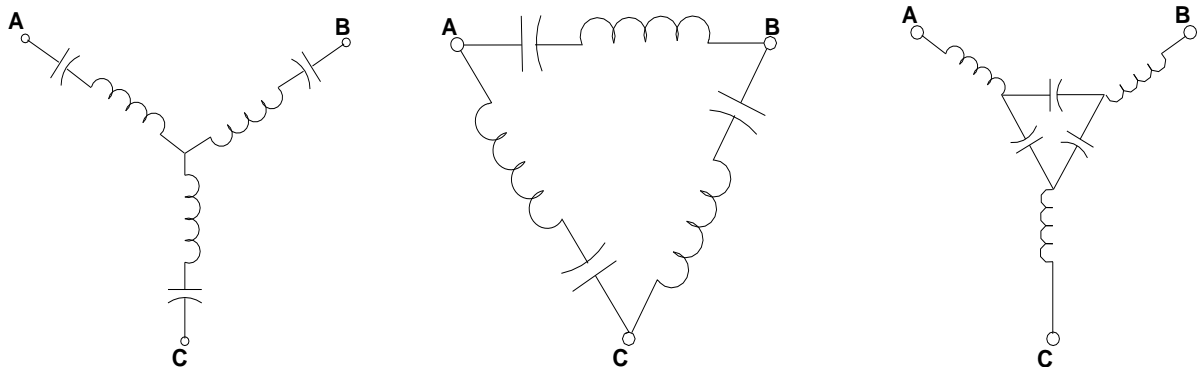


Figura 3.2 - Configuraciones diferentes con filtrado idéntico

4. FILTROS DE ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Los armónicos son distorsiones de las ondas senoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal. La aparición de corrientes y/o tensiones armónicas en el sistema eléctrico crea problemas tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los capacitores, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros. Las soluciones a dicho problema se realizan en forma jerarquizada; primero en forma particular, resolviendo el problema de inyección de armónicos por parte del usuario al sistema (diseñando y ubicando filtros en el lado de baja tensión, usando el transformador como barrera); y segundo, resolviendo el problema en forma global, buscando reducir las pérdidas y mantener los niveles armónicos por debajo de los límites permitidos, en este caso, se trata de un problema de optimización donde se determina la ubicación de los compensadores (capacitores, filtros). Independientemente del tipo de compensador utilizado para reducir los niveles de armónicos en el sistema o en el usuario, se debe analizar la forma en que el compensador afecta a la impedancia al variar la frecuencia. El uso de filtros para componentes armónicas en sistemas potencia tiene dos objetivos: Servir de sumidero para las corrientes y tensiones armónicas; y proveer al sistema toda o parte de la potencia reactiva que éste necesita. Los filtros pasivos pueden ser, según el propósito particular que se persigue, de dos tipos:

- Filtros Series (Antirresonantes desintonizados)
- Filtros Shunt o derivación.

4.1 FILTROS DE ARMÓNICAS O ANTIRESONANTES DESINTONIZADOS

Están diseñados para presentar una frecuencia de resonancia por debajo de la menor armónica que ofrece el sistema (generalmente la 5^o). El valor de frecuencia de desintonía se encuentra comprendido entre 179 y 223 Hz y se logra agregando un **reactor de desintonía** en serie con los capacitores de uso convencional. Dicho reactor elevará la tensión del capacitor por sobre la tensión de la red, siendo por lo tanto que la tensión nominal de éste deberá elegirse superior al valor resultante. El valor de la sobretensión en el capacitor dependerá del grado de desintonía elegido.

Este tipo de instalación tiene además un efecto parcial de filtrado permitiendo la reducción del nivel de distorsión armónica de tensión existente en la red, y este efecto es tanto mas importante a medida que la frecuencia de resonancia del filtro se aproxima a la frecuencia de resonancia armónica natural, dicho en otros términos cuanto mayor es el grado de desintonía menor será la absorción de armónicas. Un mayor efecto de absorción (grado de filtrado) siempre depende de la impedancia de cortocircuito del sistema y la resistencia residual del circuito de filtrado. Los filtros antirresonantes (o de rechazo) se recomiendan para todos los casos donde las cargas generadoras de armónicas se encuentran entre un 20 y un 50% de la carga total a compensar, dependiendo este rango del grado de distorsión que presenten las cargas no lineales.

4.2 FILTROS DE ARMÓNICAS EN DERIVACIÓN

Estos filtros presentan una impedancia muy baja para la corriente armónica individual, derivando la mayor parte de la corriente distorsionada, generada por las cargas no lineales, hacia el filtro y no hacia el suministro. El valor de frecuencia de resonancia en este caso, se encontrará siempre levemente por debajo de la armónica que se desea filtrar. Es importante tener en cuenta el valor de la corriente armónica máxima que se desea filtrar, pues de ésta depende el dimensionamiento del reactor y de la tensión del capacitor. El dimensionamiento de este tipo de filtros, requiere un estudio más a fondo de las características de la instalación.

La aplicación de los filtros de armónicas en bajo voltaje se requiere cuando exista cualquiera de las siguientes condiciones:

- a) Cuando se tienen altos voltajes armónicos en el sistema de distribución de bajo voltaje resultando una distorsión de voltaje en un punto de utilización que es incompatible con las cargas conectadas.
- b) Cuando las corrientes armónicas exceden los límites especificados.
- c) Cuando las corrientes armónicas exceden la capacidad térmica del equipo de distribución.
- d) Cuando se desea corregir el factor de potencia en el bus de bajo voltaje y se tiene un ambiente rico en armónicas.

Los filtros de armónicas, permiten obtener las siguientes mejoras:

- a) Disminuyen el porcentaje de Distorsión Armónica Total (THD).
- b) Evitan fenómenos de resonancia, que pueden surgir al conectar bancos de capacitores convencionales, sin protección contra armónicas.
- c) Compensación de potencia reactiva para mejorar el factor de potencia.

d) Disminución de pérdidas activas en cables y aparatos electromagnéticos.

Las componentes fundamentales y armónicas deben ser consideradas en la selección de la capacidad del equipo. Los capacitores y reactores no deben operar arriba de sus datos de placa bajo condiciones normales. Las capacidades de sobrecarga deben ser reservadas para la operación de contingencia solamente. Un filtro de armónicas debe ser protegido de tal manera que una condición de sobrecarga severa no resulte en daño al equipo.

Los filtros de armónicas pueden ser instalados en la carga o en el bus inmediato superior. Pueden ser fijos o interrumpibles. Los filtros de armónicas de una sintonía son dispositivos serie LC donde el espectro de absorción incluirá más que un armónico. Por ejemplo, un filtro de 5ª armónica puede también absorber cantidades significativas de la 4ª y 7ª armónicas si existen.

Sin embargo, los requisitos de aplicación podrían dictar el uso de filtros de armónicas de múltiple-sintonía y/o filtros paso-altas

4.3 RAZONES DE SOBRECARGA ARMÓNICA

Generalmente, los filtros de armónicas son diseñados para suministrar compensación de potencia reactiva (a frecuencia fundamental) a cargas inductivas y para el control de corrientes y voltajes armónicos. Normalmente, es preferible construir un filtro de armónicas con capacidad mayor que la requerida para trabajo continuo de las cargas armónicas identificadas. Otras armónicas en el sistema serán arrastradas desde el mismo y pueden ocasionar un sobrecalentamiento. Además, como se agregan cargas al sistema de potencia, las armónicas pueden incrementarse. Las corrientes armónicas adicionales pueden incrementar la corriente a través del filtro y causar un sobrecalentamiento. Es deseable un margen generoso en la especificación del desempeño del filtro, se sugiere un margen mínimo del 10% arriba del desempeño máximo anticipado de todas las fuentes consideradas.

La carga armónica adicional puede venir de transformadores cercanos. Los eventos del sistema que causan saturación del transformador (energización del transformador, libramiento de fallas cercanas) ocasionarán una elevación temporal en la corriente armónica del filtro. Si el filtro de armónicas permanece conectado al sistema durante y después de una falla, entonces las armónicas generadas por la saturación del transformador pueden llevar a una sobrecarga de corto tiempo del filtro cuando el sistema sea reenergizado. Si un filtro de armónicas no va a ser removido automáticamente durante una interrupción del sistema, entonces es recomendable hacer un estudio para determinar el desempeño del filtro durante este evento. Similarmente, las fallas cercanas que

no causan una interrupción del sistema pero causan una elevación del voltaje en las fases sanas podría resultar en alguna saturación del transformador, incrementando temporalmente la carga del filtro. El desempeño impuesto al filtro por estas condiciones transitorias necesita ser especificado de una manera que sus componentes puedan ser seleccionados de manera adecuada.

4.4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS COMPONENTES

Lo primero que se debe tener en cuenta al instalarse un filtro de armónicas es cual es objetivo que se pretende mediante la incorporación de un equipo de corrección del factor de potencia y/o filtrado de armónicas, teniendo en cuenta las características del tipo de carga a compensar, habiendo efectuado previamente las tareas de medición de parámetros eléctricos y armónicas tanto de tensión como de corriente.

Para mejorar el factor de potencia, en instalaciones donde existen cargas distorsionadas en un porcentaje inferior al 20% del total de cargas presentes, se pueden utilizar capacitores para uso interior, o para intemperie de servicios liviano y pesado y bancos de capacitores del tipo convencional, tanto fijos como automáticos.

4.4.1 CAPACITORES PARA FILTROS DE ARMÓNICAS

Los bancos de capacitores son generalmente especificados para el voltaje de línea a línea del sistema (por ejemplo. 220 V, 440 V, 6.6,...115 KV) y están formados por grupos serie (para soportar el voltaje aplicado) con N unidades en paralelo (para dar la capacidad) cada grupo. Sin embargo, en una aplicación del filtro de armónicas, estos deben ser seleccionados para soportar sobrevoltajes (suma aritmética del voltaje máximo del sistema + la caída de tensión del reactor + los voltajes armónicos) y sobrecorrientes causados por el flujo de corriente fundamental y armónicas a través de los equipos (LC).

La norma IEEE Std 18-2002 establece que los capacitores en derivación bajo condiciones de contingencia, deben soportar voltajes continuos hasta 110% del voltaje rms nominal y potencia continua hasta 135% de la potencia nominal. Cuando se aplica en filtros de armónicas, el voltaje y corriente nominales podrían exceder éstos niveles incluso antes de que contingencias del sistema se consideren. Por lo tanto, los capacitores en derivación normales podrían no ser convenientes para el uso en filtros de armónicas. Capacitores como filtros de armónicas deben ser seleccionados en base a sus demandas esperadas bajo condiciones normales y de contingencia. Los bancos de capacitores aplicados a filtros se deben sobredimensionar en potencia y voltaje o se deben especificar en base a su gradiente de potencial de operación y al máximo de aguante.

Cabe mencionar que los capacitores fabricados bajo la Norma *IEC 60871-1,2* deben soportar voltajes continuos hasta 100% del voltaje rms nominal y potencia continua hasta 110% de la potencia nominal (sólo se considera la tolerancia de capacitancia), por tanto, éstos bancos de capacitores aplicados a filtros, con mayor razón se deben sobredimensionar en potencia y voltaje o se deben especificar en base a su gradiente de potencial de operación (55 Volts/micron-metro) y al máximo de aguante (70 Volts/micron-metro).

Las unidades capacitoras (celdas capacitivas) deben ser protegidas con fusibles externos o internos. Actualmente existen diseños de unidades capacitoras sin fusibles, las cuáles son confiables si se realiza una adecuada protección de desbalance al banco de capacitores o filtro.

4.4.1.1 PRUEBAS A CAPACITORES

La norma IEEE Std 18-2002 especifica que la prueba de terminal-a-tanque para el aislamiento interno de capacitores tipo interior se debe aplicar 3 kV rms (capacitores especificados a 300 V o menos) o 5 kV rms (capacitores especificados de 301 V a 1199 V) durante 10 s. La prueba de terminal a terminal debe ser durante 10 s aplicando 2 veces el voltaje rms nominal (prueba de C.A) o 4.3 veces el voltaje rms nominal (prueba de C.D.).

Cada unidad capacitora debe ser fabricada con resistencias de descarga para reducir el voltaje residual pico nominal a menos de 50 V en el periodo de 1 minuto después de la desenergización para unidades menores de 600 V (5 minutos para unidades capacitoras de voltaje mayor a 600 V).

4.4.2 REACTORES PARA FILTROS DE ARMÓNICAS

Los reactores se diseñan en base a un determinado valor de la reactancia inductiva por fase. El valor de esa reactancia depende de los valores de potencia de cortocircuito, antes del reactor (nivel de falla de la red) y después del mismo (nivel de falla máxima al cual se desea limitar la potencia de cortocircuito). Por lo tanto para el diseño, son necesarios los siguientes datos:

- a) Tensión nominal compuesta.
- b) Corriente nominal (definida por la potencia post conectada, más el crecimiento futuro de la demanda).
- c) Frecuencia.
- d) Potencia (o corriente) de cortocircuito antes del reactor.

e) Potencia (o corriente) de cortocircuito después del reactor.

Los reactores trifásicos se diseñan formando un conjunto o grupo de tres bobinas, dispuestas en forma vertical con núcleo de aire. Los tres grupos de bobinas se encuentran amarrados sólidamente de modo de resistir los máximos esfuerzos electrodinámicos esperados en el punto de su instalación.

Los reactores como filtros de armónicas para aplicaciones en bajo voltaje son generalmente tipo-seco con núcleo-de hierro. Ninguna norma existente trata a los reactores como filtros de armónicas, pero la mayoría de los fabricantes utilizan la norma *IEEE Std C57.12.01-1998 como pauta*.

Para medio y alto voltaje no existen estándares ANSI o IEEE específicamente relacionados a los reactores para filtros de armónicas. El documento más cercano es *IEEE C57.16 – 1996* y *IEEE std C57.12.01-1998*. El estándar referenciado incluye un anexo que suministra guías para la aplicación de reactores con núcleo de aire, tipo seco para filtros. Los reactores para filtros generalmente entran en tres categorías.

- Reactores núcleo de aire, tipo seco. Se usan generalmente en aplicaciones de medio y alto voltaje.
- Reactores núcleo de acero, tipo seco. Se usan generalmente en aplicaciones de bajo y medio voltaje.
- Reactores núcleo de acero, rellenos de fluido. Se usan generalmente en aplicaciones de medio voltaje.

En la siguiente tabla se muestran las características de los reactores con núcleo de hierro y reactores con núcleo de aire.

Núcleo de Hierro	Núcleo de Aire
-Puede Saturar	- No satura
-Bajo campo magnético disperso	- Campo magnético disperso alto
-Requerimientos de espacio bajos y compactos	- Requerimientos de espacio grande
-El núcleo debe ser diseñado para una corriente armónica máxima (suma de las corrientes armónicas individuales) y el arrollamiento debe ser diseñado por la corriente RMS.	- Arrollamiento debe ser diseñado por la corriente RMS.
- Mayor peso	- Menor peso

- Más probable que suelte ruido audible si no está correctamente fabricado.	- Poco probable que suelte ruido audible si no está correctamente fabricado.
- Comparación del vendedor es más difícil	- Comparación del vendedor es más fácil
- Bajo número de vueltas en el arrollamiento	- Alto número de vueltas en el arrollamiento
- Fácil de cerrar	- Difícil de cerrar (debido al recalentamiento de la corriente reducida de los campos magnéticos dispersos).

Tabla 5 – *Características de los reactores con núcleo de hierro y con núcleo de aire*

4.4.2.1 REACTORES EN LÍNEA

A continuación se enlistan algunas de las características de los reactores en línea.

- Los reactores de línea trifásicos incrementan la confiabilidad de los sistemas para motores de velocidad variable. Reduciendo la intensidad de corriente que demandan estos sistemas a valores inferiores que los valores de placa de corriente a plena carga.
- Aunque los valores de corriente fundamental permanecen sin cambio, las corrientes armónicas se reducen significativamente, con lo cual se obtiene una disminución del valor verdadero de la raíz cuadrática media.
- Protegen al equipo electrónico contra transitorios de tensión y al mismo tiempo reducen la entrada de armónicas.
- Se utilizan en la entrada de sus sistemas de frecuencia variable para proteger a los motores contra los efectos negativos que se producen por transitorios de voltaje dv/dt causados por líneas de alimentación largas.

4.4.2.2 PRUEBAS A REACTORES

Para asegurar la sintonía apropiada, la inductancia debe ser medida a la corriente especificada. La inductancia de los reactores como filtro de armónicas no se debe medir con un puente de instrumentación.

Para las aplicaciones en bajo voltaje, los reactores como filtros armónicas no experimentan típicamente una prueba de nivel de aislamiento básico al impulso (BIL). Como mínimo, el aislamiento debe tener una prueba de voltaje a baja frecuencia (Hi-Pot), fase-a-fase y fase-a-tierra. Esta prueba es típicamente del orden de 10 veces el valor del voltaje rms. La norma *IEEE Std C57.12.01-1998* sugiere un voltaje de prueba de 4 [kV] rms en sistemas de 480 [V.]

4.5 TOLERANCIAS DE CAPACITORES Y REACTORES

Los capacitores y reactores tienen tolerancias de fabricación y cuando son componentes de un filtro de armónicas, la combinación de estas tolerancias son más significativas.

Las tolerancias de fabricación de capacitores exceden el valor de la capacitancia nominal (generalmente en +3% y se permite hasta un 10% para filtros).

Un ejemplo del efecto de tolerancias se muestra en la siguiente ecuación.

$$f_{\text{tuned}} = f_{\text{Nominal}} \left(\frac{1}{\sqrt{(1+t_r)(1+t_c)}} \right) \dots\dots\dots (4.1)$$

Donde:

- f_{nominal}** : Es la frecuencia de sintonización especificada,
- f_{tuned}** : Es la frecuencia de sintonización real,
- t_r** : Es la tolerancia del reactor (por unidad),
- t_c** : Es la tolerancia del capacitor (por unidad).

Un filtro de 5ª armónica sintonizado a 4.7 PU de frecuencia, considerando una tolerancia de fabricación del banco de capacitores de +3% de la capacitancia nominal y en los reactores una tolerancia del + 2.5% de la inductancia nominal, resultaría que el filtro quedaría sintonizado a la 4.57 armónica. Estos resultados muestran la necesidad de considerar la tolerancia de los componentes.

Otra preocupación en las aplicaciones en bajo voltaje es la inductancia del alimentador del filtro. La inductancia de los reactores para estos sistemas será del orden de cientos de microhenrys. Esta inductancia puede afectar significativamente la frecuencia de sintonía del filtro. Cuando se determine a qué frecuencia un filtro de armónicas necesita ser sintonizado, no se olvide considerar la inductancia del cable de alimentación.

4.6 CONDUCTORES

Los conductores eléctricos con grandes áreas transversales (buses, cables, boquillas) pueden estar sometidos a calentamiento por efecto piel o corrientes de Eddy generadas por las corrientes armónicas. El dimensionamiento de los conductores basados solo en corrientes rms no puede ser

adecuado. El dimensionamiento del conductor deberá estar basado en corrientes armónicas continuas y de tiempo corto, incluyendo la fundamental y estar apegado a la *NOM-001-SEDE-2005*.

Los conductores de potencia o fuerza deberán ser clase 90 [°C] o mayor, el cableado de control y alambrado deberá ser clase 600 [V] y 90 [°C] nominal o multiconductores con doble pantalla podrían ser clase 300 [V] y 80 [°C].

4.7 CONTACTORES

Los contactores son incorporados a menudo dentro del filtro armónico para su conexión y desconexión. Los contactores deben ser clasificación IEC o Nema. El contactor debe ser especificado considerando las condiciones normales de operación del sistema y de contingencia:

- a) Voltaje máximo del sistema
- b) Corriente máxima continua (corriente fundamental y armónicas)
- c) Número de operaciones de interrupción
- d) Capacidad de interrupción de cargas capacitivas

4.8 FUSIBLES

Cada paso del filtro de cada fase será protegido por fusibles. Los fusibles pueden ser limitadores de corriente, especificados para la corriente de falla disponible en su localización. Los fusibles deben ser de la clase J o T de especificación UL, rango CSA HRC-1, o equivalente. La capacidad de corriente de los fusibles debe ser un mínimo de dos veces la corriente del capacitor a su potencia reactiva y voltaje nominales. El rango de voltaje de los fusibles debe ser mayor o igual al voltaje del sistema. Los fusibles internos de unidades capacitoras no son la protección primaria del filtro. La capacidad de corriente de los fusibles debe ser por lo menos igual a la corriente total del filtro incluyendo las armónicas, con márgenes (típicamente 35%) para cubrir condiciones de contingencia.

Los fusibles deben ser localizados después del desconectador principal y antes del contactor-reactor-capacitor. Además de la protección por fusibles, algunos filtros de armónicas pueden ser protegidos por dispositivos que detecten pérdidas de fase, sobrecarga térmica y disparen el filtro. Tales dispositivos no significan el reemplazo de los fusibles. Los fusibles deben ser especificados para las condiciones siguientes:

- a) Voltaje máximo del sistema
- b) Corriente máxima continua del filtro, incluyendo la fundamental y armónicas
- c) Capacidad de interrupción, igual o mayor que la corriente de cortocircuito disponible en la localización del fusible.
- d) Capacidad para limitar la corriente de falla a un nivel consistente con las capacidades de los componentes del filtro de armónicas
- e) Capacidad para soportar corrientes de inrush.

4.9 INTERRUPTORES

Los interruptores se pueden utilizar en lugar de los fusibles para proporcionar los medios primarios de protección por sobrecorriente (es decir, disparo termo-magnético). Alternativamente, los interruptores de caja moldeada se utilizan para proporcionar un medio primario de desconexión (interrupción manual) y proporcionar protección contra sobrecarga (disparo térmico) y contra cortocircuito (disparo magnético) para el filtro.

Los interruptores deben ser especificados para las siguientes condiciones:

Para bajo voltaje:

- a) Voltaje máximo del sistema
- b) El espectro de corriente del filtro armónico, incluyendo la fundamental y armónicas (considerando la tolerancia de fabricación de capacitores y el voltaje máximo del sistema)
- c) Capacidad interruptiva igual o mayor que la corriente de cortocircuito disponible en el filtro.
- d) Hacer un correcto dimensionamiento para limitar la corriente de falla a un nivel compatible con las capacidades de los componentes del filtro armónico
- e) Capacidad suficiente para soportar la corriente de inrush.
- f) El número y la frecuencia de las operaciones de switcheo.

Deben darse consideraciones especiales para la especificación de interruptores para filtros de armónicas. El incremento de voltaje fundamental a través del reactor resulta en voltajes 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 múltiples cruces por cero.

Debe consultarse al fabricante del interruptor para la aplicación de filtros de armónicas. Refiérase a *IEEE Std C37 04 – 1999*, *ANSI C37 06 – 2000*, *IEEE Std C37.012 – 1979* y *ANSI C37.66 – 1969* para guiarse en la especificación de estos dispositivos.

En comparación con bancos de capacitores en derivación, las corrientes de inrush y outrush se reducen significativamente en un filtro de armónicas debido al reactor en serie de sintonización. Agregando un reactor para limitar inrush y outrush cambiaría la sintonización del filtro y normalmente no es necesario.

Para alto voltaje:

- a) Voltaje máximo de operación del sistema entre fases
- b) Aterrizamiento del banco de capacitores del filtro de armónicas (no aterrizado, aterrizado, aterrizado a través de una impedancia) (Si el banco es aterrizado a través una impedancia, establecer la capacidad de la impedancia)
- c) El aterrizamiento del sistema (Efectivamente aterrizado, aterrizado a través de una impedancia o flotante), (Si el sistema es aterrizado a través una impedancia, establecer la capacidad de la impedancia)
- d) Frecuencia fundamental del sistema
- e) BIL del sistema.
- f) Tipo de instalación (interior, exterior, dentro de un tablero)
- g) Condiciones ambientales (rango de temperatura ambiente, distancia de fuga, contaminación industrial, velocidad máxima del viento, carga por nieve, requerimientos sísmicos, altitud mayor a 1800 m.s.n.m.)
- h) Máxima corriente de cortocircuito simétrica y asimétrica, momentánea y de interrupción.
- i) 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.
- j) BIL del interruptor.
- k) Ciclo de trabajo de operación del interruptor. (número y frecuencia)
- l) Trabajo de switcheo del filtro de armónicas o banco de capacitores, muy baja probabilidad de reencendido.
- m) Frecuencia natural del reactor de sintonía del filtro de armónicas. (Esta frecuencia natural afecta la relación máxima del voltaje de recuperación a través del interruptor para una falla en el filtro de armónicas).

4.10 CUCHILLAS DE PUESTA A TIERRA Y BLOQUEOS

Para servicio y mantenimiento del equipo, se incluyen con frecuencia cuchillas trifásicas de aterrizamiento cuando se usan capacitores en medio y alto voltaje. Además, se incluyen bloqueos o permisivos, las cuales se coordinan con la posición del interruptor principal y temporizadores, para cerrarse las cuchillas de puesta a tierra sólo en caso de interruptor abierto y después que el banco de capacitores está descargado generalmente 5 minutos después de que el interruptor abrió.

4.11 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 del equipo de la subestación por sobretensiones de restrikes (reencendido) del interruptor y descargas atmosféricas, pero no proporcionarán una reducción substancial 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 altos voltajes en estado estable y pueden estar sujetos a energías de descargas mayores que los apartarrayos localizados en el bus.

Las especificaciones de apartarrayos para filtros de armónicas deben cubrir los siguientes puntos:

- a) Voltaje máximo de operación del sistema fase a fase
- b) El aterrizamiento del sistema (Efectivamente aterrizado, aterrizado a través de una impedancia o flotante).
- c) Condiciones ambientales (rango de temperatura ambiente, contaminación industrial, velocidad máxima del viento, carga por nieve, requerimientos sísmicos, altitud mayor a 1800 m.s.n.m.
- d) Máxima corriente de cortocircuito disponible.
- e) Voltaje nominal y voltaje máximo de operación continua (MCOV).
- f) Clase (Distribución, Intermedia o subestación)
- g) Arreglo del montaje.

4.12 CONTROL DE SWITCHEO PARA FILTROS DE ARMÓNICAS

Los controles de switcheo son similares a los controles usados con bancos de capacitores estándar. Estos controles se discuten en la norma *IEEE Std 1036 – 1992*. Los factores clave y las diferencias para los filtros de armónicas se resumen como sigue:

- a) Si los filtros de armónicas son switcheados, estos comúnmente están controlados en base a los requerimientos de potencia reactiva a frecuencia fundamental y voltaje con consideraciones de armónicos, si se requieren.
- b) Aunque las corrientes de inrush y outrush necesitan ser tomadas en cuenta, estas son típicamente bajas en aplicaciones de filtros de armónicos debido a la presencia del reactor del filtro.
- c) Las condiciones de bajo voltaje generalmente no son críticas para el diseño del filtro, a menos que el voltaje se pierda completamente. En este caso, generalmente el filtro de armónicas deberá ser desconectado del sistema inmediatamente hasta que el sistema sea restablecido a su condición normal. La desconexión oportuna evita condiciones de sobrevoltajes dinámicos que pueden ocurrir cuando los capacitores son energizados con transformadores. Los sobrevoltajes dinámicos pueden también ocurrir cuando se energizan grandes transformadores después de que el filtro está en servicio.
- d) Cuando un filtro pequeño de baja frecuencia (tal como uno de 3ª armónica) se switchea con un filtro para armónicas de frecuencia mayor (uno de 5ª armónica), el voltaje transitorio en el filtro de 3ª armónica puede ser excesivo, resultando fallas del capacitor o reactor del filtro. Este tipo de configuración y la capacidad nominal de los equipos requeridos deberán ser evaluados cuidadosamente.

Los controles de switcheo típicos de los filtros para armónicos entran en las mismas categorías como las que se enlistan en la norma *IEEE Std 1036 – 1992* para instalaciones de capacitores estándar. Estas incluyen los siguientes puntos:

- Control de voltaje
- Control de corriente
- Control de corriente reactiva (algunas veces mencionada como control de Var's)
- Control de tiempo
- Control de temperatura

El switcheo de filtros de armónicas usando un control de voltaje, corriente o Var's usualmente están basados en los requerimientos de potencia reactiva y voltaje fundamental. Los controladores o relevadores deberán incorporar un filtrado adecuado de tal manera que la señal de switcheo este basada en la corriente y voltaje a frecuencia fundamental y no en otros componentes armónicos.

El control de switcheo o el circuito de control asociado generalmente se ajusta a un retraso de 5 minutos entre la apertura y cierre. Este retraso de 5 minutos está basado en los requerimientos de la norma *IEEE Std 18 – 2002* para unidades capacitores con capacidad superior a 600 Volts que tienen una resistencia para descargar el voltaje residual a 50 volts en 5 minutos. Este retraso de 5 minutos permite que la carga atrapada en cada unidad capacitadora decaiga a 50 volts o menos antes de que el voltaje de bus sea superpuesto a este. (Note que la construcción del capacitor bajo otros estándares diferente a la norma *IEEE Std 18- 2002* pueden tener diferentes tiempos de descarga y requieren un retraso diferente antes de la re-energización.

Cuando el retraso es menor a 5 minutos, es deseable permitir que la carga atrapada decaiga a 10% del voltaje de cresta nominal de la unidad capacitadora. (Una carga atrapada del 10% del voltaje de cresta nominal resulta en un incremento del 10% en la corriente de inrush y el sobrevoltaje transitorio) El abatimiento en el voltaje es exponencial. El tiempo en minutos requerido para alcanzar el 10% del voltaje de cresta nominal V_{nominal} expresado en [kV] (para unidades capacitores que alcanzan 50 volts en 5 minutos) se muestra en la figura 4.1.

La simulación transitoria del evento de switcheo de un filtro para armónicos o arreglos múltiples de filtros deberá ser conducida para asegurar que las especificaciones de los componentes del filtro son adecuadas para los voltajes y corrientes encontrados durante el switcheo. Cada condición de switcheo de contingencia, tal como switchear un arreglo múltiple de filtros con uno o más filtros desconectados, deberá ser simulada para que el voltaje y corriente transitorios sean considerados propiamente de acuerdo a las especificaciones de los componentes. Ver el número de catálogo *IEEE: 98TP125-0 [B2]* para un análisis más detallado de la importancia de las simulaciones transitorias para arreglos de filtros de armónicos.

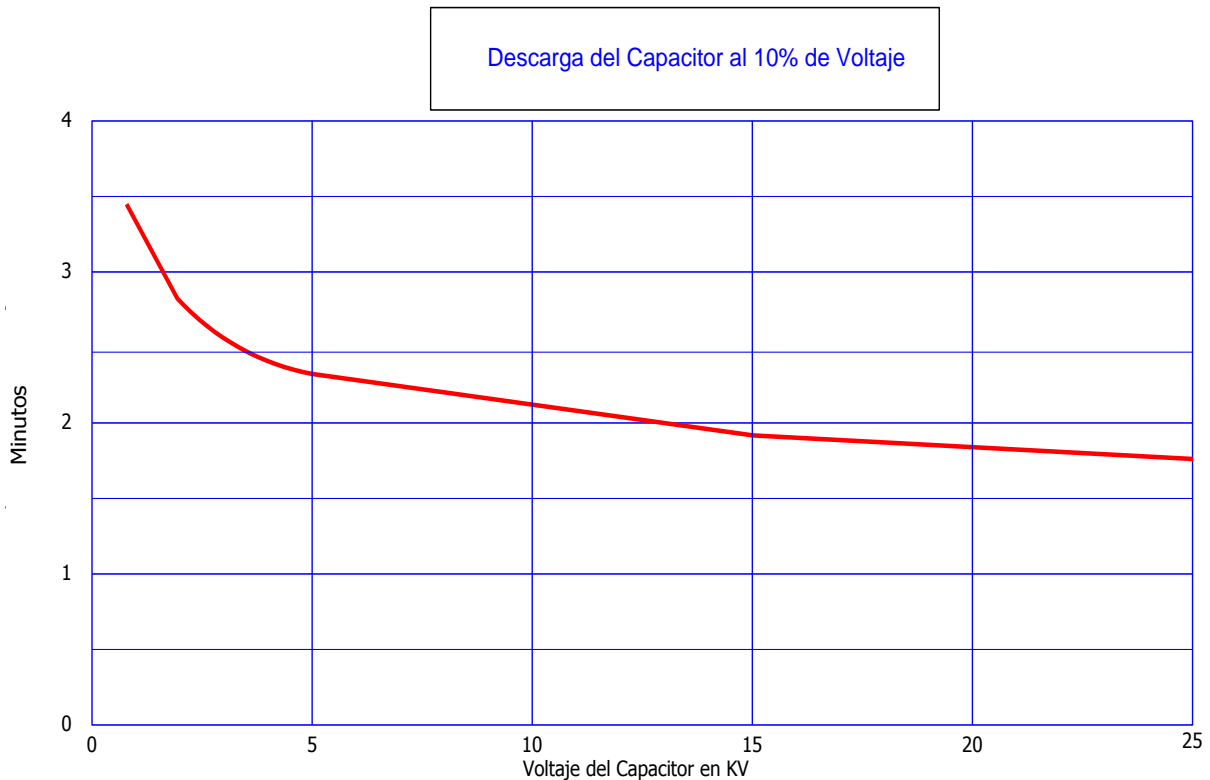


Figura 4.1 - *Tiempo de descarga a 10% del voltaje nominal para unidades capacitivas de media tensión teniendo 50 Volts en 5 minutos.*

4.13 PROTECCIONES DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

La primera causa de falla en el reactor del filtro es el sobrecalentamiento del aislamiento. Los reactores de filtro de núcleo de acero tienen típicamente un sistema de aislamiento que soporta la temperatura de 180 [°C] a 220 [°C]. Los reactores deben soportar la máxima corriente RMS (fundamental y armónicas), por tanto, se especifican y se protegen a ésta corriente

4.13.1 CONSIDERACIONES EN RELEVADORES PARA APLICACIONES EN FILTROS ARMÓNICOS

Los relevadores no son usualmente especificados para la protección de filtros armónicos. Las preocupaciones con tipos específicos de relevadores usados en filtros armónicos se discuten como sigue:

- a) Relevadores de Estado Sólido. Estos relevadores tienen burden menor y pueden tener mejor filtrado que los relevadores electromecánicos.

- b) Relevadores de sobrecorriente digitales. Actualmente, la mayoría de relevadores digitales usados para la protección contra sobrecorrientes, muestrean las corrientes, determinan su espectro armónico y determinan los factores de distorsión de corrientes. Cualquier relevador digital que no este certificado para tener la capacidad de medir valores rms no deberá ser usado en aplicaciones de sobrecarga en filtros de armónicas. Relevadores que responden solo a la corriente fundamental pueden ser preferidos para la protección de desbalance.
- d) Relevadores Térmicos. Los relevadores térmicos que sensan la temperatura directamente son efectivos para diseños de filtros cerrados. Estos relevadores pueden sensar la temperatura del aire en el gabinete o la temperatura en la superficie del núcleo de reactores de filtros armónicos con núcleo de hierro.

En reactores de núcleo en aire de filtros de alto y mediano voltaje no pueden usar relevadores directos que sensen la temperatura por las consideraciones de BIL hacen que los sensores montados en las bobinas del reactor sean imprácticos.

- e) Los Controladores Programables. Las unidades programables del monitor /controlador usualmente calculan el contenido armónico de la corriente sensada correctamente y proveen salidas digitales para la operación del relevador. Sin embargo, algunos monitores programables no son aptos para la protección armónica del filtro por razones útiles como la falta de filtros de alizamiento en las entradas del monitor.

4.13.2 PROTECCIÓN DE SOBREVOLTAJE

Los puntos clave de la protección de sobrevoltaje de un filtro armónico están resumidos como sigue:

- a) Protección contra sobretensiones. Aplíquese la selección de puntos en la metodología del apartarrayos para un análisis de este tema.
- b) Sobrevoltaje en el bus. La aplicación de capacitores intrínsecamente resulta en una elevación de voltaje a la frecuencia fundamental. Para proteger el filtro de voltajes anormales del sistema que podrían dañar sus componentes, se aplican relevadores de sobrevoltaje en el bus o relevadores de sobrecorriente del filtro.

- c) Sobrevoltaje Armónico. Las corrientes armónicas excesivas pueden resultar en voltajes armónicos excesivos en el capacitor del filtro. Aplicar el estudio de sobrecarga para un mayor análisis de este tema.
- d) Desbalance del banco de capacitores del filtro de armónicos. Los desbalances debidos a operaciones de fusible externos o internos o el cortocircuitar elementos de unidades capacitoras sin fusibles de un banco de capacitores del filtro pueden resultar en voltajes excesivos en el capacitor o en partes del banco de capacitores del filtro. Aplicar un estudio de desbalance y de desintonización del filtro para el mayor análisis de este tema.

4.13.3 PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE

Los puntos clave de protección de sobrecorriente de un filtro armónico están resumidos como sigue:

- a) Sobrecorriente Armónica. De las corrientes armónicas excesivas resultan altos voltajes armónicos en el capacitor del filtro y/o calentamiento excesivo en componentes como reactores y resistencias del filtro. Aplicar los pasos de protección contra sobrecarga para mayor análisis de este tema.
- b) Fusión de fusibles de unidades capacitoras del banco de capacitores del filtro. Los fusibles del capacitor se usan para remover unidades capacitoras falladas o elementos lo suficientemente rápido como para impedir la ruptura del tanque o el daño en otras unidades u otros elementos del capacitor. Los fusibles de potencia se usan a menudo para proveer protección principal para fallas mayores del filtro. Los fusibles externos individuales o fusibles internos no pueden proveer protección contra sobrecarga al capacitor del filtro, por tanto, lo realizan los fusibles de potencia. Los fusibles deben ser dimensionados, y posiblemente reducir potencia, para resistir, sin daño, las corrientes armónicas y las sobrecorrientes transitorias y dinámicas asociadas con la aplicación del filtro. Además, los fusibles deben ser especificados para la frecuencia del sistema y los voltajes transitorios de recuperación que se presentan en un banco de capacitores. Aplíquese *IEEE Std C37.48-1997*, *IEEE Std 1036-1992*, e *IEEE Std C37.99-2000* para más recomendaciones acerca de fusibles para aplicaciones de bancos de capacitores.
- c) Protección para fallas mayores. La protección principal para fallas mayores está generalmente provista por un dispositivo externo como un fusible de potencia o un dispositivo de switcheo con un relevador asociado.

4.13.4 PROTECCIÓN DE DESBALANCE Y DE DESINTONIZACIÓN DEL FILTRO ARMÓNICO

Ésta protección es de vital importancia para bancos de capacitores y filtros conectados en estrella, se conecta en el neutro del banco de capacitores y detecta fallas de unidades capacitoras. Debe tener al menos dos pasos o ajustes, uno para detectar pequeños desbalances y envía sólo alarma, el otro es para detectar grandes desbalances y envía alarma y disparo del filtro.

Usualmente la función más crítica de la protección por desbalance es disparar al banco de capacitores del filtro rápidamente por un flameo o falla dentro del banco que pudiera no ser detectado por la protección de sobrecorriente. Tales fallas de arqueo dentro de un banco de capacitores frecuentemente crean sobrevoltajes transitorios muy altos dentro del banco de capacitores y conducirán a un daño sustancial si el banco de capacitores no es rápidamente disparado (*consultar IEEE Std C37.99-2000*).

La protección de desbalance y desintonización (protección de desbalance a partir de ahora) se aplica a la detección de y las acciones protectoras tomadas por operaciones de fusibles externos o internos o cuando se cortocircuitan elementos de unidades capacitoras sin fusibles del banco de capacitores del filtro. Tales operaciones de fusibles o cortocircuito de elementos cambian la capacitancia del filtro y puede resultar en un incremento en el voltaje fundamental aplicado para las unidades o elementos restantes. Los efectos de este cambio de capacitancia e incremento de potencial en el voltaje fundamental deben ser evaluados para determinar la acción protectora apropiada. Generalmente, los mismos métodos de protección de desbalance usados para la protección de bancos de capacitores son también usados para bancos de capacitores del filtro. Los puntos clave de la protección de desbalance de un banco de capacitores usados en un filtro armónico están resumidos como sigue:

- a) las operaciones de fusibles externos o internos o cuando se cortocircuitan elementos de unidades capacitoras sin fusibles del banco de capacitores del filtro cambian la frecuencia resonante del filtro armónico de su punto de diseño. Operaciones de fusibles de unidades conectadas en paralelo en un banco de capacitores del filtro, resulta en una disminución en capacitancia y un incremento correspondiente de la frecuencia resonante. Hay también la posibilidad que se cortocircuiten elementos de una unidad capacitadora de fusibles externos sin que opere su fusible, resultando un incremento en capacitancia y una disminución correspondiente de la frecuencia resonante o de sintonía.

Cuando se cortocircuitan elementos sin fusibles del banco de capacitores del filtro armónico resulta en un incremento en capacitancia y una disminución correspondiente de la frecuencia resonante o de sintonía. Consultar el procedimiento de diseño en donde se indican las consecuencias de desintonización del filtro.

Cuando se especifican los requisitos de la protección de desbalance para un banco de capacitores usado en un filtro armónico, es deseable indicar el máximo cambio de capacitancia (las tolerancias + y -) que puede ser tolerado. La desintonización del filtro puede ser una condición menos importante en la protección de desbalance que el sobrevoltaje resultante en las unidades restantes del banco de capacitores o elementos de la unidad capacitadora.

- b) Los esquemas de protección de desbalance en los cuales las indicaciones ambiguas son una posibilidad de preocupación especial para el diseñador de un filtro armónico, si el número de elementos capacitivos o unidades falladas están siendo usados como un criterio para evitar daño debido a un cambio en la sintonía del filtro. Las indicaciones ambiguas ocurren cuando el banco de capacitores del filtro armónico está "balanceado" después de más de una operación de fusible o elemento fallado. Por ejemplo, una corriente insignificante deberá fluir a través de un transformador de corriente conectado en los neutros de un banco de capacitores balanceado conectado en doble-estrella-flotante; sin embargo, la misma corriente insignificante deberá fluir a través del transformador de corriente si un número igual de operación de fusibles o elementos fallados ocurre en la misma fase de ambas secciones de la estrella. Éste tipo de esquema no señala que haya habido fallas.

Donde las indicaciones ambiguas son una posibilidad, es deseable tener un esquema de detección de desbalance diseñado para emitir una alarma para pequeños desbalances (operación de un fusible externo o varios fusibles internos de una unidad capacitadora o varios elementos capacitivos cortocircuitados de una unidad capacitadora sin fusibles). Tener un esquema de detección de desbalance tan sensible minimizará la probabilidad de tener fallas no detectadas que resulten en la desintonización del filtro.

- c) Fallas de arqueo dentro del banco de capacitores del filtro armónico requieren que el banco sea removido de servicio rápidamente para minimizar el daño. Como un falla externa en una unidad capacitadora puede resultar en un gran cambio de la capacitancia del filtro y así significativamente ser desintonizado, los efectos de tal falla necesitan ser examinados por el diseñador del filtro. Aunque la protección primaria en el caso de un falla de arqueo es generalmente la protección de desbalance, ciertas configuraciones de bancos de capacitores del filtro no proveen señal de

desbalance para algunas fallas dentro del banco de capacitores del filtro. En estos casos, los siguientes puntos pueden proveer protección:

- 1) Reconfigurando el banco de capacitores del filtro armónico.
- 2) Diseñando el esquema de los relevadores de sobrecorriente de fase para proteger contra la falla de arqueo. (Aplicar *IEEE Std C37.99-2000* para más detalle de este tema.)
- 3) Para asegurar que las corrientes o voltajes armónicos adversamente no afecten la alarma o el disparo, los relevadores para la protección de desbalance pueden necesitar filtros a fin de que la operación sea en base al voltaje o corriente fundamental.

4.13.5 PROTECCIÓN DE SOBRECARGA DEL FILTRO ARMÓNICO

Los filtros de armónicas pueden estar sujetos a sobrecargas de fuentes armónicas imprevistas, resonancias imprevistas u otras contingencias. Hay dos tipos de protección de sobrecarga con la cual el diseñador de un filtro puede utilizar:

a) Sobrecarga Térmica. Las altas corrientes armónicas pueden resultar en sobrecargas térmicas de componentes del filtro como reactores, resistencias, transformadores de instrumento, fusibles e interruptores. Aunque las unidades capacitivas son típicamente diseñadas con amplia capacidad de conducción de corriente, aun pueden ser sobrecargadas térmicamente si las corrientes son lo suficientemente altas. Las pérdidas internas para una unidad capacitiva incluyen lo siguiente:

- Pérdidas dieléctricas.
- Pérdidas I^2R del conductor.
- Pérdidas I^2R de fusibles internos.
- Pérdidas I^2R de la resistencia de descarga.

Todas estas pérdidas son afectadas por corrientes armónicas. El calor de las pérdidas internas en unidades capacitivas del filtro combinadas con la temperatura ambiental alta puede resultar en excesivas temperaturas internas en las unidades capacitivas. Coordinar con *IEEE Std 18-2002* para mayor información sobre las condiciones ambientales máximas de temperatura bajo las cuales las unidades capacitivas pueden ser aplicadas. Consulte al fabricante del banco de capacitores para la guía sobre la selección de unidades capacitivas para aplicaciones de filtros.

Filtros armónicos en gabinetes metálicos o instalaciones similares, pueden requerir ventilación forzada para asegurar la temperatura ambiente en el gabinete donde los capacitores del filtro

armónico están montados no llegue a ser excesiva. Los reactores con núcleo de hierro son a menudo usados en filtros armónicos en gabinete de metal. Si los reactores de núcleo de hierro o de aire son usados en un filtro armónico en gabinete, se recomienda que estos sean colocados encima de las unidades capacitores o en un compartimento separado. Sin embargo, se deben incluir separaciones adicionales entre los componentes debido a los campos magnéticos externos que están presentes en los reactores del filtro armónico de núcleo en aire.

- b) Voltaje de sobrecarga. El voltaje de sobrecarga debido a corrientes armónicas excesivas es aplicado al banco de capacitores y reactores del filtro armónico. Como los reactores del filtro armónico son típicamente diseñados con robusto aislamiento entre espiras, el voltaje de sobrecarga no es típicamente un problema excepto en casos de eventos dinámicos tales como la energización del transformador.

Los relevadores que responden a la corriente verdadera rms pueden ser usados para proteger a los reactores y resistencias del filtro armónico de excesivas corrientes fundamentales y armónicas. La protección de sobrecarga del capacitor del filtro armónico puede ser provista por métodos de integración de corriente para calcular el voltaje aplicado a los capacitores por la circulación de corrientes fundamentales y armónicas.

Un método de detectar excesivas sobrecargas armónicas en equipos de tableros, es por el uso de termostatos que monitorean la temperatura en el gabinete. Note que los capacitores de potencia son pretendidos para operar en una temperatura ambiente máxima de 40 ° C, mientras que la mayoría de otros dispositivos en gabinete de metal pueden funcionar en un ambiente de 55 ° C.

4.14 SELECCIÓN DE COMPONENTES

Este subtema provee una guía para seleccionar capacitores de filtro armónicos y reactores de filtro armónicos, y así lograr obtener el rendimiento deseado. Para la confiabilidad, éstos y otros componentes de filtro armónicos deben hacerse de acuerdo a las recomendaciones que se mencionan en este subtema. En el diseño de filtro armónico, los capacitores son elegidos primero basándose en la potencia reactiva requerida. La inductancia del reactor del filtro de armónicas es entonces elegida para crear la frecuencia de sintonía deseada. En la práctica, la selección de componentes de filtro de armónicos requiere de varios ajustes, ya que los capacitores del filtro tienen un voltaje nominal 10 % a 25 % más alto que el voltaje de sistema para cuál son diseñados, y el reactor del filtro armónico absorbe un poco de la potencia reactiva mientras se incrementa el voltaje que pasa por el capacitor. Ambos factores pueden modificar significativamente la

compensación reactiva producida en el momento, del valor verdadero que viene en la placa de datos del capacitor. Después de esta selección componentes, una simulación de computadora debe ser empleada para valorar el desempeño del diseño y así, conseguir la atenuación armónica deseada y verificar los límites térmicos y dieléctricos adecuados de los componentes.

4.14.1 SELECCIÓN DEL CAPACITOR DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

Este método de dimensionamiento de capacitores es más común debido a que está basado en mediciones reales o datos de operación estimados. Para determinar la capacidad del banco de capacitores del filtro se requieren los perfiles de potencia real, reactiva, aparente y el factor de potencia. Se analizan los perfiles para demanda mínima, media y máxima seleccionando la capacidad del banco de tal manera que siempre se tenga un FP mayor a 0.9 y que el voltaje máximo sea 1.05 PUS (para sistemas de bajo voltaje). Se intenta que el filtro sea fijo pero si no es posible podría ser conmutado.

4.14.2 SELECCIÓN DEL REACTOR DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

Después de seleccionar la capacitancia, se selecciona la inductancia del reactor para sintonizar el filtro de armónicas a la frecuencia deseada de acuerdo a:

$$f_{\text{desintonización}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$h_{\text{tuned}} = \frac{f_{\text{de sintonización}}}{\text{frecuencia del sistema de potencia}} = \frac{1}{2\pi(\text{frecuencia del sistema de potencia})\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(4.3)$$

Donde:

- f de sintonización** : Es la frecuencia de sintonía del filtro de armónicas [Hz]
- h tuned** : Es la frecuencia de sintonía del filtro de armónicas [PU]
- L** : Es la inductancia del reactor del filtro de armónicas [H]
- C** : Es la capacitancia del filtro de armónicas [F]

Los filtros de armónicas de bajo voltaje frecuentemente se sintonizan por debajo de la frecuencia nominal de la armónica que se desea atenuar, es decir, un filtro de 5° armónica puede ser sintonizado a la 4.7ª armónica. La razón para esta práctica es por lo siguiente:

- a) Los capacitores construidos con película metalizada pierden capacitancia con el tiempo,

resultando en un incremento gradual de la frecuencia de sintonía cuando se usan en filtros de armónicas. Usando tablas de envejecimiento de capacitores del fabricante, un filtro sintonizado a un 6.0% debajo de la frecuencia de sintonía presentará una sintonía aceptable al final de 20 años de vida útil.

- b) Sintonizar el filtro para armónicas más finamente que lo requerido para lograr el desempeño deseado, sobrecarga innecesariamente los componentes del mismo y generalmente hace al filtro más propenso a sobrecargas de otras fuentes armónicas.
- c) Considerando la tolerancia de fabricación del reactor del filtro se debe sintonizar el filtro a una frecuencia menor que la deseada.
- d) La operación de fusibles de unidades capacitivas o elementos fallados resultará en un incremento en la frecuencia de sintonía.

En algunos casos en donde se desea mejorar el factor de potencia y la eliminación de armónicas es secundario, los capacitores se sintonizan al 12.0% o más, debajo de su frecuencia de sintonía. (La frecuencia de sintonía nominal es el múltiplo entero de la frecuencia fundamental que el filtro primeramente desea eliminar). Estando sintonizado de esta manera, el dispositivo resultante está protegido contra sobrecarga armónica. Tales diseños pueden usarse con seguridad en cargas generadoras de armónicas, pero no pueden absorber suficiente corriente armónica para cumplir con los límites armónicos especificados.

4.14.3 SELECCIÓN DEL APARTARRAYOS

Los apartarrayos localizados en las terminales de línea del filtro, en donde la distorsión de voltaje armónico 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 el MCOV, sobrevoltajes temporales (TOV) y absorción de energía por switcheo. En la norma *IEEE Std C62.22 – 1997* se proporciona una descripción detallada del proceso de selección.

Para apartarrayos localizados en el filtro, en donde la distorsión de voltaje puede ser substancial, deben ser considerados en la selección de las capacidades del apartarrayos, el pico de voltaje aplicado y el calentamiento por armónicas. Para el pico de voltaje, la suma de los voltajes fundamental y armónicos en la ubicación del apartarrayos $\times (\sqrt{2})$ da el voltaje pico máximo esperado.

$$V_{\text{PICO}} = \sqrt{2} \sum_h V(h) \dots \dots \dots (4.4)$$

Para evitar picos de la onda de voltaje lo suficientemente altos, arriba del pico del MCOV del apartarrayos que causen operación (conducción) y excesivo calentamiento, la capacidad de MCOV del apartarrayos deberá seleccionarse de la manera siguiente:

$$\text{MCOV} \geq \sum_h V(h) \dots \dots \dots (4.5)$$

El calentamiento por armónicas (del dieléctrico) del apartarrayos es proporcional al orden de la armónica y al cuadrado del voltaje 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:

$$\text{MCOV} \geq \sqrt{\sum_h (h V(h))^2} \dots \dots \dots (4.6)$$

Para operación continua, el MCOV para apartarrayos localizados en el filtro deberá basarse en el valor más alto de las ecuaciones 4.5 y 4.6. Además a los requerimientos de capacidad continua para el apartarrayos, estos pueden tener requerimientos de sobrevoltajes por contingencia. Si hay sobrevoltajes de corto tiempo substanciales a través del apartarrayos, la capacidad de sobrevoltaje de tiempo corto del apartarrayos deberá ser comparada con los voltajes pico esperados a los que está expuesto para determinar el MCOV requerido para reunir los requerimientos de sobrevoltaje de tiempo corto de la aplicación. Alternativamente, si el apartarrayos es modelado en un estudio de sobretensiones, la energía calculada del apartarrayos puede ser comparada con la capacidad de energía del apartarrayos suministrada por el fabricante.

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*.

4.15 SELECCIÓN DEL PUNTO DE CONEXIÓN

Los filtros de armónicas de bajo voltaje pueden ser conectados en una carga individual o en un bus de distribución. Ambas ubicaciones tienen ventajas y desventajas, las cuales deben ser evaluadas con los objetivos de la aplicación y seleccionar el punto de conexión más adecuado para una instalación en particular. En general, los filtros para armónicas conectados a las cargas son más efectivos en la mitigación de armónicas mientras, los filtros para armónicas conectados al bus son típicamente una mejor selección para mejorar el factor de potencia global de la planta. Ambas opciones suministran compensación reactiva, mitigan armónicas y están sujetos a sobrecarga.

4.15.1 FILTRO DE ARMÓNICAS EN UNA CARGA INDIVIDUAL

Los puntos PAC 1, PAC 2, PAC 3, PAC 4, PAC 5, en la figura 4.2 ilustran los filtros de armónicas conectados a la carga no lineal y la decisión puede ser el costo efectivo cuando el fabricante del equipo no lineal suministra el filtro de armónicas como parte integral del equipo suministrado o cuando pocas cargas requieren filtrado de armónicas. Los costos de instalación y mantenimiento pueden ser inaceptables, si un gran número de filtros son instalados. Un filtro de armónicas conectado en la carga no lineal, suministra compensación de potencia reactiva y filtra armónicas, ofreciendo las siguientes ventajas:

- a) Se elimina la necesidad de sobredimensionar el equipo de distribución
- b) Se minimizan las pérdidas del sistema
- c) Se reduce la distorsión de voltaje en el punto de utilización
- d) El filtro de armónicas puede ser dimensionado específicamente para la carga
- e) El filtro de armónicas puede ser conectado y desconectado con la carga

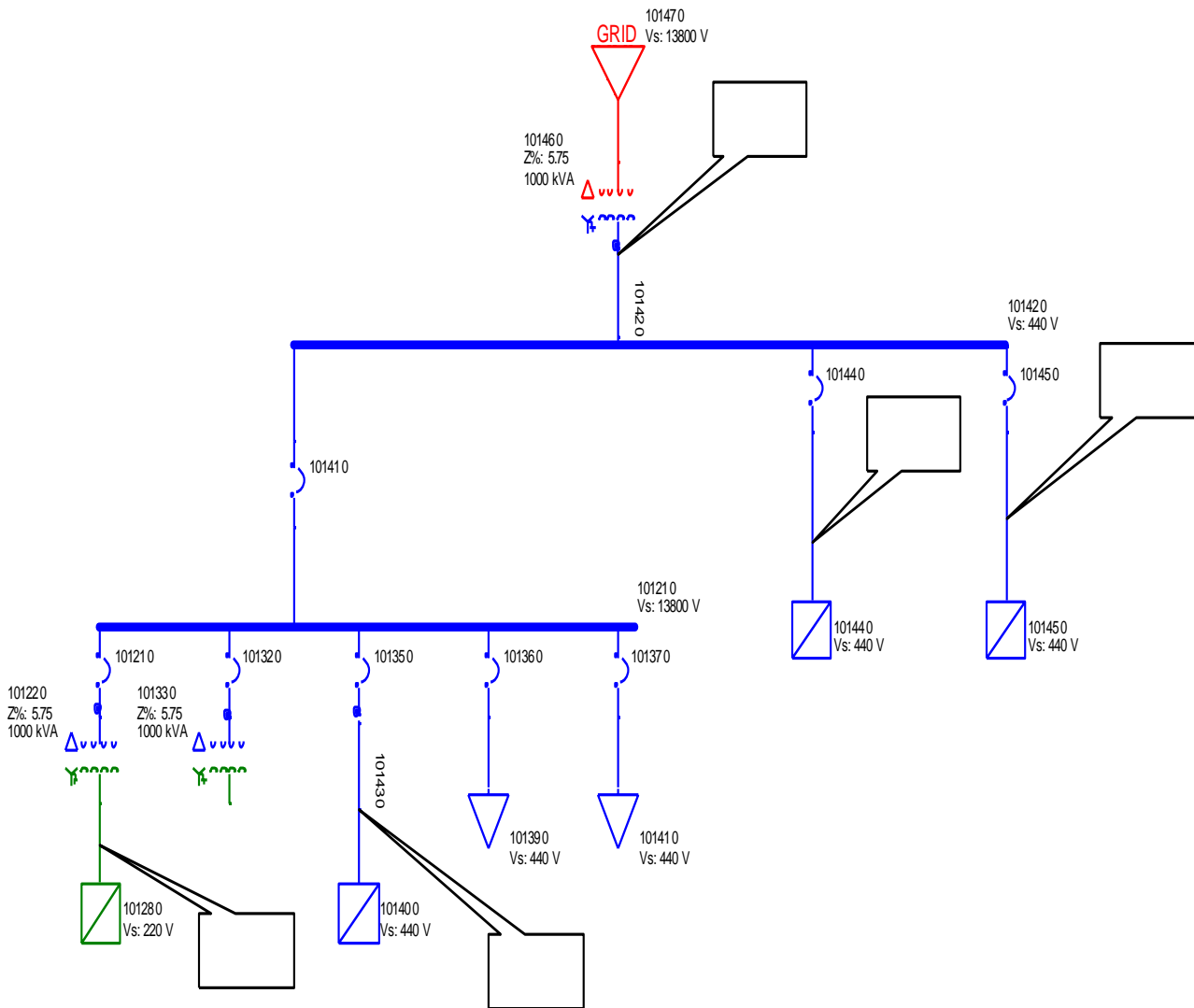


Figura 4.2 - Selección del punto de conexión

Cuando se aplica adecuadamente, un filtro de armónicas en la carga eliminará más corrientes armónicas para un diseño dado que un filtro para armónicas en el bus. La razón es que la efectividad de un filtro de armónicas depende de la división de corrientes entre el filtro y el sistema. Para prevenir sobrecargas de otras fuentes armónicas, el filtro conectado a la carga deberá siempre instalarse entre la carga y el transformador de aislamiento o reactor de línea. La impedancia reactiva del transformador o el reactor de línea deberá ser alrededor del 5.0% de la impedancia base de los controladores. Esta práctica substancialmente incrementa el punto de control de impedancia en la carga y por lo tanto, causa que más corriente armónica fluya en el filtro de armónicas. La impedancia del aislamiento reducirá grandemente pero no eliminará, la tendencia de un filtro para atraer armónicas de otras fuentes, se ilustra en la figura 4.3.

Mientras más cercana sea la sintonía del filtro a una armónica dada, menor será su impedancia y mayor será el porcentaje de esa corriente armónica (de otras fuentes) a través del filtro. Refiriéndose nuevamente a la figura 4.2, la operación de un controlador de frecuencia variable (VFD) de 300 kW (400 hp) sin su filtro de armónicas puede causar que el filtro de 5^o armónica del controlador de DC de 560 kW (750 hp) se sobrecargue. Se deberá realizar análisis de contingencias para establecer el trabajo del filtro anticipadamente.

En la práctica, los márgenes de seguridad deberán incluirse en el diseño del filtro de armónicas para considerar cargas de armónicas adicionales. En algunas instalaciones se podría requerir que la carga se energice con su filtro para evitar que la carga entre en operación sin su filtro. Otras consideraciones involucran la aplicación de múltiples filtros de armónicas de sintonización sencilla. La pérdida de un filtro de armónicas sintonizado a una armónica menor probablemente causará a otro una sobrecarga severa. Por ejemplo: si el filtro de 5^a armónica esta fuera de servicio mientras el filtro de 7^a armónica del controlador de dc de 560 kW (750 hp) está energizado (en la figura 4.3), puede ocurrir una resonancia paralelo cercana a la corriente de 5^o orden y exponer al filtro de 7^a armónica a niveles amplificados de corriente de 5^a armónica. Tal condición respalda la necesidad de la protección de sobrecarga térmica para el filtro de armónicas.

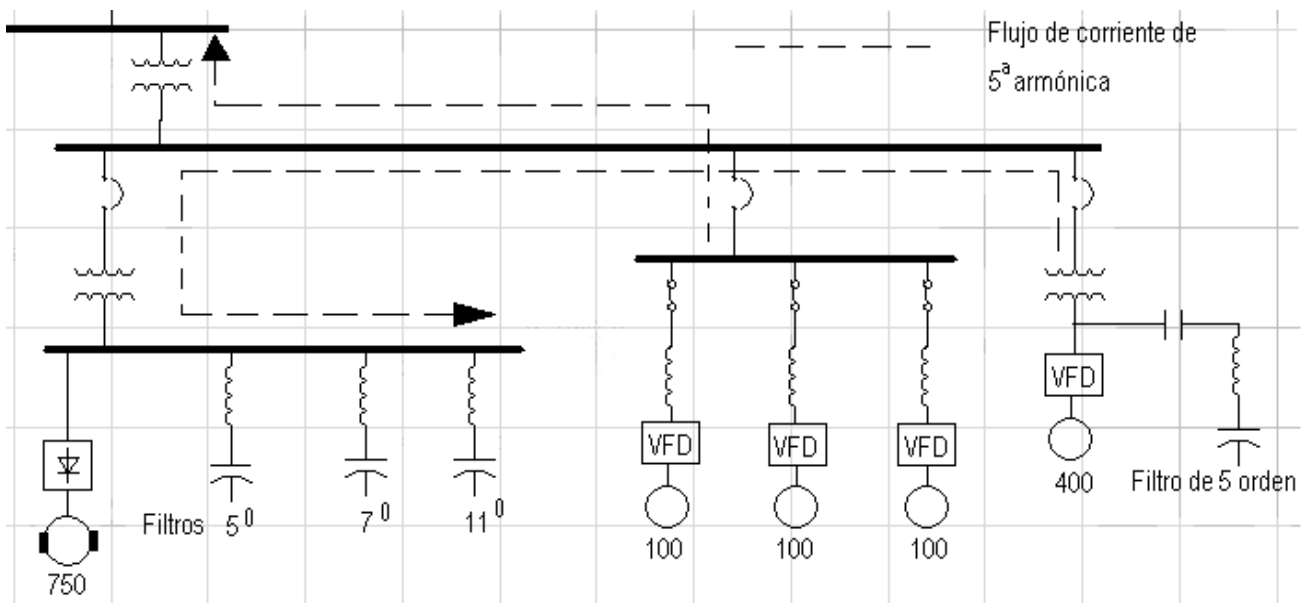


Figura 4.3 - Flujo de corrientes armónicas.

4.15.2 FILTROS DE ARMÓNICAS EN UN BUS DE DISTRIBUCIÓN

Para ciertas aplicaciones, en instalaciones con bajo factor de potencia y cuando se violan los límites permisibles de corriente y voltaje de la *Norma CFE L0000 45*, la solución más económica es instalar

uno o mas filtros de armónicas en un bus o buses de distribución como se indica en la figura 4.2 (PAC 1). Generalmente, un filtro de armónicas automático se instalará en el secundario del transformador principal de la planta que requiera compensación armónica y mejoramiento del factor de potencia.

La ubicación de múltiples bancos de capacitores en un sistema de bajo voltaje cambia el flujo armónico en la red y se podrían sobrecargar algunos de los filtros de armónicas, por consiguiente, esta práctica generalmente no se recomienda. En donde la corrección del factor de potencia es más importante, generalmente pueden ser aplicados con seguridad sistemas sintonizados a la 4.2ª armónica o menores y se evalúa cuidadosamente la resonancia paralelo que podría caer cerca de la 3ª armónica, si existe la corriente de 3^{er} orden podría amplificarse e incrementarse las distorsiones, afectando la calidad de la energía.

Debe practicarse la precaución cuando un filtro de armónicas está eléctricamente cercano al sistema de distribución y sintonizado a la 4.7ª armónica o mayor. En este caso, existe la probabilidad de absorber grandes cantidades de corrientes armónicas del sistema de distribución de la compañía suministradora. Los filtros de armónicas deberán ser diseñados asumiendo que el sistema de distribución tendrá hasta un 3.0% de distorsión de voltaje individual en armónicas cercanas a la frecuencia de sintonía. Si los reactores de los filtros de armónicas no son equipados con derivaciones, como es común en filtros de bajo voltaje, una buena práctica es especificar el banco de capacitores a fin de contar con una capacitancia adicional para que pueda ser sumada y resintonizar el filtro en caso de ocurrir una sobrecarga armónica.

Al alterar los resultados de sintonía en un filtrado inaceptable de armónicas en la planta, la compañía suministradora generalmente puede ayudar a identificar métodos para reducir la corriente armónica existente. Las posibles soluciones por parte de la compañía suministradora pueden ser las siguientes:

- a) Cambiando la capacidad del banco de capacitores para alterar la impedancia característica del sistema
- b) Aplicando los límites permisibles de distorsión de la *Norma CFE L0000 45* a usuarios con inyección excesiva de armónicas
- c) Reconfiguración del circuito para aislar las fuentes de armónicas
- d) Filtros de armónicas en media tensión

En demanda mínima, los filtros de armónicas que están fijos pueden producir una condición de sobrevoltaje. La máxima elevación de voltaje en p.u. causado por el filtro es igual a la corriente nominal del filtro dividido por la corriente de cortocircuito trifásica del sistema en la ubicación del filtro. Si el sobrevoltaje es superior al 3% permitido, deberá considerarse un filtro de armónicas switchado automáticamente.

Los filtros para armónicas switchados consisten de un número de pasos, cada uno de los cuales es un filtro de armónicas individualmente sintonizado. Los controladores de corriente reactiva (algunas veces conocidos como controladores de Vars) pueden insertar o desconectar pasos automáticamente como lo requieran los cambios de corriente reactiva del sistema. Otras alternativas de switcheo incluyen el uso de relevadores de corriente, controladores de tiempo, controladores de voltaje u otros dispositivos de monitoreo. Los pasos deberán ser switchados en intervalos de 10 a 15 segundos. Si el controlador tiene la capacidad, el intervalo de desconexión del paso deberá ser mayor a 1 minuto para evitar switcheos innecesarios. Algunos controladores incluyen algoritmos para evitar el pin-pon de potencia reactiva.

En general, antes de instalar un banco de capacitores o filtro, se deberá realizar el análisis armónico para determinar:

- La impedancia contra frecuencia "vista" en los buses de interés.
- Las frecuencias de resonancia paralelo y serie.
- La distribución de corrientes armónicas.
- Las distorsiones de corriente y voltaje.

Así se verificará el desempeño del banco de capacitores y/o filtro en la instalación y el sistema de distribución.

Es importante mencionar que al conectar un banco de capacitores, éste entrará en resonancia con el sistema de potencia, si la frecuencia de resonancia paralelo cae en una armónica existente o cercana a ella, habrá amplificación de las corrientes armónicas existentes cercanas a la frecuencia de resonancia, incrementándose las distorsiones de corriente y voltaje.

Cuando se conecta un filtro en un bus, "visto" desde el bus, se presentan la resonancia serie en la armónica que se desea atenuar y *la resonancia paralelo antes de la frecuencia de sintonía del filtro*, amplificándose así las corrientes armónicas (si existen) cercanas a la frecuencia de resonancia paralelo. La resonancia en paralelo sucede cuando la impedancia del filtro es igual a la impedancia del sistema.

4.15.3 COMBINACIÓN BUS – CARGA

Cuando las fuentes de armónicas constituyen solo una parte de la carga del sistema de la planta, los filtros de armónicas conectados en cargas individuales pueden dejar el factor de potencia en el bus más bajo que el deseado. Una combinación de los dos métodos conducirá a un resultado aceptable. Los filtros de armónicas son conectados a cargas no lineales productoras de corrientes armónicas y para soporte de potencia reactiva y mejorar el factor de potencia se agrega al bus principal un filtro de armónicas desintonizado. (Un filtro desintonizado es un filtro sintonizado a una frecuencia tal que esta nunca se sintonizará con la impedancia de la fuente a una frecuencia donde existen armónicas significativas. Estos filtros con frecuencia se sintonizan debajo de la 5ª armónica. (Ejemplo: a la 4.5 o 4.3 armónicas).

Raramente los capacitores que no son parte de un filtro de armónicas se instalan en la planta para suministrar el déficit de potencia reactiva capacitiva. Dado que típicamente solo las armónicas menores son filtradas, los capacitores que no son una parte de un filtro pueden crear una resonancia considerable a una frecuencia armónica mayor. La conexión de capacitores a motores individuales es particularmente un riesgo ya que predecir todas las posibles condiciones del sistema es prácticamente imposible. La norma *IEEE Std 141-1993* trata en detalle este tema y otros relacionados a la conexión de capacitores en las terminales de un motor.

En el diseño y construcción de filtros de armónicas deberán seguirse las normas *UL 508-1999* y *UL 508A-2001*. Los filtros para armónicas deberán ser eléctricamente conectados al bus trifásico a través tuercas mecánicas o de compresión. Deben seguirse todos los requisitos del código referentes al aterrizamiento.

4.16 ENSAMBLE DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

La mayoría de los componentes de los filtros de armónicas generalmente son reactores de núcleo de aire, banco de capacitores, resistores, contactores, fusibles, relevadores de protección y bus. El desconectador principal consiste de interruptor en caja moldeada o interruptores electromagnéticos, relevadores, medidores y controladores. En específico para este tipo de equipos, los rangos normales de operación deben ser especificados con requerimientos mayores a los espectros de corriente de armónicas y con escasas tolerancias en los parámetros de los componentes, específicamente en capacitores, reactores y resistencias. Debido a que las corrientes causan varios problemas en los sistemas eléctricos de potencia, las normas aplicadas a los componentes abajo mencionados sirven de pauta al momento de ensamblar el filtro.

4.17 ENSAMBLES DE LA RESISTENCIA A LOS FILTROS DE ARMÓNICAS PASO ALTAS

Las resistencias generalmente no se requieren en filtros de armónicas de sintonización sencilla. Típicamente, el valor de la resistencia en el filtro consiste principalmente de la resistencia del reactor. El bajo valor de resistencia incrementa la efectividad del filtro de armónicas y simultáneamente minimiza las pérdidas de potencia.

Las resistencias se requieren en filtros de armónicas paso altas. Un filtro paso altas tiene baja impedancia a frecuencias mayores a la frecuencia de sintonía (permite el paso de frecuencias superiores). La resistencia en este tipo de filtro crea una baja impedancia a la frecuencia nominal e impedancias prácticamente constantes a altas frecuencias. Este tipo de filtro para armónicas ha sido usado efectivamente para atenuar ranuras de la forma de onda del voltaje (notches) debido a la conmutación de tiristores y algunas veces aplicado en combinación con filtros de sintonización sencilla.

La mayoría de los filtros de armónicas pasivos de sintonización sencilla tienen una alta calidad (Q). Algunas aplicaciones requieren la atenuación de más de una armónica y requieren amortiguamiento adicional. Una resistencia con frecuencia suministra ese amortiguamiento.

No existen normas ANSI o IEEE específicamente relacionadas a las resistencias de los filtros. La norma que relaciona más a la resistencia en aplicaciones de filtros, es *la IEEE Std 32 – 1972*. Se resumen algunas de las consideraciones adicionales para el uso en filtros de armónicas.

a) *Especificación de puntos*. Las especificaciones para la resistencia del filtro deberá incluir lo siguiente.

- 1 Voltaje máximo de operación del sistema entre fases
- 2 Frecuencia fundamental del sistema
- 3 BIL del sistema, (Se muestra en el anexo C)
- 4 Tipo de instalación (interior, exterior, dentro de un tablero)
- 5 Condiciones ambientales (rango de temperatura ambiente, distancia de fuga, contaminación industrial, velocidad máxima del viento, carga por nieve, requerimientos sísmicos, altitud mayor a 1800 m.s.n.m.)
- 6 Resistencia (ohms) y su tolerancia.
- 7 Inductancia máxima permitida (si se requiere baja inductancia).
- 8 Variación de la resistencia máxima permitida con la temperatura (si la variación de la

resistencia con la temperatura es crítica).

- 9 Magnitud y duración de la corriente de cortocircuito máxima a través de la resistencia.
- 10 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)
- 11 Voltajes picos transitorios y dinámicos por operaciones de switcheo (Reencendido del arco en el interruptor durante la desenergización, energización de transformadores)
- 12 Ciclo de trabajo esperado o repetición y duración de voltajes y corrientes del punto 10 y 11.
- 13 Energía nominal del resistor (máxima capacidad de energía, opcional solo para cargas fluctuantes)
- 14 BIL mínimo requerido a través de la resistencia y los BILs mínimos requeridos de las terminales de alto y bajo voltaje a tierra de la resistencia.
- 15 Dimensiones preestablecidas y arreglo del montaje

b).- El espectro de corrientes armónicas de operación continua, temporal y contingencia. Al igual que con los reactores, este espectro determina las consideraciones del calentamiento / pérdidas y vibración / ruido. Las pérdidas a frecuencia fundamental pueden ser substanciales en algunos diseños de filtros de armónicas amortiguados.

c).- Los requerimientos de cortocircuito máximo para la resistencia es similar a los requerimientos presentados para el reactor del filtro.

d).- Algunas aplicaciones pueden requerir que la resistencia tenga baja inductancia serie.

e).- Los requerimientos de voltaje son similares a los requerimientos presentados para el reactor un filtro.

f).- La tolerancia de la resistencia con consideraciones en la frecuencia para asegurar el desempeño adecuado

g).- Los arreglos del montaje son similares a los del reactor del filtro, hermetismo contra animales, tales como pantallas o encapsulados que pueden ser necesarios para prevenir fallas.

4.18 ENSAMBLE DEL CAPACITOR DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

En condiciones normales de operación, el banco de capacitores deberá ser dimensionado para que el voltaje y potencia reactiva no excedan el 100% de los datos nominales de placa de las unidades

capacitoras del filtro. La norma *IEEE Std 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 norma *IEEE Std 18 – 2002* da los siguientes límites para unidades capacitoras:

- a) 110% del voltaje rms nominal
- b) 120% de la capacidad de voltaje pico (el voltaje pico no debe exceder $1.2 * \sqrt{2} *$ voltaje rms nominal, incluyendo armónicas, pero excluyendo transitorios.
- c) 180% de la corriente rms nominal basado en los kvar y voltaje nominales.
- d) 135% de la capacidad de kvar.

Alguna información importante relacionada a los capacitores se resume como sigue:

- I. *Capacidades de sobrecarga*: Las capacidades de sobrecarga mencionadas anteriormente se usan generalmente para condiciones de contingencia. Estas contingencias incluyen sobrevoltajes del sistema, condiciones de desbalance del filtro de armónicas y otras contingencias. Se darán las condiciones especiales necesarias a la sintonía del filtro durante condiciones de desbalance del mismo (complementar con el apartado que trata la protección de desbalance del filtro) dado que las corrientes fundamental y armónicas pueden incrementarse significativamente en todo o parte del banco de capacitores del filtro.
- II. *Especificación del elemento*: Las especificaciones del banco de capacitores del filtro para estas aplicaciones deberá incluir lo siguiente:
 1. El voltaje máximo de operación entre fases del sistema
 2. Frecuencia fundamental del sistema de potencia
 3. El BIL del sistema, (Se muestra en el anexo C)
 4. La potencia reactiva capacitiva efectiva trifásica total (MVAR) a voltaje nominal
 5. La(s) frecuencia(s) de sintonía del filtro
 6. Tipo de instalación (interior, exterior, en tablero)
 7. 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 m.s.n.m)
 8. Capacitancia del banco de capacitores del filtro (microfarads) y tolerancia
 9. Picos de voltajes armónicos individuales aplicados 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)

- 10. Picos de voltajes transitorios y dinámicos por operaciones de switcheo (re-encendido del arco en el interruptor durante la desenergización del filtro, energización de transformadores)
- 11. Ciclo de trabajo esperado o capacidad de repetición y duración de las corrientes y voltajes del punto 9. y 10
- 12. Configuración del banco de capacitores del filtro (estrella aterrizada, estrella flotante o delta)

III. *Voltaje nominal:* El voltaje rms nominal V_r de los capacitores usados en el banco de capacitores del filtro se especifica como el mayor de los puntos 1, 2 o 3 como sigue:

a) Voltaje a frecuencia fundamental en estado estable más los voltajes debidos a las corrientes armónicas a través de los capacitores. Tales voltajes deberán calcularse por la suma aritmética de los voltajes a frecuencia fundamental y armónicos como se muestra en la ecuación (4.7) ó ecuación (4.8).

$$V_r = \sum_{h=1}^{\infty} I(h) X_c(h) \dots\dots\dots(4.7)$$

Donde:

V_r : Es el voltaje rms nominal del capacitor

h : Es el orden de la armónica

$I(h)$: Es la corriente armónica considerada (valor rms) a través del capacitor

$X_c(h)$: Es la reactancia capacitiva a la armónica considerada

ó

$$V_r = V_c(1) + \sum_{h=2}^{\infty} I(h) X_c(h) \dots\dots\dots(4.8)$$

Si la corriente fundamental a través del capacitor no es especificada.

Donde:

$$V_c(1) = V_s \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) \dots\dots\dots(4.9)$$

y donde:

$V_c(1)$: Es el voltaje rms máximo a 60 [Hz] aplicado al capacitor, incluyendo la elevación del

voltaje por el reactor de sintonía.

V_s : Es el voltaje máximo del sistema aplicado al capacitor, sin incluir la elevación del voltaje por el reactor de sintonía.

H : Es el orden armónico de sintonización del filtro (4.3^a, 4.7^a, 5^a, 6.8^a y así sucesivamente)

- b) Para eventos transitorios (generalmente menores que ½ ciclo de la frecuencia del sistema, tales como switcheo de bancos de capacitores, re-encendido del arco del interruptor (restrike), etc.) el voltaje nominal del capacitor se calcula con la ecuación (4.10).

$$V_r = \frac{V_{tr}}{\sqrt{2} k} \dots\dots\dots(4.10)$$

Donde:

V_r : Es el voltaje nominal (rms) del capacitor

V_{tr} : Es el voltaje pico transitorio

K : Es el multiplicador de la figura 4.4

Use la figura 4.4 para determinar el voltaje nominal mínimo del capacitor aceptable para adecuar los voltajes transitorios esperados, se entra en la figura con el número máximo de transitorios esperados por año y en el eje Y se determina la *k* apropiada.

La norma IEEE Std 1036 – 1992 establece que una unidad capacitadora se espera razonablemente que aguante los sobrevoltajes transitorios indicados en la figura 4.4.

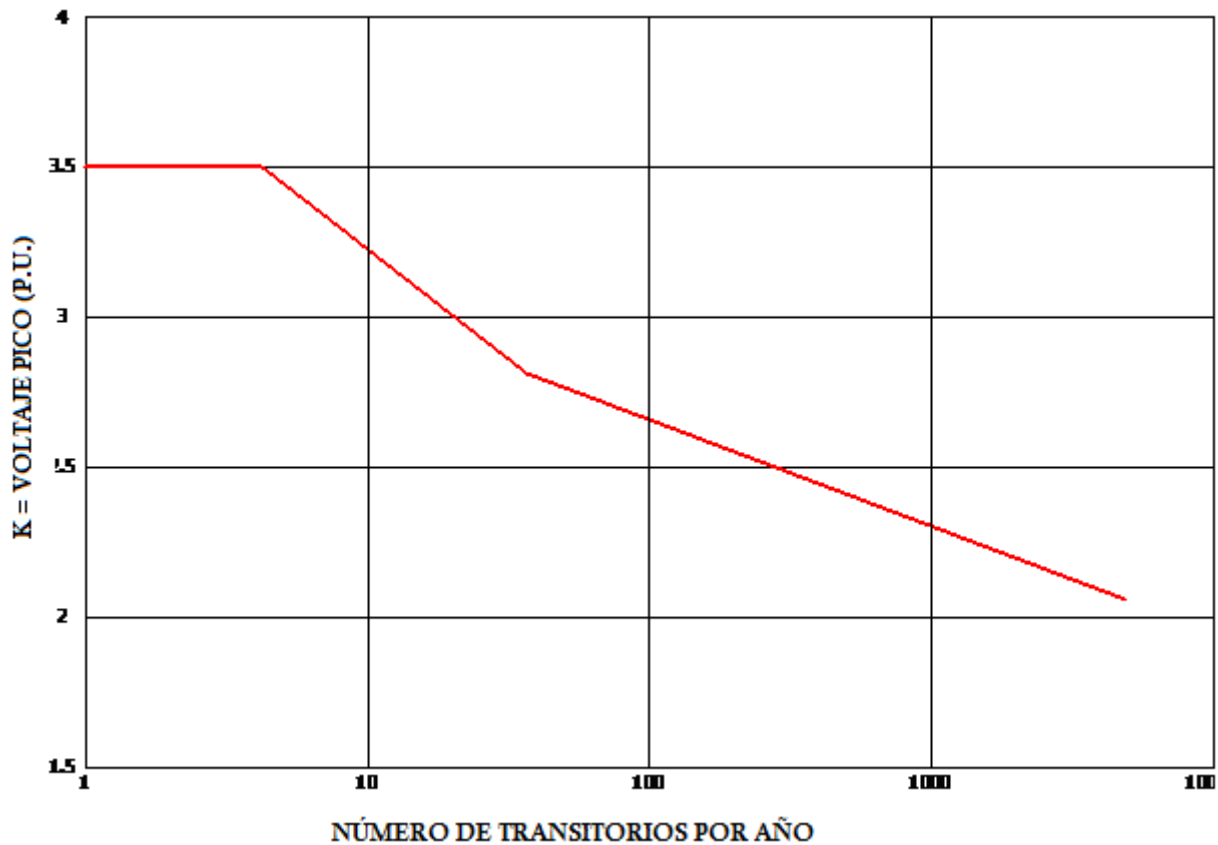


Figura 4.4 - *Capacidad de aguante de los capacitores a sobrevoltajes transitorios*

c) Para eventos dinámicos (generalmente de unos cuantos ciclos a varios segundos, tales como la energización de un transformador, libramiento de una falla de línea o bus, etc.) el voltaje nominal del capacitor se calcula usando la siguiente ecuación.

$$V_r = \frac{V_d}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots(4.11)$$

Donde:

V_r: Es el voltaje nominal del capacitor

V_d: Es el voltaje pico aplicado al capacitor durante un evento dinámico

Para contingencias infrecuentes (fallas del sistema) puede usarse la capacidad de sobrevoltaje en contingencia para reducir el voltaje nominal del capacitor. Esta figura está basada en un total de 300 contingencias sobre la vida útil de la instalación. Para sobrevoltajes resonantes que ocurren con alguna regularidad en la operación del filtro, se recomienda que el voltaje nominal sea para resistir los sobrevoltajes resonantes calculado por la ecuación (4.11)

Ocasionalmente, debe considerarse convertir un banco de capacitores existente en filtro de armónicas. Es importante comparar las capacidades nominales del banco de capacitores existente con las capacidades nominales requeridas para el filtro. Además de incrementarse el voltaje aplicado al banco de capacitores por los voltajes armónicos, el voltaje fundamental también se incrementará por la instalación del reactor de sintonía, de acuerdo a la ecuación (4.9).

Otros tópicos (incluyendo potencia reactiva y corrientes) presentados en esta guía también deben ser considerados.

IV. *Tolerancia en Capacitancia.* Los siguientes parámetros del capacitor deben estar definidos al diseñar un filtro para lograr un punto de sintonización específico.

- Variación de la capacitancia con la temperatura
- Tolerancia de fabricación de la capacitancia

El efecto de la tolerancia de la capacitancia en la operación del filtro debe ser evaluado. Las unidades capacitoras construidas de acuerdo a la norma *IEEE Std 18 – 2002* tienen una tolerancia de fabricación en el rango de 0% a +10% a 25°C de temperatura interna y uniforme en el tanque. Los capacitores viejos pueden tener tolerancias del orden 0% a +15% en la capacitancia de las unidades capacitoras individuales. Mientras este rango puede ser aceptable para bancos de capacitores en derivación, estos pueden ser inaceptables para algunas aplicaciones de filtros.

En diseños de filtros de armónicas, los fabricantes de capacitores deben seleccionar una tolerancia para unidades individuales a fin de que la tolerancia de capacitancia del banco del filtro se alcance. La tolerancia de la capacitancia de unidades individuales no deberá exceder $\pm 5\%$ de la capacitancia nominal. Una tolerancia razonable para un banco de capacitores es 4% ($\pm 2\%$, o 0% +4%) medida a 25 °C. Se puede lograr una capacitancia más ajustada a través de una consulta con el fabricante. La variación de la capacitancia sobre un rango de temperatura de operación puede ser significativa. Los fabricantes de capacitores pueden usualmente suministrar la variación de la capacitancia con la temperatura.

V. *Capacidad de sobrecarga de corto tiempo a frecuencia del sistema (60 Hz).* Como se mencionó en *IEEE Std 1036 – 1992*, puede esperarse que las unidades capacitoras tengan una capacidad de sobrecarga de tiempo corto de 300 sobrevoltajes a frecuencia del sistema, de magnitud y duración especificado en la curva mostrada en la figura 4.5, sin transitorios superpuestos ni

contenido armónico.

En el uso de la figura 4.5, la capacidad de sobrevoltaje es para unidades capacitoras, no para el banco de capacitores, la evaluación del sobrevoltaje a la que es expuesta la unidad capacitadora deberá incluir el adicional por el desbalance de voltaje en el banco de capacitores.

El eje del tiempo en la figura 4.5 indica la duración máxima para un solo evento. El daño a la unidad capacitadora tiende a escalar durante un evento, por lo tanto, el daño sucede más rápidamente al final del evento que al principio. Dos segundos continuos a 1.73 p.u. es mucho más severo que dos eventos separados de 1 segundo cada uno, con un tiempo intermedio para permitir el enfriamiento, absorber los gases por efecto corona, etc.

La curva no deberá ser utilizada para estimar el efecto de eventos de sobrevoltajes por contingencias que excedan el tiempo máximo indicado por la curva. Para eventos de tiempo más cortos que los indicados por la curva, los tiempos de los eventos individuales pueden ser acumulados para estimar el efecto de los eventos cortos.

Diez eventos de 1.73 p.u. de 0.1 segundos cada uno (más corto que el límite de 1 segundo permisible de la curva) deberán generar igual o menos daño a la unidad capacitadora que un evento de 1.73 p.u. de 1 segundo de duración.

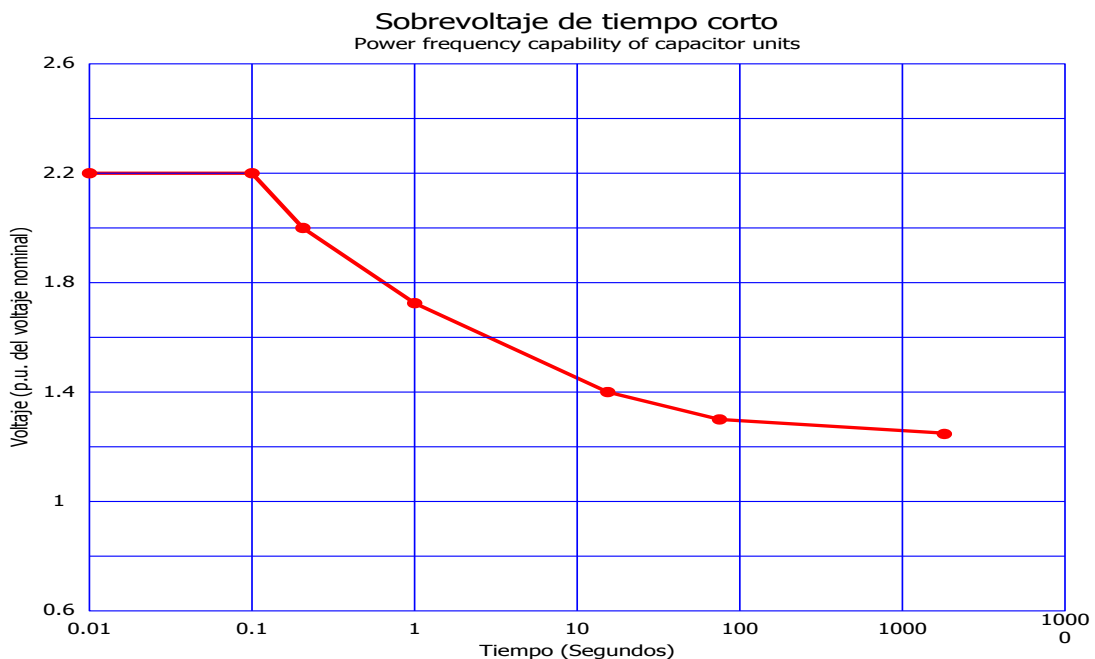


Figura 4.5 - *Máximos sobrevoltajes de contingencia a frecuencia del sistema de unidades capacitoras (sin transitorios superpuestos ni contenido armónico).*

Las unidades capacitadoras de un banco de capacitores en derivación (no filtros) pueden razonablemente aguantar, durante su vida útil normal, un total combinado de 300 aplicaciones de sobrevoltajes (a frecuencia del sistema de terminal a terminal) de magnitud y duración de esta curva, sin transitorios superpuestos ni contenido armónico. Para filtros con voltajes armónicos significativos a través de los capacitores, el sobrevoltaje equivalente de terminal a terminal del capacitor se calcula sumando aritméticamente los voltajes rms fundamental y armónicos individuales que se aplican en las terminales del capacitor. Ver ecuación (4.8).

Si esta capacidad es necesaria en una aplicación en particular, es importante asegurarse que los otros equipos también tienen esta capacidad de sobrecarga de tiempo corto incluyendo reactores, resistencia, fusibles, interruptores, etc.

- VI. El aumento de temperatura de las unidades capacitadoras resulta del calentamiento del dieléctrico (resistivo $I^2 R$ y las pérdidas en la resistencia de descarga). A frecuencias armónicas, el calentamiento por corrientes de Eddy del tanque del capacitor puede también contribuir al calentamiento del dieléctrico. Las pérdidas del dieléctrico están relacionadas a los KVAR de operación de la unidad capacitadora (suma de los productos de voltaje y corriente a cada armónica, incluyendo la fundamental). El dieléctrico y las pérdidas por calentamiento $R I^2$ dependen de la construcción de la unidad. (espesor de la hoja metálica, conexiones, fusibles internos) Las pérdidas en la resistencia de descarga son determinadas por el voltaje rms de operación y la propia resistencia. Se deberá contactar al fabricante de las unidades capacitadoras si hay alguna pregunta concerniente a una posible elevación de temperatura no deseable en las unidades capacitadoras.
- VII. Configuración del banco. Cualquiera que sea, estrella aterrizada, estrella flotante o delta no afecta el desempeño para armónicas de secuencia positiva y negativa. Las armónicas de secuencia cero deberán ser controladas por un banco configurado en estrella aterrizada. Las ventajas y desventajas de las configuraciones del banco, como se describió en *IEEE Std 1036 – 1992*, aplican igualmente a los bancos de capacitores de los filtros. La tercera armónica es de secuencia cero durante condiciones balanceadas. Sin embargo, las cargas desbalanceadas tales como hornos de arco eléctrico, pueden producir terceras armónicas tanto de secuencia positiva como cero. La porción de secuencia cero es usualmente controlada por transformadores conectados en delta, también puede ser controlada por un filtro conectado en estrella aterrizada. La porción de secuencia positiva puede ser controlada por un filtro conectado en estrella aterrizada, estrella flotante o delta.

4.19 ENSAMBLE DEL REACTOR DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

La aplicación de reactores para filtros de armónicas requiere de algunas características que no se toman en cuenta para otras aplicaciones, a continuación se enlistan algunas de ellas:

a) Especificación de puntos. Las especificaciones de reactores para filtros de armónicas deberán incluir lo siguiente.

1. Voltaje máximo de operación del sistema entre fases.
2. Frecuencia fundamental del sistema
3. BIL del sistema
4. Frecuencia de sintonía del filtro (Hz)
5. Tipo de instalación (interior, exterior, dentro del tablero)
6. Condiciones ambientales (rango de temperatura ambiente, distancia de fuga, contaminación industrial, velocidad máxima del viento, carga por nieve, requerimientos sísmicos, altitud mayor a 1800 m.s.n.m.)
7. Inductancia del reactor (milihenrys), tolerancia de la inductancia y si se requieren taps.
8. La calidad del filtro a la frecuencia de sintonía Q , con su tolerancia si es crítica (Note que la Q es la relación de la reactancia a la resistencia efectiva en serie (X/R)).
9. Corriente de cortocircuito máxima y su duración a través del reactor.
10. 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)
11. Voltajes picos transitorios y dinámicos por operaciones de switcheo (Reencendido del arco en el interruptor durante la desenergización, energización de transformadores)
12. Ciclo de trabajo esperado o repetición y duración de voltajes y corrientes del punto 10 y 11.
13. BIL nominal a través de la bobina y a tierra (puede ser diferente)
14. Dimensiones preestablecidas de la bobina y arreglo del montaje
15. Límite de ruido audible (si se aplica).

b) Reactores núcleo de acero trifásicos para filtro. Los reactores núcleo de acero trifásico para filtro de armónicas deben evitarse en situaciones donde el desempeño del filtro para armónicas 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 la inductancia de las tres fases se mantenga constante si se incrementa

la frecuencia.

- c) *Inductancia, Tolerancia de la inductancia y Factor de calidad.* La inductancia y el factor de calidad (Q) para el reactor del filtro deberá ser especificado a la frecuencia resonante (de sintonía). La tolerancia en la inductancia deberá seleccionarse para asegurar el desempeño adecuado del filtro con la red a través de un rango de tolerancia. La tolerancia de la inductancia esta usualmente disponible como $\pm 3\%$ ó de +0% a 0.6%. La tolerancia en el factor de calidad, Q, es típicamente $\pm 20\%$.

Los taps del reactor, si se requieren, deberán también ser especificados. Los taps son frecuentemente incluidos para proporcionar una sintonía final en campo y para acomodar cambios en la capacitancia del banco de capacitores del filtro. Los bancos de capacitores del filtro se construyen frecuentemente con capacidad para futuras expansiones.

- d) *Espectro de corrientes armónicas.* El espectro de corrientes armónicas debería ser definido para ambas condiciones, continuas y temporales / contingencia. Las condiciones transitorias también deberían ser tomadas en cuenta en aplicaciones donde el filtro armónico es expuesto a transitorios frecuentes tales como energización de transformadores. El ciclo de trabajo o la repetición frecuente de transitorios y operación de contingencia deberían ser especificados.

El espectro de corrientes armónicas es requerido por las siguientes razones:

- 1) Para asegurar que el núcleo no se sature y para determinar las pérdidas en núcleo y espacios en núcleo de acero de los reactores del filtro armónico.
- 2) Para ayudar al diseñador del reactor del filtro armónico en la selección del conductor para minimizar las pérdidas por resistencia, corrientes de eddy y fuga.

La corriente especificada a la frecuencia fundamental debería considerar las variaciones en el voltaje de línea y la tolerancia en la capacitancia del filtro armónico. La frecuencia fundamental también deberá ser claramente especificada.

- e) *Especificaciones de Voltaje.* Los voltajes (1) fundamental y armónico, (2) BIL mínimo requerido a través de la bobina y (3) debe ser especificado el BIL mínimo requerido en las terminales de alta y baja tensión de la bobina a tierra o núcleo (reactores con núcleo de acero del filtro para armónicas).

El voltaje nominal en estado estable se calcula como la suma aritmética de la fundamental y los

armónicos, similar a los de los capacitores.

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

Donde:

V_r : Es el voltaje rms nominal del reactor.

h : Es el orden de la armónica.

$I(h)$: Es la corriente armónica considerada rms a través del reactor.

$X_R(h)$: Es la reactancia inductiva a la armónica considerada.

La capacidad de voltaje de contingencia requerido esta basado en el mismo tipo de cálculo usando la corriente de contingencia en lugar de la corriente continua. El BIL de la bobina a tierra usualmente será igual al BIL del sistema. Si el reactor del filtro esta localizado en el lado del neutro del banco de capacitores del filtro y una terminal del reactor del filtro esta aterrizada el BIL de la terminal aterrizada puede ser reducido.

El BIL de terminal a terminal a través de la bobina usualmente será igual al BIL del sistema ya sea que el reactor del filtro este localizado en el lado de la fuente o en el lado del neutro del banco de capacitores del filtro debido a que la mayoría de las sobretensiones por descarga atmosférica serán a través del reactor del filtro antes que del banco de capacitores del filtro. El BIL de terminal a terminal puede ser reducido si se conecta un apartarrayos a través de las terminales del reactor del filtro, la bobina debe entonces ser coordinada adecuadamente con las características de protección del apartarrayos como lo estipula la *norma IEEE Std C62.22-1997*.

- f) Se debe especificar la corriente de cortocircuito máxima disponible para el reactor del filtro y el tiempo que el reactor del filtro debe aguantar esta corriente. El valor variará dependiendo de la ubicación del reactor del filtro. 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) En la configuración del filtro, se deberán especificar las limitaciones del arreglo del montaje del reactor y el tamaño físico. Deben notarse los siguientes puntos:
- 1.- Para aplicaciones de medio voltaje, 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. El reactor del filtro puede

limitar la corriente de falla disponible para una falla en el banco de capacitores del filtro, si éste se localiza en el lado fuente. 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 disminuirán el nivel de corriente de falla fase a fase o fase a neutro en el banco de capacitores del filtro.

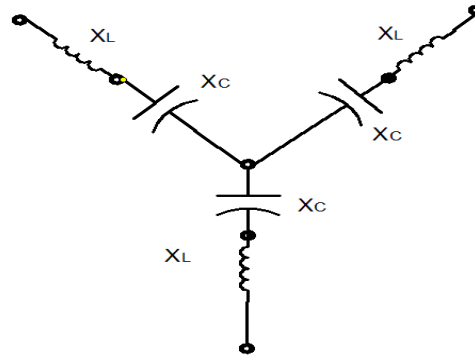


Figura 4.6 - Filtro con reactor de lado de la fuente en estrella con capacitores con neutro flotante

2.- Para aplicaciones de alto voltaje, el filtro de armónicos puede ser conectado en estrella con el reactor del filtro localizado en el lado del neutro. Esta ubicación del reactor puede permitir que reactores pesados sean montados convenientemente en una elevación baja. Para filtros en estrella aterrizada (solo en sistemas efectivamente aterrizados), esta ubicación del reactor del filtro puede también permitir que el BIL del reactor sea menor que el BIL del sistema. Para esta aplicación, debe ubicarse un apartarrayos adecuadamente dimensionado a través del reactor del filtro.

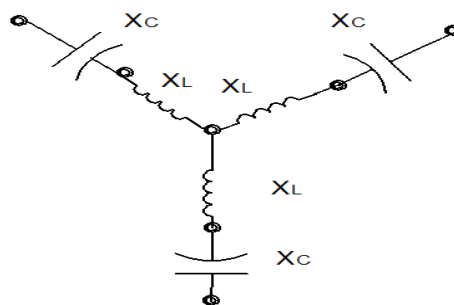


Figura 4.7 - Filtro con capacitor de lado de la fuente en estrella con reactor con neutro flotante

3.- Los reactores con núcleo de aire deben ser montados evitando que el flujo magnético produzca calentamiento excesivo en materiales ferromagnéticos cercanos y/o afectando la sintonía del filtro.

5. DISEÑO DE FILTROS DE ARMÓNICAS

Varios factores influyen en el diseño y ubicación de un filtro de armónicas. El factor principal es la eliminación de corrientes armónicas producidas por cargas no lineales específicas, la corrección del factor de potencia y atenuación de corrientes armónicas de cargas dispersas en una planta. El sobrecalentamiento o mal funcionamiento de los equipos será también un factor en la decisión de la ubicación del filtro.

5.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

El propósito de esta subcláusula es ilustrar el proceso de diseño para filtros de armónicas de una manera sistemática mostrando cómo es usada la información de las subcláusulas previas. No se pretende que el método de simulaciones armónicas y el modelado sea detallado. Otras referencias [e.g ., *IEEE Std 399-1997* (*IEEE Brown Book*)] proveen detalle adecuado para modelar un sistema de potencia y perfeccionar el análisis armónico. En lugar de eso, la subcláusula enfocará la atención en las condiciones para considerar cuando realizar los estudios y cómo los datos son usados para especificar el equipo del filtro armónico.

El diseño del filtro de armónicas requiere información acerca del sistema de potencia y del ambiente en el cual el filtro armónico será instalado. Esta información incluye las características del sistema tales como: voltaje nominal del sistema de fase a fase, el BIL típico del equipo para el nivel de voltaje del sistema y la frecuencia fundamental. Deberán estar disponibles los datos ambientales tales como temperatura ambiente, velocidad del viento, etc. El usuario deberá tomar decisiones, tales como ubicación del equipo (interior contra exterior) y restricciones de operación antes de iniciar el diseño, dado que estas decisiones afectarán ciertos aspectos del diseño. Un claro entendimiento de los requerimientos del ciclo de trabajo actual y la repetición de switcheos son también importantes para el diseño de filtro de armónicas.

El diseño del filtro requiere información básica sobre el sistema de potencia y la generación local de corrientes armónicas. Esta información incluye configuraciones del sistema, impedancias de componentes del sistema (transformadores, líneas, fuentes, capacitores, filtros, reactores en derivación, cargas, etc.), voltajes nominal y máximo, capacidad de carga y factores de potencia. La medición de armónicos en el sitio es el medio más preciso de tomar información armónica si las

cargas están instaladas. Si no, el fabricante del equipo no-lineal deberá suministrar la generación de corrientes armónicas características.

5.2 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD EN KVAR DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

Además del filtrado de corrientes armónicas, el filtro suministrará al sistema potencia reactiva capacitiva que mejorará el factor de potencia y ayudará a mantener el voltaje durante la demanda máxima. Los requerimientos de potencia reactiva capacitiva para controlar el voltaje 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.

Con frecuencia, se usan programas de flujos de potencia para determinar los requerimientos de potencia reactiva capacitiva. Los factores que deberán ser considerados cuando se realicen estos estudios se resumen a continuación:

- a) Número de pasos del filtro que serán switcheados
- b) Rango de variación de voltaje del sistema
- c) Rango de variación de carga
- d) Configuración normal y de contingencia del sistema, existente y planeado.

5.3 SELECCIÓN INICIAL DE LA SINTONÍA DEL FILTRO

Basada en la generación de armónicas, se hace una estimación inicial de la sintonía del filtro. La sintonía normalmente se designa para reducir la distorsión de corriente y voltaje armónico para reunir los criterios de funcionamiento armónico adecuados. Para encontrar este objetivo, el filtro de armónicas típicamente será sintonizado a la frecuencia menor de las armónicas más significativas. Por ejemplo, si los niveles de corrientes armónicas más altos encontrados fueron para la 5ª y 7ª armónica, un solo filtro sintonizado cercano a la 5ª armónica puede ser suficiente para controlar la distorsión. Posteriores evaluaciones con programas de análisis armónico determinarán si se requieren otros filtros.

Los filtros de armónicas normalmente no son sintonizados a una frecuencia armónica exacta, el realizarlo puede tener dos consecuencias indeseables.

- a. La baja impedancia en resonancia (en la frecuencia de sintonía) puede resultar que todas las corrientes armónicas cercanas a esa frecuencia sean absorbidas por el filtro, entonces, el filtro

armónico requerido será más grande y más caro que el necesario para lograr el funcionamiento armónico adecuado.

- b. La interacción del filtro armónico 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 actual a los valores de diseño podría resintonizar el filtro y ubicar la frecuencia de resonancia paralelo muy cercana a la frecuencia armónica. En vez 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 el daño por amplificación de voltajes puede resultar en casos severos. Los cambios en el sistema de suministro pueden también desplazar la resonancia paralelo. Los mecanismos más comunes que causan un desplazamiento en la resonancia son los siguientes:

1. Falla del elemento o unidad capacitadora del filtro: En las unidades capacitadoras de fusibles externos o internos, operan sus fusibles cuando se cortocircuita la unidad capacitadora o elementos capacitivos de la unidad. La operación del fusible reduce la capacitancia total e incrementa la frecuencia de sintonía del filtro. Por otro lado, elementos capacitivos cortocircuitados de unidades capacitadoras sin fusibles (o unidades capacitadoras de fusibles externos donde se cortocircuitan elementos capacitivos y no opera el fusible), se eleva la capacitancia y se reduce la frecuencia de sintonía del filtro.
2. Tolerancias: Las tolerancias de fabricación tanto en los capacitores como en los reactores del filtro y los cambios de impedancia debido a las variaciones de temperatura en los capacitores.
3. Variaciones del sistema: Las configuraciones del sistema no son estáticas:
 - La pérdida de uno de los dos transformadores en paralelo o de uno de los dos alimentadores pueden debilitar la fuente y desplazar la resonancia paralelo a una frecuencia menor.
 - Los mantenimientos de rutina frecuentemente resultan en un debilitamiento de la fuente de suministro de la carga productora de corrientes armónicas.
 - Porciones de circuitos aéreos pueden ser remplazados con líneas subterráneas y las líneas pueden ser reubicadas. Estos cambios modificarán la impedancia entre la fuente y la carga.

A menudo, es ventajoso sintonizar filtros aproximadamente en un rango de 1 a 10% debajo de la frecuencia deseada. Esta sintonía suministrará suficiente filtrado armónico, pero también permitirá

la desintonización del filtro.

Para algunas instalaciones con filtros de armónicas múltiples sintonizados a diferentes frecuencias, sintonizar los filtros de armónicas individuales debajo de la frecuencia armónica puede no ser ventajoso. 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. La resonancia serie suministra una trayectoria de baja impedancia al neutro para la armónicas en el sistema.

Una ecuación simple para calcular la reactancia capacitiva (para un filtro sintonizado a la h armónica) a frecuencia del sistema es:

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

Donde:

$$X_{\text{eff}} = \frac{kV_{LL\text{sys}}^2}{Q_{\text{eff}} \text{ (Mvar)}}$$

Una ecuación simple para calcular la reactancia inductiva a frecuencia del sistema es:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2}$$

Donde:

X_{eff} : Es la reactancia efectiva del filtro

Q_{eff} : Es la potencia reactiva (Mvar) del filtro

$V_{LL\text{sys}}$: Es el voltaje nominal del sistema de fase a fase

X_C : Es la reactancia capacitiva del capacitor del filtro a frecuencia fundamental

X_L : Es la reactancia inductiva del reactor del filtro a frecuencia fundamental

h : Es el 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, la h de las ecuaciones 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.

Un objetivo alternativo en la sintonía de un filtro puede ser evitar los armónicos en vez de reducirlos. Esta alternativa se usa algunas veces, donde los niveles de distorsión no son críticos, pero el usuario quiere evitar sobrecargar los capacitores del filtro con corrientes armónicas y evitar también 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 (4.3ª o 4.7ª) para evitar resonancias con armónicas características (5ª o 7ª).

5.4 OPTIMIZAR 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 voltaje 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 con las normas. Los factores que deberán ser considerados cuando se realicen estos estudios se resumen a continuación.

- a. Número de pasos del filtro que serán switcheados
- b. Salida de un filtro, si existe más de uno
- c. Rango de variación de voltaje del sistema
- d. Rango de variación de la carga
- e. Configuraciones normales y de contingencia del sistema de potencia
- f. 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
- g. Armónicas características y no características
- h. Armónicas presentes en el sistema.

Si los niveles de distorsión son aún demasiado altos, puede ser debido a que al agregar el filtro ha causado una nueva resonancia paralela con el sistema cercana a una de las frecuencias armónicas bajas. En este caso, en algunas ocasiones será adecuado resintonizar el filtro a una frecuencia armónica menor. Si esto no es posible, entonces es necesario instalar varios filtros.

El banda de sintonización puede incrementarse de acuerdo a las desviaciones de capacitancia e inductancia aumentando la capacidad del filtro.

El análisis armónico puede determinar la frecuencia de sintonía o frecuencias y valores de la capacitancia, inductancia y resistencia (si fuera necesaria). Puede también establecer las tolerancias permisibles de la capacitancia, inductancia y resistencia, la Q del reactor del filtro a la frecuencia de sintonía y los requerimientos de disipación de energía en estado estable para determinar la resistencia del filtro. El resultado del análisis será el espectro armónico de voltaje y corriente a través de cada elemento del filtro (capacitor, reactor). Un espectro armónico típico incluye la frecuencia fundamental y todas las frecuencias armónicas significativas.

Nota: Para determinar el factor de calidad de filtros sintonizados a una sola frecuencia se usa la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{X}{R}$$

El rango de valores de Q para filtros sintonizados a una sola frecuencia es de 20 – 50.

Y cuando se desea conocer el factor de calidad de filtros paso altas se usa la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{R}{X}$$

Esto se debe a que para frecuencias altas la reactancia inductiva es alta y la reactancia capacitiva es baja, resultando una impedancia aproximadamente igual a la resistencia. El rango de Q esta aproximadamente para filtros paso alta entre 0.5 – 5.

5.5 DETERMINAR LA CAPACIDAD DE LOS COMPONENTES

Una vez que el desempeño del filtro ha sido optimizado, se determinan las características de los componentes. El proceso es algunas veces interactivo, requiriendo ajustes en el diseño del filtro si los componentes estándar no pueden reunir los requisitos.

Las características del capacitor del filtro usualmente es lo primero que se determina, siguiendo

sucesivamente con el reactor, la resistencia y el interruptor. El cumplimiento armónico usado en el proceso de evaluación deberán ser los valores más altos determinados en el punto 5.4.

Las simulaciones transitorias también pueden ser provechosas para determinar las características de los componentes para algunos diseños de filtros de armónicas, particularmente, en donde se conectarán filtros sintonizados a diferentes frecuencias en el mismo bus, también se evalúa el efecto de la energización de un transformador.

5.5.1 LOS CAPACITORES DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

Los capacitores son dimensionados por el voltaje y la potencia reactiva. Estas características son normalmente determinadas por el fabricante basados en el espectro armónico, sobrevoltajes transitorios, requerimientos de potencia reactiva y datos del sistema especificados por el usuario.

La capacidad de voltaje del capacitor se determina en base al mayor de los tres tipos de estrés de voltaje: estado estable (incluyendo armónicas), transitorio (durante menos de medio ciclo) y dinámico (durante varios segundos). Los sobrevoltajes transitorios están asociados con el switcheo de filtros y algunas veces con operaciones de los interruptores, no son usualmente severos, a menos que múltiples filtros con diferentes frecuencias de resonancias sean conectados en el mismo bus. En general, los sobrevoltajes dinámicos pueden evitarse si no energizan transformadores y capacitores simultáneamente.

En la mayoría de las aplicaciones de filtros con sintonización sencilla, el voltaje del capacitor se basa en condiciones de estado estable. El voltaje de fase a neutro para el capacitor de un filtro se calcula usando la siguiente ecuación:

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

El voltaje de capacitor debería ser especificado de tal manera que el voltaje pico máximo aplicado a los capacitores del filtro (fundamental más armónicas) no sea mayor que el 100% del voltaje pico nominal de los capacitores, puede hacerse una excepción para contingencias infrecuentes. El voltaje del capacitor del filtro de este cálculo, siempre será mayor al voltaje máximo de bus, incluyendo la elevación de voltaje debido al reactor del filtro. El voltaje a través del capacitor debe ser calculado para el peor caso, y el peor caso, generalmente es un caso de contingencia en vez de una condición operación normal. En ausencia de un programa de cálculo digital, una estimación razonable del voltaje de fase a neutro puede obtenerse sumando el voltaje a frecuencia fundamental con el

voltaje a la frecuencia de sintonía del filtro usando las siguientes fórmulas.

$$V_c(1) = I_f(1) X_c$$

$$V_c(h) = I_f(h) \frac{X_c}{h}$$

$$V_r = V_c(1) + V_c(h)$$

Donde:

$V_c(h)$: Es el voltaje a través de capacitor causado por la corriente armónica

$I_f(h)$: Es la corriente armónica

$V_c(1)$: Es el voltaje a frecuencia fundamental a través del capacitor

$I_f(1)$: Es la corriente a frecuencia fundamental a través del capacitor

X_c : Es la reactancia capacitiva a frecuencia fundamental

Las aproximaciones de estas ecuaciones están basadas en el hecho de que en la mayoría de las aplicaciones, el voltaje del capacitor es dominado por la fundamental y la frecuencia armónica más cercana a la frecuencia de resonancia o sintonía del filtro.

La corriente a frecuencia fundamental $I_f(1)$ puede calcularse por la ecuación siguiente:

$$I_f(1) = \frac{V_s}{(X_c - X_L)}$$

Donde:

V_s : Es el voltaje del bus donde esta conectado el filtro.

X_c : Es la reactancia capacitiva a frecuencia fundamental.

X_L : Es la reactancia inductiva a frecuencia fundamental.

La corriente a frecuencia de sintonía se asume $I_f(h) = \text{corriente armónica máxima disponible en el sistema a frecuencia de resonancia del filtro, por ejemplo } 5^{\text{a}} \text{ armónica.}$

La corriente a frecuencia fundamental fluyendo en el capacitor del filtro puede ser calculada fácilmente de la ecuación anterior. Las corrientes armónicas son una parte de los criterios de diseño del filtro.

La corriente rms total en el filtro se calcula por:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_1^{\infty} I(h)^2}$$

La corriente rms total a través de las unidades capacitivas del filtro deberá ser menor que 135% de la corriente nominal de la unidad capacitiva basada en los kvar y voltaje nominal. Además, la corriente deberá mantenerse dentro de la capacidad de los fusibles que protegen a la unidad capacitiva. En realidad, la corriente es rara vez un factor limitante cuando las armónicas involucradas son de bajo orden. Es difícil exceder los límites de corriente sin exceder los otros límites a menos que el orden de la armónica sea alto.

La revisión final del diseño del filtro es verificar que la temperatura del dieléctrico del capacitor sea aceptable. La temperatura de dieléctrico es evaluada por la siguiente desigualdad:

$$\left| \sum_h (V(h)I(h)) \right| \leq |1.35Q_{\text{rated}}|$$

Donde:

V(h) : Es la caída de voltaje a través del capacitor a la h armónica.

I(h) : Es la corriente fluyendo a través del capacitor a la h armónica.

h : Es todas las armónicas (incluyendo la fundamental (h = 1)).

Q_{rated} : Es la capacidad en kvar del banco, basada en los datos de placa.

Es importante notar que los kvar nominales del banco del filtro no es la misma que la potencia reactiva efectiva del filtro debido al efecto del reactor.

Para el funcionamiento continuo, es muy deseable construir un filtro de armónicas con más capacidad de la requerida por las cargas generadoras de armónicas. Dado que otras armónicas serán atraídas del sistema y esto puede conducir a un sobrecalentamiento. Deben permitirse algunos sobredimensionamientos para evitar estos sobrecalentamientos. Por lo tanto, es deseable un margen generoso en la especificación del funcionamiento armónico.

5.5.2 EL REACTOR DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

En punto 5.4 del proceso de diseño, el análisis armónico determinó la frecuencia de sintonía, la

inductancia, la Q (factor de calidad) y el grado aceptable de las tolerancias en la inductancia y los valores de Q para el reactor del filtro.

También se determinó los espectros de corriente armónica y fundamental para condiciones normales y de contingencia. Esto implica lo siguiente:

- a. Determine la ubicación del reactor del filtro, física y eléctricamente con respecto al capacitor.

La localización del reactor tiene influencia en cuestiones térmicas, calentamiento del flujo magnético, la capacidad de cortocircuito y el BIL del reactor. El calentamiento debido a las corrientes armónicas y fundamental en el reactor con núcleo de acero deberá ser considerado en el diseño de filtros encapsulados, un calentamiento excesivo puede conducir a la degradación del componente.

Debe considerarse el efecto de las pérdidas por corrientes de Eddy debido al flujo magnético inducido en las estructuras metálicas circundantes en reactores con núcleo de aire. El efecto de calentamiento en el acero estructural de la construcción, el acero embebido en el concreto, el sistema de tierras y el armazón del equipo puede ser considerable.

El reactor del filtro puede estar en el lado de la fuente o en el lado del neutro con respecto al capacitor. Si el reactor está localizado entre el bus y el capacitor, este deberá ser capaz de aguantar un cortocircuito a tierra en la unión entre el reactor y el capacitor.

El BIL del aislamiento de fase a tierra del reactor debe ser similar a la capacidad de los transformadores de potencia conectados en el mismo nivel de voltaje. Sin embargo, puede ser apropiada una reducción en el BIL para la terminal del reactor que se conecta a tierra (filtros sólidamente aterrizados). El aislamiento a través de la bobina puede ser diferente del aislamiento de fase a tierra. Esto es diseñado para la caída de voltaje y transitorios a través de la bobina. El BIL de la bobina puede ser reducido si la bobina es protegida por un apartarrayos conectado entre terminales.

- b. La evaluación de sobrevoltajes transitorios y dinámicos si es necesaria. Como se discutió con los capacitores, el switcheo de múltiples filtros de armónicas y el switcheo frecuente de transformadores puede producir estrés excesivo en el capacitor y reactor del filtro, a menos que este estrés haya sido considerado en el diseño. Los estudios de transitorios

pueden ser necesarios para determinar la magnitud y duración de los sobrevoltajes, también para determinar la protección adecuada por apartarrayos para reducir el BIL en el diseño.

- c. Calcular la capacidad de corriente de cortocircuito para el reactor. La corriente de cortocircuito deberá ser calculada en base al voltaje de operación máximo del sistema. Son necesarias tanto la corriente de falla rms simétrica como la asimétrica. También son necesarias la duración de la falla debido al retraso del disparo y el tiempo de interrupción del interruptor.

5.5.3 LA RESISTENCIA DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

Si se incluye resistencia en el filtro de armónicas, en el punto 5.4. del proceso de diseño será necesario definir la resistencia, la tolerancia de la resistencia aceptable, la inductancia en serie máxima permisible en la resistencia y la capacidad de la misma. También se determinará el espectro de frecuencias fundamental y armónico para condiciones normales y de contingencia.

El proceso de diseño consiste en lo siguiente:

- a) Determine la ubicación tanto física como eléctricamente de la resistencia del filtro con respecto al capacitor. La posición de la resistencia en el circuito afecta cuestiones térmicas, la capacidad de cortocircuito y el BIL.

El calentamiento debido a las corrientes fundamentales y armónicas de la resistencia deberá considerarse en el diseño de filtros ubicados en tableros. El calentamiento excesivo puede llevar a la degradación de un componente.

En un filtro amortiguado, la ubicación de la resistencia es muy variable dependiendo del diseño. La resistencia del filtro deberá ser capaz de aguantar la corriente de cortocircuito máxima pueda fluir a través de esta durante una falla en el filtro.

El BIL requerido puede también ser afectado por la posición de la resistencia en el filtro, así como al reactor.

- b) Es necesario evaluar los sobrevoltajes transitorios y dinámicos, así como con el reactor del filtro, los estudios de transitorios pueden ser necesarios para determinar la magnitud y duración de los sobrevoltajes y seleccionar adecuadamente el apartarrayos, especialmente si se redujeron los BIL's. Los estudios de transitorios también determinan la energía de la resistencia asociada con

sobrevoltajes transitorios y dinámicos.

c) Cálculo de la capacidad de cortocircuito de la resistencia. El cortocircuito deberá ser calculado en base al máximo voltaje de operación del sistema. Son necesarios tanto la corriente de falla simétrica como la asimétrica. La duración de la falla debido al retraso del disparo y el tiempo de interrupción de interruptor también se requieren.

5.5.4 EL INTERRUPTOR DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

Para la especificación del interruptor se determina su capacidad de corriente RMS continua a partir del espectro de corriente armónico y la capacidad máxima de la corriente de cortocircuito se calcula en base a datos del sistema. La corriente de cortocircuito para el dispositivo de switcheo es esencialmente la corriente de falla en el bus y no es la misma que la corriente de cortocircuito para la especificación del reactor. Aunque el interruptor de un capacitor no es requerido para interrumpir corrientes de cortocircuito, el interruptor del un capacitor debe poder manejar la corriente de cortocircuito que fluyan a través de este.

Los requerimiento de switcheo de corriente capacitiva debe basarse en la peor combinación de máximo voltaje del sistema, tolerancias de capacitancia y armónicas. Los transformadores de corriente y relevadores deben estar habilitados para funcionar adecuadamente en presencia de armónicas.

El filtro desarrolla mayores voltajes de recuperación a través del interruptor que un banco de capacitores en paralelo. Estos altos voltajes de recuperación son especialmente ciertos en filtros de 2ª y 3ª armónica en los cuales el voltaje de corriente directa que fluye de los capacitores del filtro en la interrupción son del orden de 133% (2ª armónica) y 112% (3ª armónica) del voltaje nominal de fase a neutro del sistema. El fabricante del interruptor deberá conocer del estrés adicional del voltaje de recuperación.

También se debe de tomar en cuenta el tipo de servicio al cual será destinado (servicio ligero, servicio normal, servicio pesado), así como también el tipo de gabinete cuyas características de operación y manejo son especificadas por la NEMA

5.5.5 CONDUCTORES

La capacidad de conducción de corriente de los conductores del circuito del filtro de armónicos no debe ser menor de 135% de la corriente eléctrica nominal del capacitor. La capacidad de

conducción de corriente de los conductores que conectan a un filtro de armónicos a las terminales de un motor o a los conductores de circuito del motor, no debe ser menor que $1/3$ de la capacidad de conducción de corriente de los conductores del circuito del motor y nunca menor a 135% de la corriente eléctrica nominal del capacitor del filtro de armónicos.

5.5.6 APARTARRAYOS

Las características de los apartarrayos se seleccionan de acuerdo a las condiciones específicas de cada sistema como son:

- Tensión Nominal que depende del grado de aterrizamiento del sistema, relacionada con la coordinación del aislamiento en los equipos por proteger.
- Corriente de descarga, es la corriente que circula a través del apartarrayos cuando este está operando, y a su vez debe coordinarse con el aislamiento de los transformadores o cables de potencia.
- Distancia máxima a los equipos que protegen dentro de un margen de protección que puede variar desde 20% para impulsos por maniobras hasta 35% para descargas atmosféricas, se debe acostumbrar a escoger en términos generales un valor promedio de 25%.
- Tensión de operación de los apartarrayos la cual debe soportar la operación de los interruptores.
- Sobretensión máxima generada por la maniobra de los interruptores.
- Nivel de aislamiento que va a soportar, por maniobra de interruptor, al equipo que va a proteger según las normas ANSI debe tener un valor 0.83 del nivel básico de impulso del aislamiento protegido.

5.5.7 CUCHILLAS DE PUESTA A TIERRA Y BLOQUEOS

Para la selección de las cuchillas de puesta a tierra se deben tomar en cuenta:

- Nivel de aislamiento básico.
- Corriente nominal y de cortocircuito.
- Tensión de operación del filtro de armónicos.
- Unipolares o tripolares

5.5.8 FUSIBLES PARA EL FILTRO DE ARMÓNICAS

Para la selección adecuada y correcta de fusibles se deben tomar en cuenta las siguientes características:

- Tipo de carga a proteger.

- Tensión nominal de operación.
- Corriente nominal del equipo.
- Corriente de cortocircuito.
- Curvas características de los fusibles (curvas tiempo-corriente, curvas de corriente pico permisibles, curvas de energía de fusión I^2t).
- Condiciones ambientales.

5.5.9 TRANSITORIOS POR SWITCHEO

En el switcheo de filtros back to back se presentan magnitudes de corriente y frecuencias mucho menores que en los bancos de capacitores en paralelo debido a los reactores de sintonía de los filtros. Por lo tanto, no se requieren reactores limitadores de corriente adicionales.

Los filtros armónicos con varias piernas pueden requerir ser estudiados en el desempeño transitorio para asegurar que no hay corrientes y voltajes extraordinariamente altas durante la energización. El reencendido durante la desenergización de un filtro puede resultar en sobrevoltajes particularmente altos a través del capacitor y el reactor. Podría requerirse un análisis transitorio para determinar las sobretensiones por switcheo.

Si el filtro queda conectado al sistema cuando ocurre una interrupción y al restablecerse la potencia las armónicas generadas por la saturación del transformador pueden llevar una sobrecarga de tiempo corto al filtro. Si el filtro no va a ser removido automáticamente durante la salida del sistema, entonces, probablemente es deseable hacer un estudio transitorio para determinar el desempeño armónico durante este evento. Similarmente con fallas cercanas que no causen interrupción del sistema, pero que causen un sobrevoltaje, puede resultar alguna saturación del transformador y un incremento temporal en la carga del filtro.

Los transitorios impuestos al filtro necesitan ser especificados de manera que los componentes del filtro puedan ser seleccionados adecuadamente. Los sobrevoltajes causados por el transformador son frecuentemente llamados sobrevoltajes dinámicos. Un núcleo de transformador saturado genera corrientes armónicas de bajo orden ($2^a, 3^a, 4^a$ y 5^a), las cuales pueden sobrecargar los filtros sintonizados a las mismas bajas frecuencias. La fuente más común de saturación armónica asociada a la energización de un transformador es la corriente de inrush. Si el filtro está rutinariamente sujeto a altas corrientes armónicas de inrush por switcheo regular de grandes transformadores, esto debe notificarse para que sea incluido en las especificaciones.

Los transitorios no son fácilmente definibles debido a la aleatoriedad de las ocurrencias y a la decadencia que ocurre en un período de tiempo. Frecuentemente es recomendable suministrar al diseñador con datos de un estudio de transitorios que da la carga armónica del peor caso esperado durante este tipo de transitorio junto con una identificación de las magnitudes de corriente por orden armónico al inicio o la peor parte del transitorio. Generalmente, así, para propósito de diseño es recomendable suministrar la magnitud de corriente a través de cada pierna del filtro por orden de armónica, continuamente y como una función del tiempo, para el peor caso del diseño base.

5.6 EJEMPLO NUMÉRICO

5.6.1 FILTRO DE ARMÓNICAS PARA BAJA TENSIÓN

El siguiente sistema tiene un convertidor de 6 pulsos con una capacidad de 500 [KVA] a 440 [V], con un factor de potencia de 85% el cual genera corrientes de 5ª Armónica, este convertidor es alimentado por un transformador de 1500 KVA y $Z = 5\%$. La capacidad de cortocircuito en el sistema es de 285 [MVA]. Existe otra carga la cual es pasiva con un factor de potencia de 100%. Se desea elevar el factor de potencia de 85% a 95% y disminuir la magnitud de corriente armónica. La corriente medida en el punto de acoplamiento común es; $I_L = 1461[A]$.

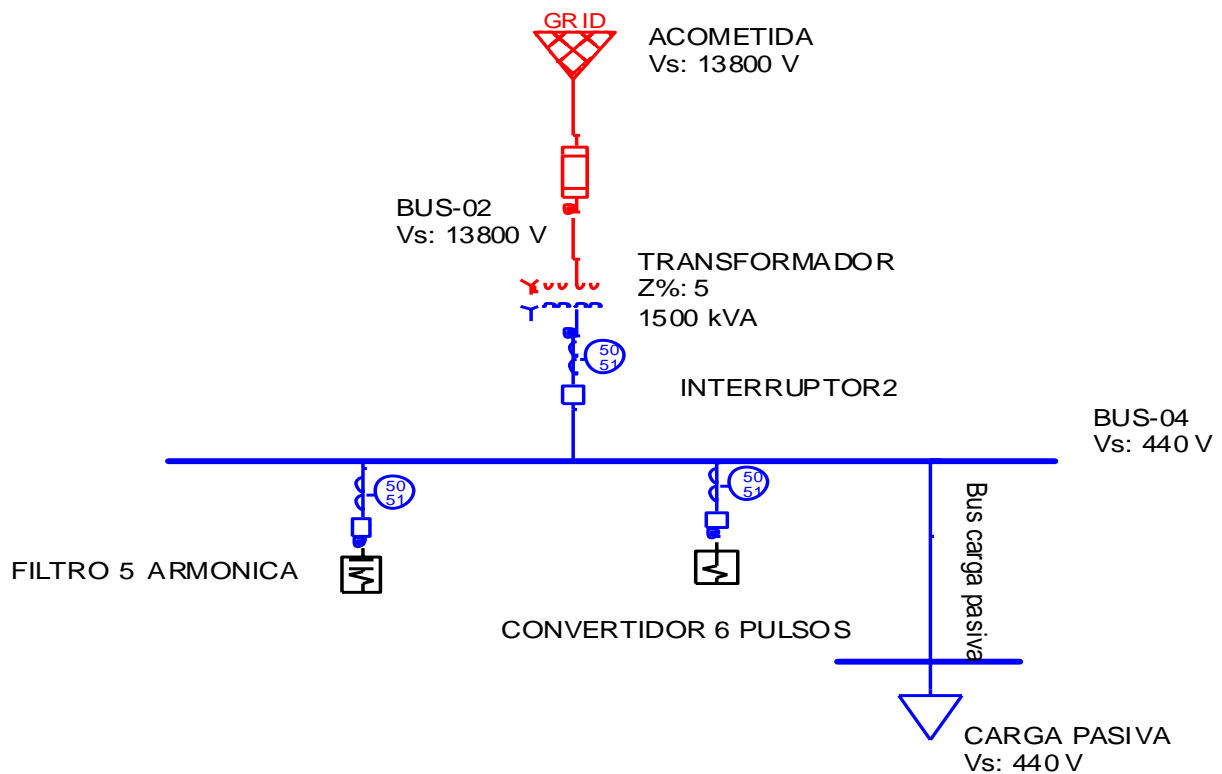


Figura 5.1 - Diagrama unifilar del sistema a estudiar

El convertidor de 6 pulsos tiene el siguiente espectro de corrientes:

Armónicas	Distorsión Individual %I _h	Ángulo
1	100	0°
3	1	11°
5	28.83	-169°
7	8.76	-163°
11	6.73	55°
13	3.75	164°
19	2.74	73°
25	1.17	51°
29	0.7	-31.99°
%THD	31.27%	

Tabla 6 – Espectro de corrientes armónicas del convertidor de 6 pulsos

5.6.2 FORMA DE ONDA DEL CONVERTIDOR DE 6 PULSOS

En base al espectro de corrientes armónicas, la potencia y el factor de potencia se simula la forma de onda del convertidor de 6 pulsos.

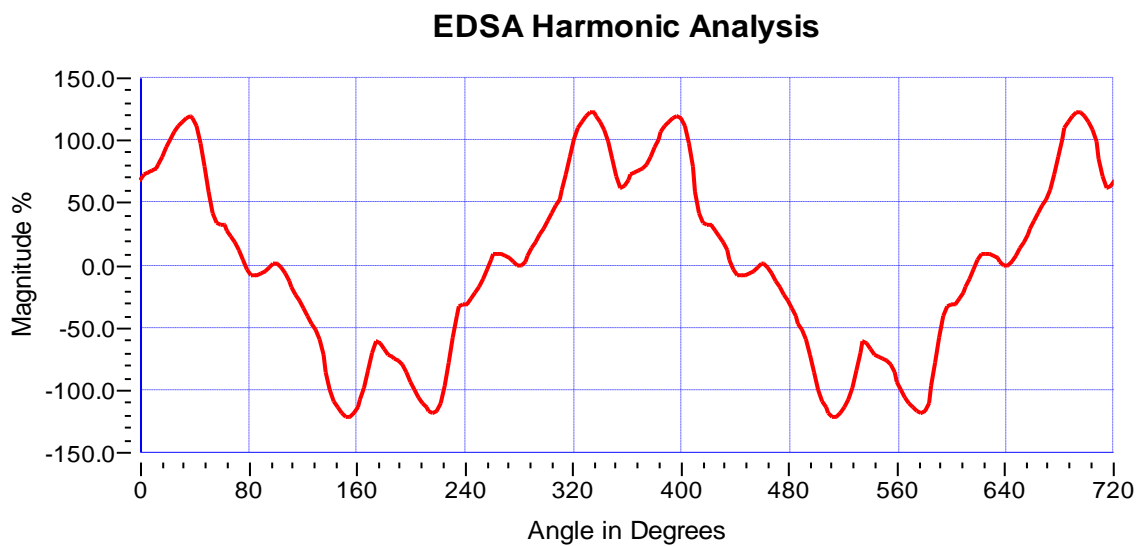


Figura 5.2 – Forma de onda distorsionada del convertidor de 6 pulsos

5.6.3 SEÑAL EN EL ESPACIO DE LA FRECUENCIA

En este gráfico se observan las magnitudes de las corrientes armónicas

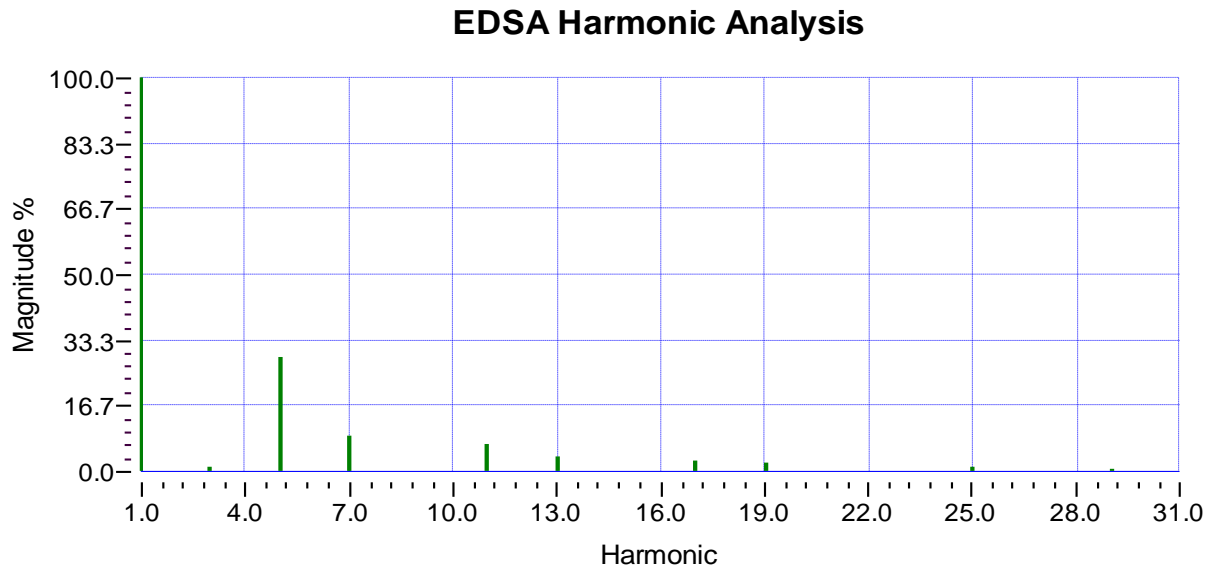


Figura 5.3 – Análisis armónico en el espacio de las frecuencias

5.6.4 VERIFICACIÓN DE LÍMITES BASADOS EN LA NORMA IEEE-519-1992

- Una vez tomado un punto de acoplamiento común (PAC) se revisan los límites a los que se debe de trabajar con la ayuda de la norma *IEEE-519*.
- Se calcula la corriente de cortocircuito en el PAC; I_{sc} , esta depende del tamaño del transformador de su impedancia y del voltaje de servicio.

$$I_{sc} = \frac{\text{Corriente Nominal del transformador}}{\text{Impedancia del transformador}}$$

$$I_{sc} = \frac{1500\text{KVA}}{\frac{440 * \sqrt{3}}{0.05}}$$

$$I_{sc} = 39,364.8[A]$$

- Se toma lectura de la máxima corriente demandada en la carga a frecuencia fundamental; I_L se sugiere que esta medición se haga por un período de tiempo, como un mes para tener el valor mas real posible.

En nuestro caso fue de; $I_L = 1461[A]$

- Se calcula la impedancia relativa que es el cociente de la corriente de cortocircuito y la corriente de carga. (I_{SC}/I_L).

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = 26.9$$

- Utilizando la tabla 10.3 de la norma *IEEE-519* tenemos que para la impedancia relativa de 27 la distorsión armónica total (THD), debe de ser 8% y en nuestro caso tenemos 31%, al igual que para armónicas de 5^{ta}, 7^{ta}, la norma indica 7% teniendo 28.83% y 8.76% respectivamente. Para armónicas de 11^{va}, 13^{va}, la norma indica 3.5% teniendo en nuestro sistema, 6.73% y 3.75%. Para armónicas de 17^{va}, 19^{va}, la norma indica 2.5% teniendo en nuestro sistema 2.74% y 2.12% respectivamente. Prácticamente en todos los casos los valores están fuera de norma por lo que es necesario reducción el contenido armónico con un filtro.

5.6.5 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

La capacidad del banco de capacitores del filtro se calcula en base a la cantidad de compensación capacitiva necesaria para elevar el factor de potencia de 0.85 a 0.95. La norma *IEEE Std 1036-1992* indica los factores de multiplicación que se aplican a la potencia real y calcular la compensación de potencia reactiva para circuitos simples como el que esta siendo considerado. La potencia real puede ser calculada de la potencia aparente multiplicada por el factor de potencia no compensado.

$$Q_{Ef} \text{ [KVAR]} = \text{Factor de multiplicación} * \text{Potencia en KW}$$

$$Q_{Ef} \text{ [KVAR]} = (0.291)(500\text{KVA})(0.85)$$

$$Q_{Ef} \text{ [KVAR]} = 123.675 \text{ [KVAR]}$$

La carga necesitará un banco de capacitores de 123.675 [KVAR] para elevar el factor de potencia a 0.95.

5.6.6 SINTONÍA DEL FILTRO

El filtro típicamente será sintonizado a la frecuencia más baja de las armónicas más significativas. Los filtros de armónicas frecuentemente son sintonizados a una frecuencia aproximadamente de 1.0 a 15% debajo de la frecuencia armónica seleccionada. Por ejemplo, este filtro de 5^a armónica será

sintonizado alrededor de 6.0% debajo de 300 Hz. Este valor es 4.7 veces la frecuencia fundamental en un sistema de 60 Hz, que es 282 Hz.

Usando la ecuación siguiente, la impedancia efectiva del banco del filtro es:

$$X_{Ef} = \frac{V^2_{LLsys} \text{ (kV)}}{Q_{Ef} \text{ (Mvar)}} = \frac{(0.440 \text{ kV})^2}{0.123675 \text{ Mvar}} = 1.5654 \ \Omega$$

Para calcular la reactancia capacitiva de utilizará la siguiente ecuación:

$$X_C = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) X_{Ef} \ \Omega$$

$$X_C = \frac{4.7^2}{4.7^2 - 1} \times 1.5654 = 1.6346 \ \Omega$$

$$X_C = 1.6346 \ \Omega \quad C = 1.6227 \ \text{mF}$$

Para calcular la reactancia inductiva se utilizará la siguiente ecuación:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \ \Omega$$

$$X_L = \frac{1.6346}{4.7^2}$$

$$X_L = 0.07422 \ \Omega \quad L = 0.19687 \ \text{mH}$$

Cálculo de la reactancia inductiva y la capacitiva del filtro.

$$X_{c4.7} = \frac{1}{2 * \pi * f_{4.7} * C}$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f_{4.7} * X_{c4.7}}$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * (60 * 4.7) * 1.6346}$$

$$C = 345.27 [\mu F] \text{ a } 4.7 \text{ pu's}$$

$$X_{L4.7} = X_{C4.7}$$

$$W(4.7) * L = \frac{1}{W(4.7) * C}$$

$$L = \frac{1}{W(4.7) * W(4.7) * C}$$

$$L = \frac{1}{(2 * \pi * 60 * 4.7) * (2 * \pi * 60 * 4.7) * C}$$

$$L = 0.922535 [mH] \text{ a } 4.7 \text{ pu's}$$

Para calcular la resistencia del reactor se encuentra así:

$$R = \frac{X_n}{Q}$$

Donde Q es la calidad del filtro y toma valores de $20 < Q < 50$.

La reactancia característica es dada por;

$$X_n = X_{Ln} = \sqrt{X_L X_C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$X_n = \sqrt{(0.07422)(1.6346)}$$

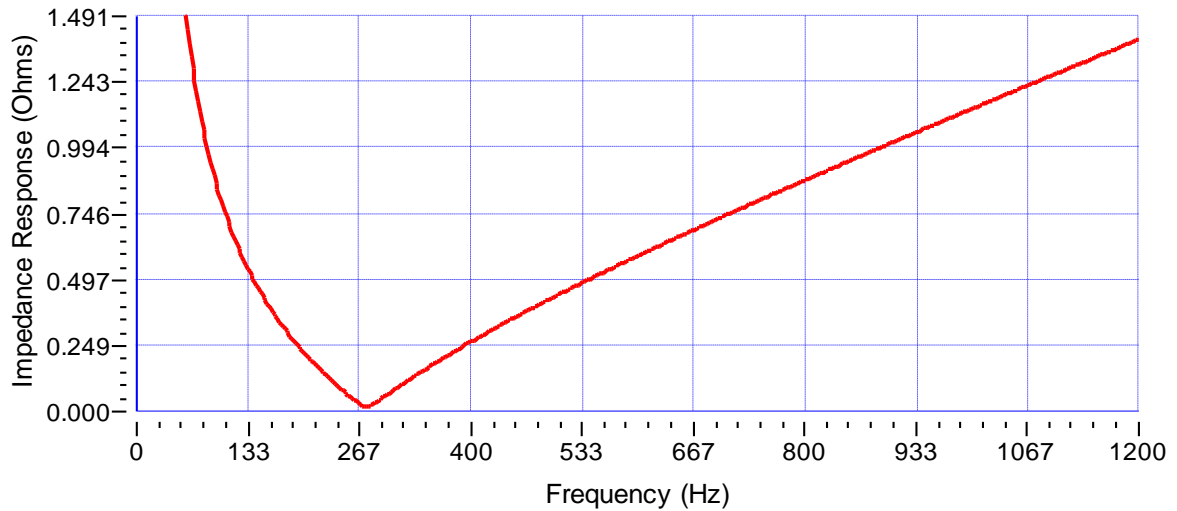
$$X_n = 0.34831 \Omega$$

Utilizando una Q de 20 el reactor debe tener una resistencia de:

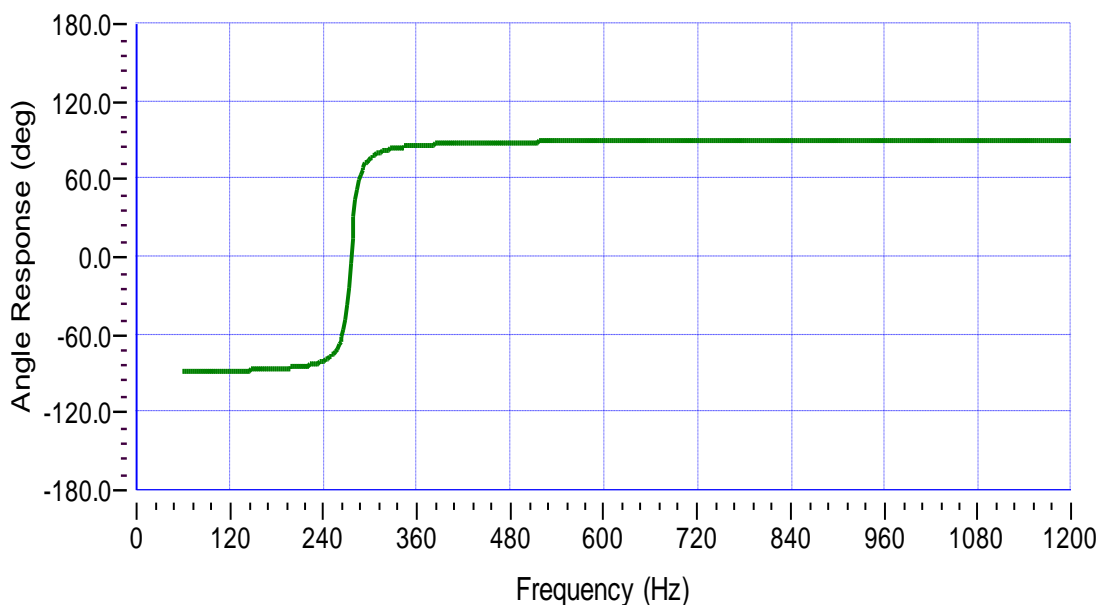
$$R = 0.017415 \Omega$$

5.7 SIMULACIÓN DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

Con los valores calculados se simula el filtro para comprobar funcione correctamente.

EDSA Harmonic Analysis**Figura 5.4** – *Curva de impedancia contra frecuencia*

En el gráfico observamos la impedancia contra la frecuencia, se ve como la impedancia es alta para frecuencias diferentes a la 5ª, ya que para esta armónica la impedancia es prácticamente cero. Para la 4.7ª (282 [Hz]), la impedancia es de 0.00105 [Ω], que es la frecuencia de sintonización del filtro. El siguiente gráfico muestra la respuesta angular del filtro.

EDSA Harmonic Analysis**Figura 5.5** – *Curva de respuesta angular del filtro*

5.8 OPTIMIZACIÓN DEL FILTRO

Una vez que la inductancia y capacitancia del filtro han sido determinadas, puede realizarse un análisis armónico para determinar si el diseño controla adecuadamente los armónicos y mantenerlos dentro de los límites. Las normas *IEEE Std 519-1992* y *IEEE Std 399-1997* suministran guías para realizar los estudios requeridos. Si los niveles de distorsión no son los adecuados, se modifica la sintonía del filtro para diferentes factores de calidad (Q) e inclusive para diferentes paso banda $PB=W_0/Q_0$ pueden ser requeridos múltiples filtros de armónicas con diferentes frecuencias de sintonía.

Rango de valores típicos de Q: $(20 \leq Q \leq 50)$.

5.8.1 DETERMINAR LA CAPACIDAD DE LOS COMPONENTES DEL FILTRO

Para la selección de los componentes de un filtro, se estiman o se miden las corrientes armónicas y se realiza un análisis armónico del sistema eléctrico donde el filtro será aplicado.

5.8.1.1 BANCO DE CAPACITORES

La capacidad de voltaje de los capacitores se calcula de la siguiente manera:

$$V_R = \sum_{h=1}^{\infty} I(h)X_c(h)$$

Se calcula para el peor caso que es en el que el espectro de armónica es más alto. Todas las armónicas significativas serán incluidas en el cálculo del voltaje de operación de los capacitores. La corriente a frecuencia fundamental para un filtro conectado en estrella se calcula de la siguiente manera:

$$I_f(1) = \frac{V_S}{(X_C - X_L)}$$

$$I_f(1) = \frac{\left(\frac{440 \text{ V}}{\sqrt{3}} \right)}{(1.6346 - 0.07422)} = 162.8 \text{ A}$$

Donde:

V_s : Es el voltaje de operación máximo del sistema, de fase a neutro.

X_c : Es la reactancia capacitiva a frecuencia fundamental

X_L : Es la reactancia inductiva a frecuencia fundamental

5.8.1.2 CORRIENTES ARMÓNICAS QUE FLUYEN POR EL FILTRO

Como tenemos un convertidor de 6 pulsos trifásico, generará 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, y demás. Sus magnitudes máximas serán de $I_5=I_1/5$, $I_7=I_1/7$, $I_{11}=I_1/11$, $I_{13}=I_1/13$. Es decir $H=KP \pm 1$; $I_h=I_1/h$.

Donde: H =orden de la armónica, $K=1,2,3,\dots$; P = Núm. de pulsos; I_1 = corriente fundamental a 60 Hz.

Se modela el sistema eléctrico y se realiza el análisis armónico para determinar que armónicas (orden y magnitud) fluyen al sistema, a las cargas y al filtro. El peor caso para el diseño del filtro es despreciando la carga y cuando se tiene una alta impedancia de la fuente (baja corriente de cortocircuito trifásica), así casi toda la corriente armónica generada fluirá hacia el filtro

En nuestro caso las corrientes armónicas que fluyen hacia el filtro son:

$I_{F1}=1^a$ armónica = 162.8 A

$I_{F5}=5^a$ armónica = 32.56 A

$I_{F7}=7^a$ armónica = 23.26 A

$I_{F11}=11^a$ armónica = 14.8 A

$I_{F13}=13^a$ armónica = 12.52 A

Estos serán los valores máximos de corrientes que fluirán al filtro.

Con estos valores calculamos la corriente rms del filtro.

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2} \text{ [A]}$$

$$I_{rms} = \sqrt{162.8^2 + 32.56^2 + 23.26^2 + 14.8^2 + 12.52^2} \text{ [A]}$$

$$I_{rms} = 168.763 \text{ [A]}; \text{ Esta es la corriente rms del filtro}$$

Cálculo del voltaje del banco de capacitores.

$$V(1)_C = I(1)_F * X_C$$

$$V(1)_C = 162.8 * 1.6346$$

$$V(1)_C = \mathbf{266.113 V};$$
 Este es el valor de voltaje para la primera armónica.

Para obtener el valor total aplicamos la siguiente expresión.

$$V(h)_C = V_5 + V_7 + V_{11} + V_{13}$$

$$V(h)_C = \sum \frac{I_f(h)}{h} \left(\frac{X_C}{h} \right) V$$

$$V_5 = I_5 * \frac{X_C}{h} [V] = 32.56 * \frac{1.6346}{5} = 10.645[V]$$

$$V_7 = 23.26 * \frac{1.6346}{7} = 5.432[V]$$

$$V_{11} = 14.8 * \frac{1.6346}{11} = 2.199[V]$$

$$V_{13} = 12.52 * \frac{1.6346}{13} = 1.574[V]$$

Sumando los voltajes armónicos tenemos:

$$V(h)_C = 10.645_5 + 5.432_7 + 2.199_{11} + 1.574_{13}$$

$$V(h)_C = 19.85[V]$$

Sumando el voltaje fundamental y voltajes armónicos tenemos el valor del voltaje aplicado al banco de capacitores V_r .

$$V_r = [V(1)_C + V(h)_C][V]$$

$$V_r = [266.113 + 19.85][V]$$

$$V_r = \mathbf{285.963[V]}$$

El valor de 285.963 V es el valor de fase a neutro el valor trifásico será;

$$V_{3r} = \sqrt{3} * 285.963 = 495.302[V]$$

El voltaje aplicado al banco de capacitores del filtro es mayor que el nominal del sistema, debido al reactor de sintonía y los voltajes armónicos resultantes de las corrientes armónicas. Se deben elegir unidades capacitivas que operen a 495 V en condiciones normales de operación o realizar el arreglo del banco de capacitores, por ejemplo, dos grupos serie que aguanten los 495 V. Aunque la norma *IEEE Std 1036-1992* permite la operación continua del capacitor a un voltaje de 110% arriba del voltaje nominal y 120% arriba del voltaje pico nominal, estos márgenes deberán ser reservados para operación en contingencia o si las unidades capacitivas son diseñadas de acuerdo a la norma *IEC 60871-1,2* éstas unidades no pueden operar de manera continua con algún sobrevoltaje. Consecuentemente, en el diseño del filtro el voltaje del banco de capacitores debe especificarse para la condición de operación más severa, en éste caso será: 495 volts mas un voltaje adicional por corrientes armónicas futuras.

5.8.1.3 MÉTODO DE SOBREDIMENSIONAMIENTO DEL BANCO DE CAPACITORES

Basados en el voltaje entre fases y la impedancia del banco de capacitores, la capacidad trifásica del banco de capacitores es:

$$Q_{\text{Nominal}} = \frac{(\sqrt{3}V_r)^2}{X_c}$$

Donde:

Q_{Nominal} : Es la capacidad en MVAR trifásica del banco de capacitores

X_c : Es la reactancia del banco de capacitores

$$Q_{\text{Nominal}} = \frac{(495.3)^2}{1.6346} = 150.08 \text{KVAR}$$

Este valor es significativamente mayor que la potencia reactiva efectiva requerida calculada al principio 123.675 [KVAR]. La razón es que el voltaje del banco de capacitores es mayor que el voltaje nominal del sistema como se explicó previamente.

La corriente nominal del capacitor basada en el voltaje y su potencia nominales se calcula como sigue:

$$I_{Nom} = \frac{Q_{Nom} [KVAR]}{\sqrt{3} * V_{Nom} [KV]}$$

$$I_{Nom} = \frac{150.08 [KVAR]}{\sqrt{3} * 0.495 [KV]}$$

$$I_{Nom} = 175.048[A]$$

Ésta corriente RMS es la que fluirá por el filtro

El primer valor de potencia fue 123.675 KVAR, ya con dimensionamiento resulto de 150.08 KVAR que representa el 1.24 de la potencia nominal, que se necesita por el valor de voltaje que es mas elevado que el del sistema.

Basados en la norma IEEE 1036-1992, la corriente RMS total a través del capacitor del filtro deberá ser menor que 121% de la corriente nominal del capacitor basada en el voltaje y kvar nominales. La corriente RMS nominal del filtro (incluyendo armónicas) es 139.3 A RMS y es la nominal del banco de capacitores considerando la peor condición que es cuando se suman aritméticamente los voltajes armónicos.

Por lo tanto, el filtro estará compuesto por reactores de 0.07422 [Ω] en serie con el banco de capacitores con capacidad de 150.08 [KVAR] a 495 [V].

La revisión final en el diseño del filtro de armónicas es la verificación del calentamiento del dieléctrico del capacitor del filtro y se evalúa por la desigualdad siguiente:

$$\left| \sum_h V(h) * I(h) \right| \leq \left| 1.33 * Q_{Nom} \right|$$

$$|3 * [(266.113 * 162.8) + (10.645 * 32.56) + (5.432 * 23.26) + (2.199 * 14.8) + (1.574 * 12.52)]| \\ \leq |1.33 * 150.08KVAR|$$

$$|3 * 43.848 [KVAR]| \leq |199.606 [KVAR]|$$

$$|131.544 [KVAR]| \leq |199.606 [KVAR]|$$

Basados en la norma IEEE 1036-1992, la desigualdad se cumple con un margen substancial y el calentamiento del dieléctrico del diseño propuesto es satisfactorio.

Parece que el capacitor del filtro se diseñó conservadoramente y cumple con todos los requisitos. Puede añadirse capacidad adicional para controlar otras corrientes armónicas en el sistema de fuentes sin identificar, que serán atraídas por el filtro y de otra manera conducirían a una sobrecarga. También cuando se agreguen cargas no lineales nuevas en el área, las nuevas armónicas serán atraídas por la baja impedancia del filtro y podrían llevar a una sobrecarga. Algún sobredimensionamiento deberá hacerse en el diseño para evitar esta contingencia. Por lo tanto, es recomendable un margen generoso en la especificación, sobretodo en unidades capacitivas fabricadas según *IEC 60871-1,2*.

5.9 SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Se estudia el comportamiento del sistema con el filtro de armónicas para observar la impedancia contra la frecuencia y que sucede con las corrientes armónicas en el sistema.

5.9.1 RESONANCIA SERIE

La frecuencia de resonancia serie en el filtro de armónicas sucede cuando el valor de la reactancia inductiva es igual al valor de la reactancia capacitiva del filtro.

$$F_{Res} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

$$F_{Res} = \sqrt{\frac{1.6346}{0.0742}} = 4.69$$

5.9.2 RESONANCIA PARALELA

La frecuencia de resonancia paralelo vista en el bus de 440 [V] que sucede cuando la reactancia equivalente del filtro es igual a la reactancia del sistema.

$$F_{Res} = \sqrt{\frac{X_C}{X_S + X_L}}$$

$$F_{Res} = \sqrt{\frac{1.6346}{0.0873 + 0.0742}} = 3.18 P.U. \approx 190.9 Hz$$

5.9.3 CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DEL SISTEMA

Este gráfico muestra la impedancia del sistema al variar la frecuencia, para la frecuencia fundamental (60Hz) tenemos baja impedancia por lo que pasarán las corrientes fundamentales, para frecuencias mayores a la fundamental y menores a la 4ª, armónica el valor de impedancia es muy alto por lo que si existieran armónicas de 3^{er}, orden no las filtraría. Se observa que para la frecuencia de 5 P.U. el sistema tiene una impedancia muy baja por lo que absorbería todas las corrientes con esta frecuencia, que es la frecuencia a la que se sintonizó el filtro. Después de la 5ª, armónica el valor de la impedancia crece por lo que el filtro solo filtrará armónicas de 5^o, orden como fue diseñado.

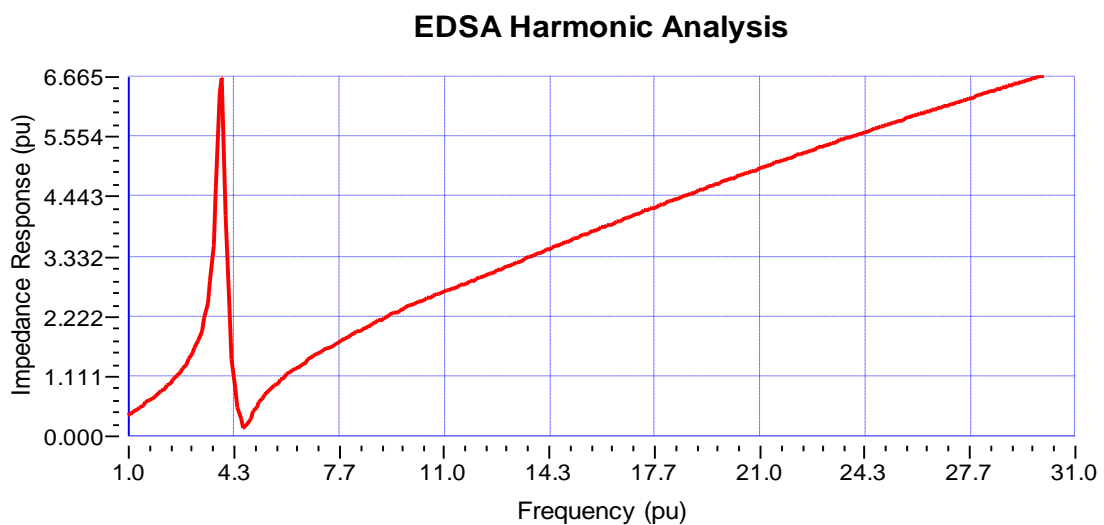


Figura 5.6 – Curva de impedancia contra frecuencia del sistema

La respuesta angular del sistema es el siguiente:

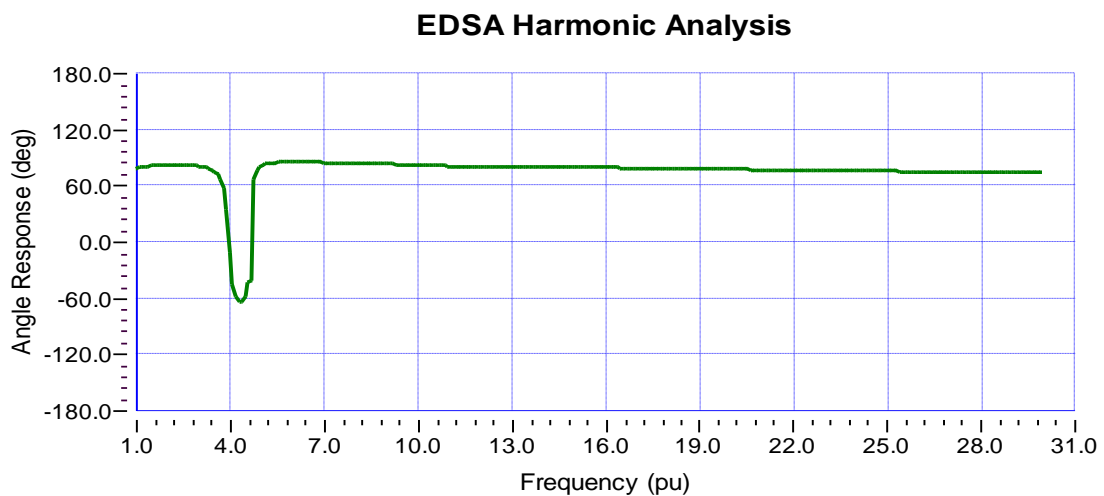


Figura 5.7 – Respuesta angular del sistema

5.9.4 ANÁLISIS ARMÓNICO SIN FILTRO

Esta es la forma de onda en el Punto de acoplamiento común (PAC), localizado sobre el bus de 440 [V]. Tenemos una $THD_I = 15.15\%$.

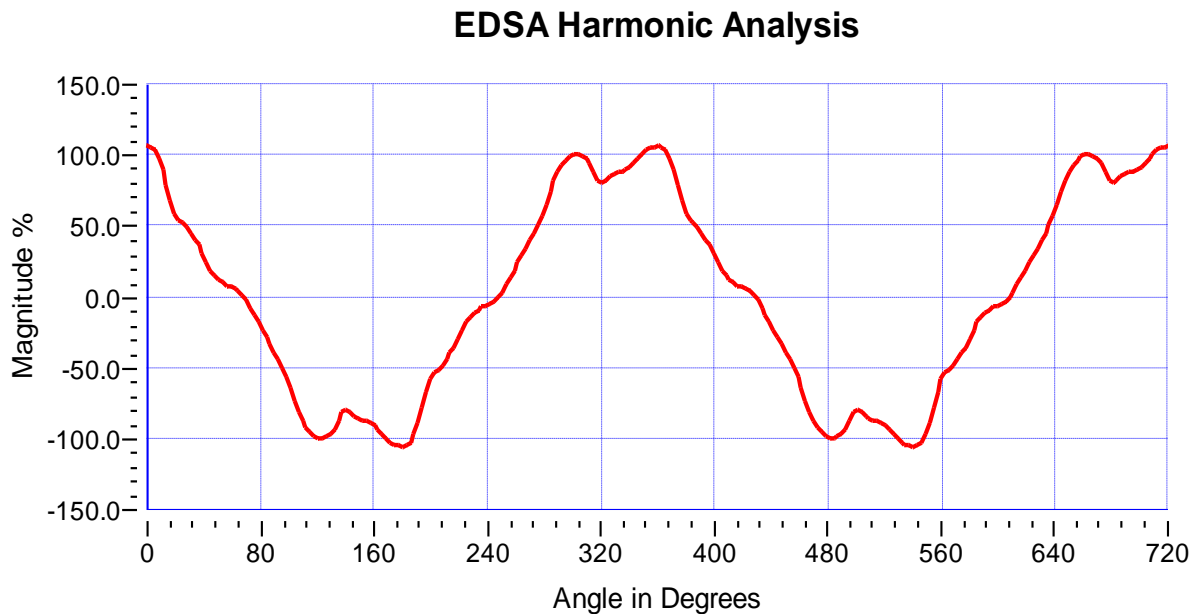


Figura 5.8 – Forma de onda de la señal en el bus de 440 V sin filtro de armónicos

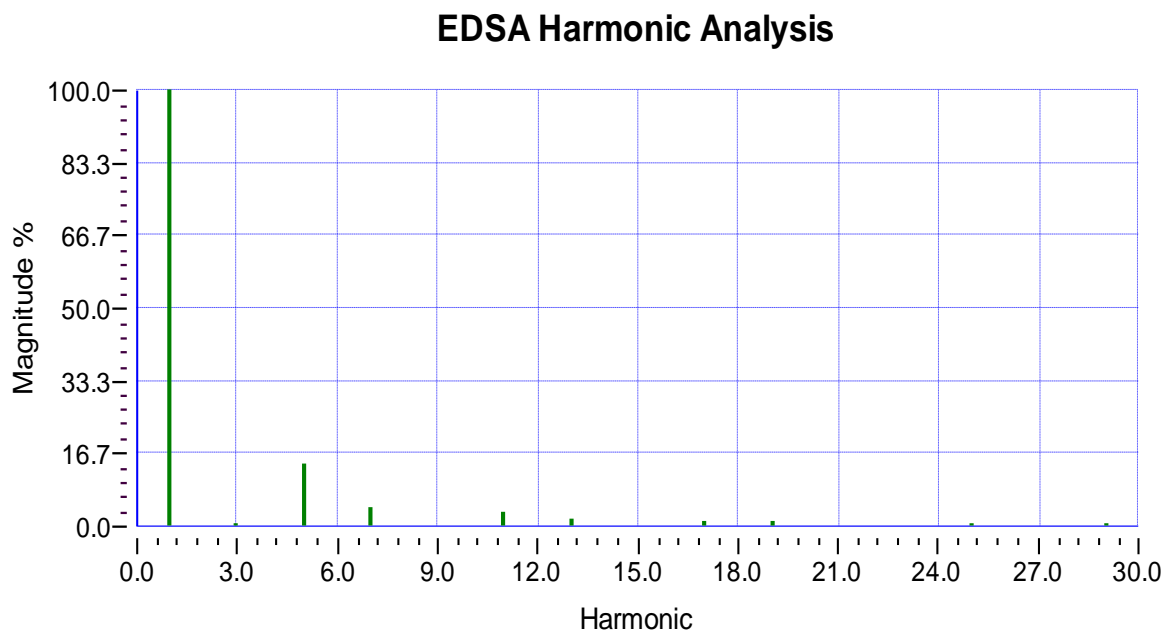


Figura 5.9 – Análisis armónico en el espacio de las frecuencias en el bus de 440 V

5.9.5 ANÁLISIS ARMÓNICO CON FILTRO

Esta es la forma de onda en el punto de acoplamiento común (PAC), localizado sobre el bus de 440 [V]. Tenemos una $THD_1 = 6.0\%$. La corriente fundamental $I(1) = 1189.72$ [A]. De acuerdo a la norma *IEEE-519-1992* la distorsión armónica total de corriente (THD) debe de ser de 8% como máximo por lo que el filtro funciona correctamente.

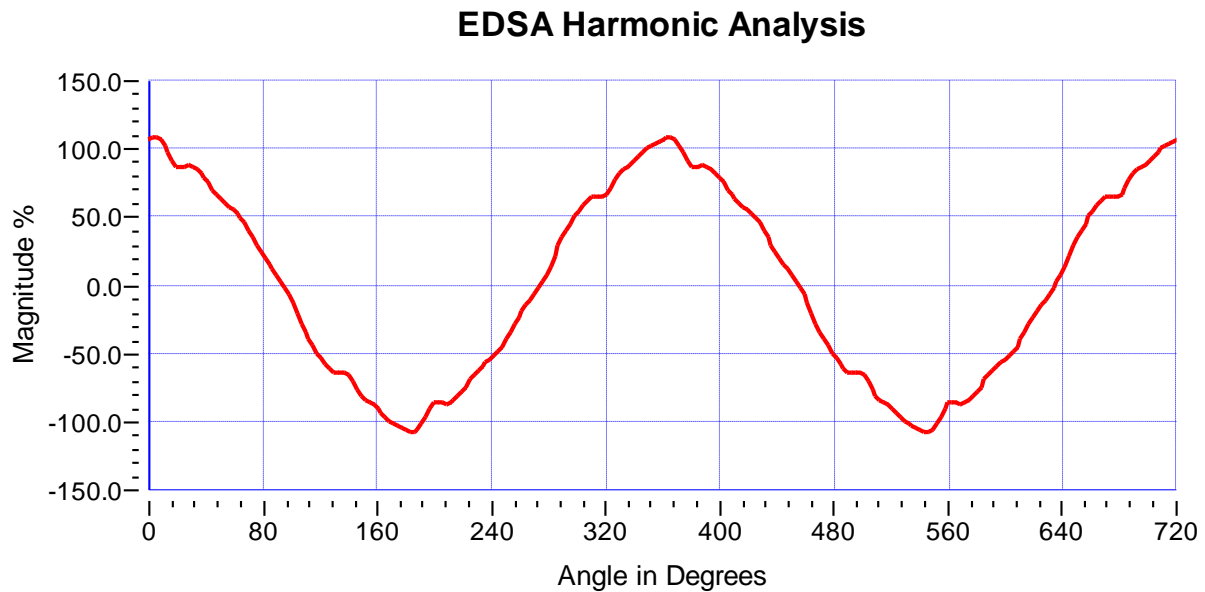


Figura 5.10 – Forma de onda de la señal en el bus de 440 V con el filtro de armónicos

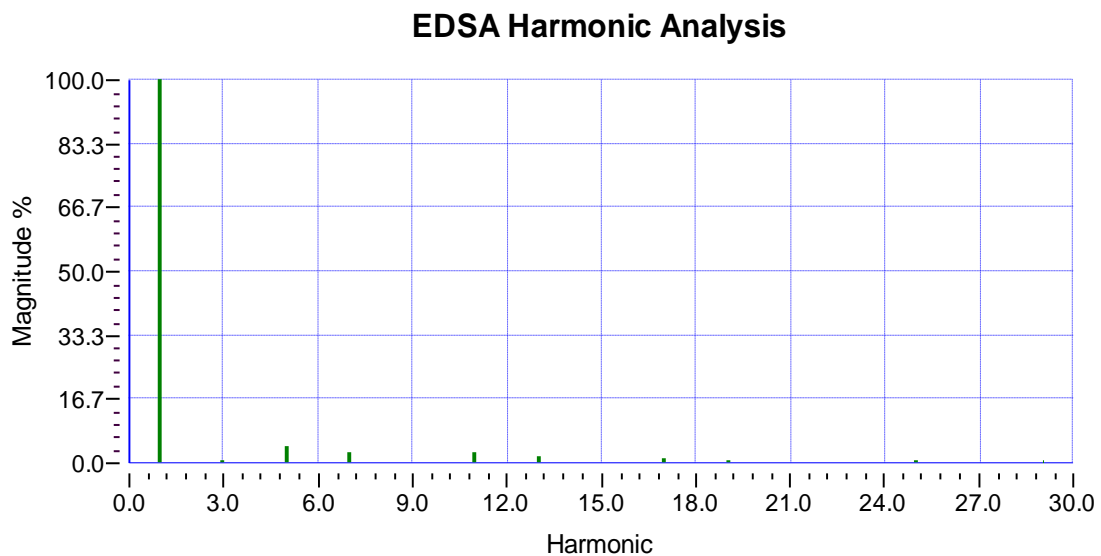


Figura 5.11 – Análisis armónico en el espacio de las frecuencias en el bus de 440 V con filtro de armónicos

La distorsión armónica total de voltaje (THD) con el filtro es de $THD = 3.4\%$ en la norma IEE-519-1992 marca como máxima de 8% por lo que esta dentro de la norma y su valor es pequeño y no causa daño al sistema.

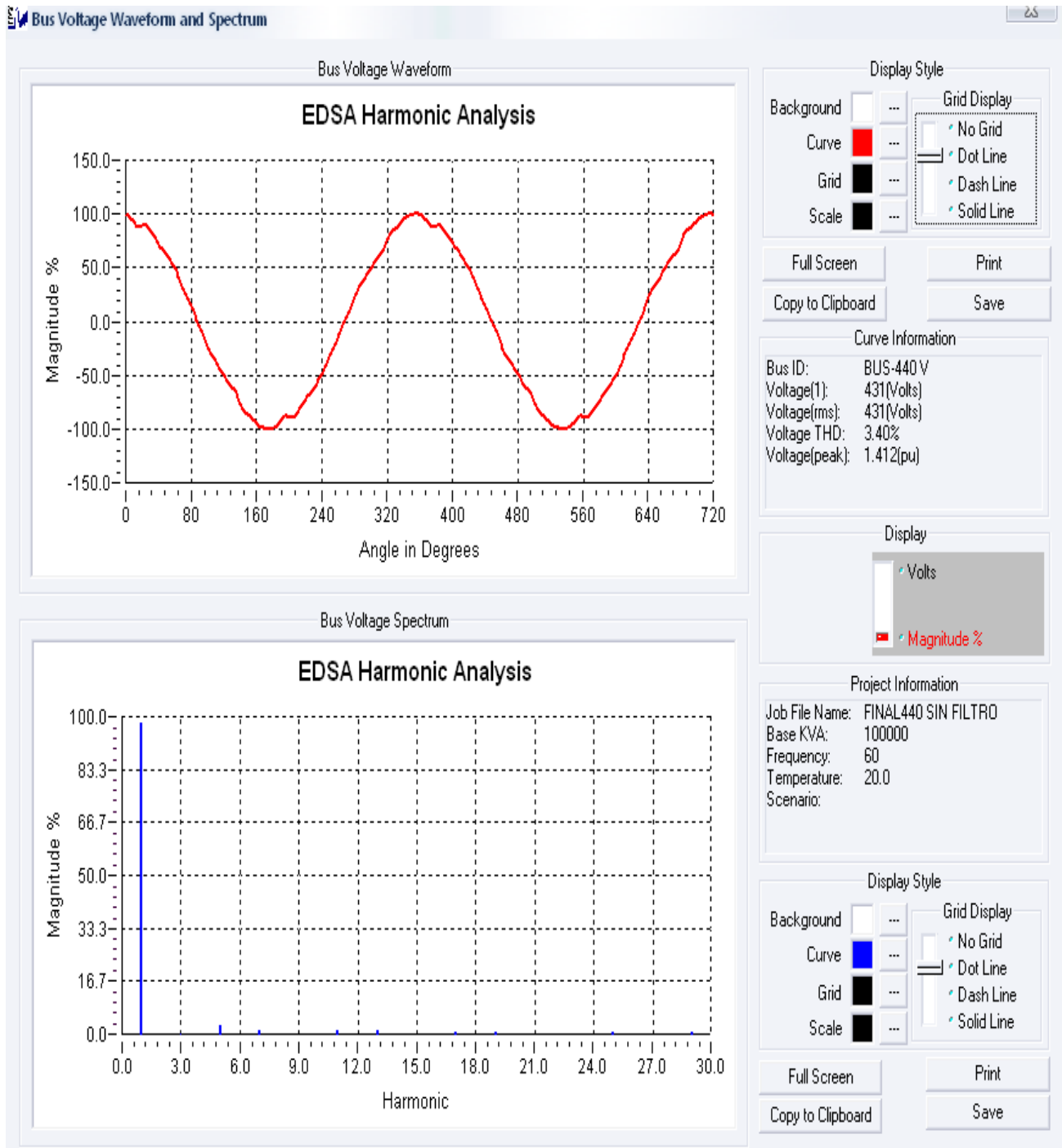


Figura 5.12 – Distorsión armónica total de voltaje en el PAC

5.10 FILTRO DE ARMÓNICAS EN ALTA TENSIÓN

Una planta tiene el siguiente sistema eléctrico, se instalaron variadores de frecuencia para motores (cargas no lineales) los cuales causan altos niveles de distorsión armónica en su sistema por lo que se plantea colocar uno o mas filtros de armónicas para eliminar la distorsión y mejorar la calidad de la energía.

Los datos del sistema son los siguientes:

- **Línea de alta tensión:**
 - Voltaje: 400 KV
 - Nivel de cortocircuito: SCC = 1000 MVA, X/R = 10
- **Transformador:**
 - Nivel de voltaje: 400/23 KV
 - Capacidad: 90 MVA
 - Impedancia: $Z = 0.38 + j11.99 \%$
 - Conexión: Delta-Estrella Sólidamente aterrizado/ Con resistencia a tierra
 - Resistencia a tierra: $R_g = 476.3[\Omega]$
- **Motor:**
 - Voltaje: 23 KV
 - Potencia real: $P = 12.5$ MW
 - Factor de potencia: f.p. = 0.86
 - Eficiencia: $\eta = 88 \%$
 - Reactancia: $X''_M = 20 \%$
 - Relación X/R = $X''_M/R_M = 10$
 - Conexión: En delta Δ ($X''_M = \infty$)
- **Carga pasiva:**
 - Voltaje: 23 KV
 - Potencia aparente: 5 MVA
 - Factor de potencia: f.p. = 0.94
- **Convertidor**
 - Tipo: 12 Pulsos
 - Potencia real: $P = 24.64$ MW
 - Factor de potencia: f.p. = 0.85
 - Eficiencia: $\eta = 96 \%$
 - Entrada de potencia aparente: $S_{in} = 30.196$ MVA
 - Espectro de corriente de armónicas: Tabla 7
 - Forma de onda: Figura 5.7

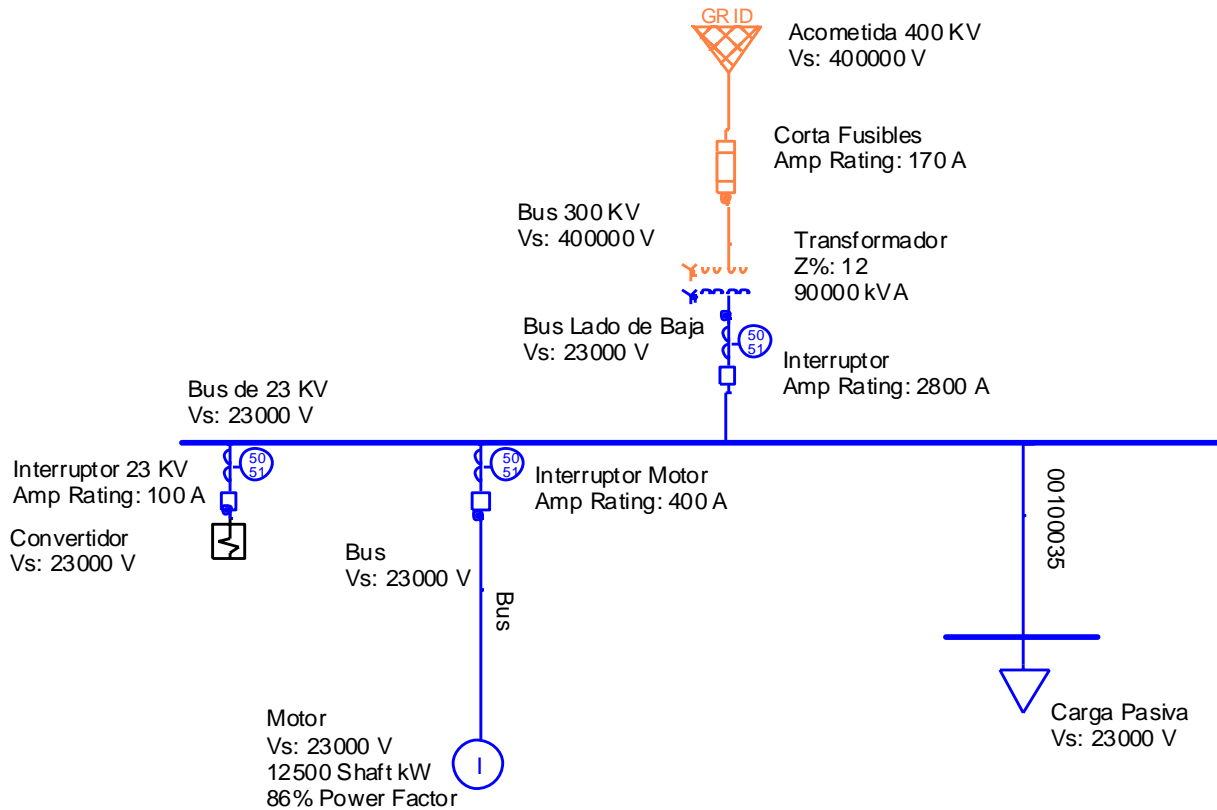


Figura 5.13 – Diagrama unifilar sin filtro

5.10.1 DISTORSIÓN ARMÓNICA DEL CONVERTIDOR

El punto de lectura en la entrada del convertidor, en este punto se tomaron las siguientes lecturas, con un bus de 23 KV. La selección del punto de acoplamiento común (PAC) es muy importante ya que ahí se determinara si los niveles de distorsión armónica son altos o no.

Armónicas	Distorsión armónica Individual (%HD _i)
1	100
5	1.8
7	1.6
11	18
13	9.5
17	5.4
19	1.5
23	1.3
25	0.5
29	0.25
31	0.20
35	0.8
37	0.4

Tabla 7 - Espectro de corrientes armónicas

Calculando la distorsión armónica total de corriente (THD_i) a la salida del convertidor de 12 pulsos:

$$THD_i = \frac{1}{I_1 \sqrt{\sum_{h=2} I_h^2}}$$

$$\%THD_i = \sqrt{\sum_{h=2} \left(\frac{\%I_h}{I_1}\right)^2}$$

$\%THD_i = 21.31\%$

La forma de onda en el convertidor de 12 pulsos es la siguiente:

EDSA Harmonic Analysis

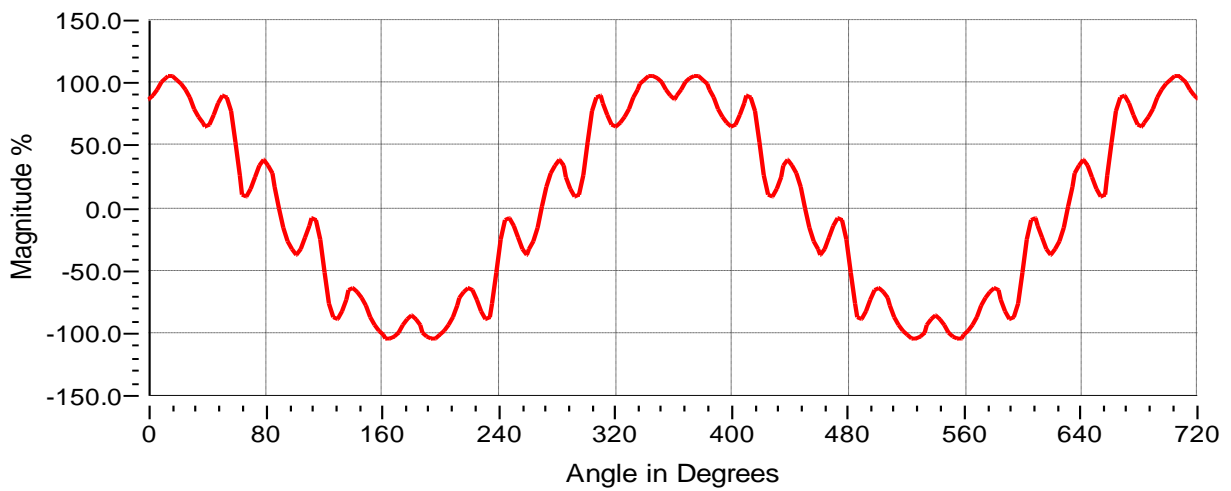


Figura 5.14 – Forma de onda distorsionada

En base a la HD_i se hace el análisis de Fourier para observar la distorsión armónica.

EDSA Harmonic Analysis

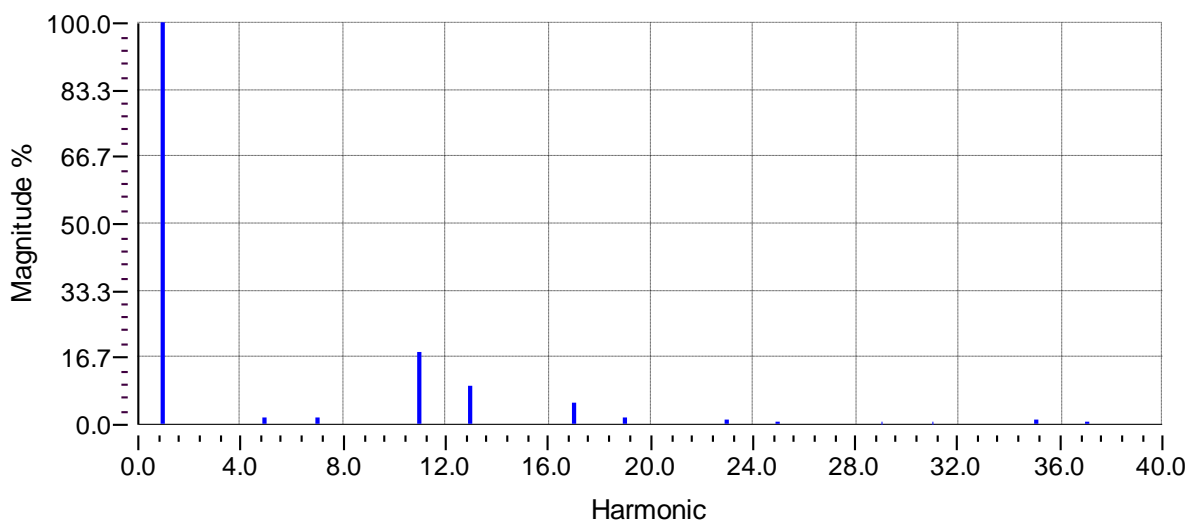


Figura 5.15 – Análisis Armónico en el espacio de las frecuencias

Cálculo de la corriente de cortocircuito (I_{CC})

Se calcula la corriente nominal en el bus de 23 KV la cual es la siguiente:

$$I_N = \frac{MVA * 1000}{\sqrt{3} * 23KV} [A]$$

$$I_N = \frac{90MVA * 1000}{\sqrt{3} * 23KV} = 2259.1967 [A]$$

En base a la I_N y a la impedancia del transformador se calcula la corriente de cortocircuito (I_{CC})

$$I_{CC} = 18832.885 [A]$$

De la capacidad de cortocircuito (I_{CC}) en el punto de acoplamiento común (PAC) y la máxima demanda de corriente de carga medida en la instalación ($I_L = 906.62 [A]$), (a frecuencia fundamental).

La relación de I_{CC}/I_L es la siguiente:

$$\frac{I_{CC}}{I_L} = \frac{18832.884}{906.62}$$

$$\frac{I_{CC}}{I_L} = 20.77 [A]$$

En el punto de acoplamiento común (PAC) tenemos una distorsión armónica total de (THD) 22.52%. En base comparamos con la tabla 10.3 de la norma *IEEE-519*

Tenemos que:

Para la relación de impedancia relativa; $20 \leq I_{CC}/I_L < 50$ el % THD debe ser como máximo de 8 % y en nuestro caso tenemos una $THD_1 = 22.52\%$, por lo que esta fuera de las recomendaciones de la norma *IEEE-519-1992*.

La distorsión armónica individual HD_1 de $11^{va} \leq h < 17^{va}$ deben estar como máximo en 3.5%, y en el PAC tenemos 17.2% en la 11^{va} y 13.0% en la 13^{va} armónica por lo que esta fuera de las recomendaciones de la norma *IEEE-519-1992*. Estos valores muestran que el sistema necesita mitigación de armónicas según los requerimientos de la norma de IEEE.

5.10.2 DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

5.10.2.1 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA (CAPACIDAD DE POTENCIA REATIVA DEL FILTRO)

La capacidad de potencia reactiva del banco de capacitores del filtro de armónicas se calcula en base a la cantidad de compensación capacitiva necesaria para elevar el factor de potencia. La norma IEE Std. 1036-1992 indica los factores de multiplicación que se aplican a la potencia real y calcular la potencia reactiva para circuitos simples como en este caso.

En nuestro sistema existen dos factores de potencia que necesitan ser corregidos que es el motor (f.p.=0.86) y el del convertidor de 12 pulsos (f.p.=0.85).

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DEL MOTOR

El motor tiene una potencia real de 12.5 MW y un factor de potencia de 0.86 y se requiere elevar al 0.95, utilizando el factor de multiplicación de la norma IEEE Std. 1036-1992 de la siguiente manera:

$$Q_{\text{efectiva}} = (\text{factor de multiplicación})(\text{potencia real en KW})$$

$$Q_{\text{efectiva}} = (0.264)(12500\text{KW})$$

$$Q_{\text{efectiva}} = 3300\text{KVAR}$$

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DEL CONVERTIDOR DE 12 PULSOS

El convertidor de 12 pulsos tiene una potencia real de 24.64 MW y se requiere elevar el factor de potencia de 0.85 a 0.95

Utilizando el factor de multiplicación de la norma IEEE Std. 1036-1992 de la siguiente manera.

$$Q_{\text{efectiva}} = (\text{factor de multiplicación})(\text{potencia real en KW})$$

$$Q_{\text{efectiva}} = (0.291)(24640\text{KW})$$

$$Q_{\text{efectiva}} = 7170.24\text{KVAR}$$

Como las cargas del motor y del convertidor están en paralelo la capacidad de potencia reactiva se suma:

$$Q_{\text{efectiva}}^{\text{total}} = 3300 + 7170.24 = 10470.24 \text{ KVAR}$$

Esta es la carga que necesitara el banco de capacitores para el filtro de armónicas eleve el factor de potencia a 0.95, los 10470.24 KVAR es la compensación efectiva del banco del filtro. Agregar un reactor causa que la potencia reactiva nominal del banco sea diferente de la potencia reactiva de la combinación reactor-capacitor.

5.10.2.2 SINTONIZACIÓN DEL FILTRO DE ARMÓNICAS

En el análisis anterior se muestra que la distorsión armónica individual es alta en la 11^{va} y 13^{va} armónica por lo que el filtro se diseñara para la 11^{va} armónica, pero y tomando en cuenta que

frecuentemente los filtros se sintonizan a una frecuencia aproximadamente de 1.0 a 15% debajo de la frecuencia armónica seleccionada. En nuestro caso el filtro para la 11^{va} armónica será sintonizado alrededor de 6 debajo de los 660 Hz (11^{va}). Este valor es de 10.34^{va} veces la frecuencia fundamental que en nuestro sistema es de 60 Hz.

El filtro será diseñado como paso altas para armónicas de orden elevado como son las 11^{va} y 13^{va} armónica.

Usando la siguiente ecuación la impedancia efectiva del banco del filtro es la siguiente:

$$X_{efectiva} = \frac{V_{LLSISTEMA}^2 (KV)}{Q_{EFECTIVA} (MVAR)}$$

$$X_{efectiva} = \frac{(23KV)^2}{10.47MVAR} = 50.525[\Omega]$$

5.10.2.3 CÁLCULO DE LA REACTANCIA CAPACITIVA DEL FILTRO A FRECUENCIA FUNDAMENTAL

$$X_C = \left[\frac{h^2}{h^2 - 1} \right] X_{efectiva}$$

$$X_C = \left[\frac{10.34^2}{10.34^2 - 1} \right] 50.525$$

$$X_C = 51.002[\Omega]$$

5.1.2.4 CÁLCULO DE LA REACTANCIA INDUCTIVA DEL FILTRO A FRECUENCIA FUNDAMENTAL

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} [\Omega]$$

$$X_L = \frac{51.002}{10.34^2}$$

$$X_L = 0.477[\Omega]$$

5.10.2.5 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DEL FILTRO

Primero se calcula la reactancia de la armónica n, que es la frecuencia en por unidad a la que se sintonizara el filtro.

$$X_n = \frac{X_C}{h_n}$$

$$X_n = \frac{51.002}{10.34} = 4.932[\Omega]$$

Considerando un factor de calidad (Q) de 3 para el filtro tenemos:

$$R = X_n * Q$$

$$R = 4.932 * 3 = 14.796[\Omega]$$

5.10.2.6 CÁLCULO DE LA REACTANCIA INDUCTIVA Y CAPACITIVA DEL FILTRO

$$X_{c10.34} = \frac{1}{2 * \pi * f_{10.34} * C}$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f_{10.34} * X_{c10.34}}$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * (60 * 10.34) * 51.002}$$

$$C = 5.0299 [\mu F]$$

$$W(10.34) * L = \frac{1}{W(10.34) * C}$$

$$L = \frac{1}{W(10.34) * W(10.34) * C}$$

$$L = \frac{1}{(2 * \pi * 60 * 10.34) * (2 * \pi * 60 * 10.34) * C}$$

$$L = 76.429 [mH]$$

5.10.2.7 RESONANCIA SERIE

La resonancia serie en el filtro de armónicos se da cuando la reactancia inductiva y reactancia capacitiva son iguales, se calcula de la siguiente manera:

$$F_{Res} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

$$F_{Res} = \sqrt{\frac{51.002}{0.477}} = 10.34[P.U.]$$

5.10.2.8 RESONANCIA PARALELA

La frecuencia de resonancia paralelo vista en el bus de 23 [kV] que sucede cuando la reactancia equivalente del filtro es igual a la reactancia del sistema.

$$F_{Res} = \sqrt{\frac{X_C}{X_S + X_L}}$$

$$F_{Res} = \sqrt{\frac{51.002}{0.739 + 0.477}}$$

$$F_{Res} = 6.476 P. U. \approx 389 Hz$$

5.10.2.9 SIMULACIÓN DEL FILTRO DE ARMÓNICOS

En la siguiente gráfica se muestra la respuesta del filtro de armónicos al cambio de frecuencias, donde se observa que para la frecuencia fundamental la impedancia del filtro es muy alta por lo que no filtrara dicha frecuencia, esta impedancia desciende hasta llegar a su valor mas bajo alrededor de la 620 Hz (10.34 pu), que es el valor al que se sintonizo el filtro.

EDSA Harmonic Analysis

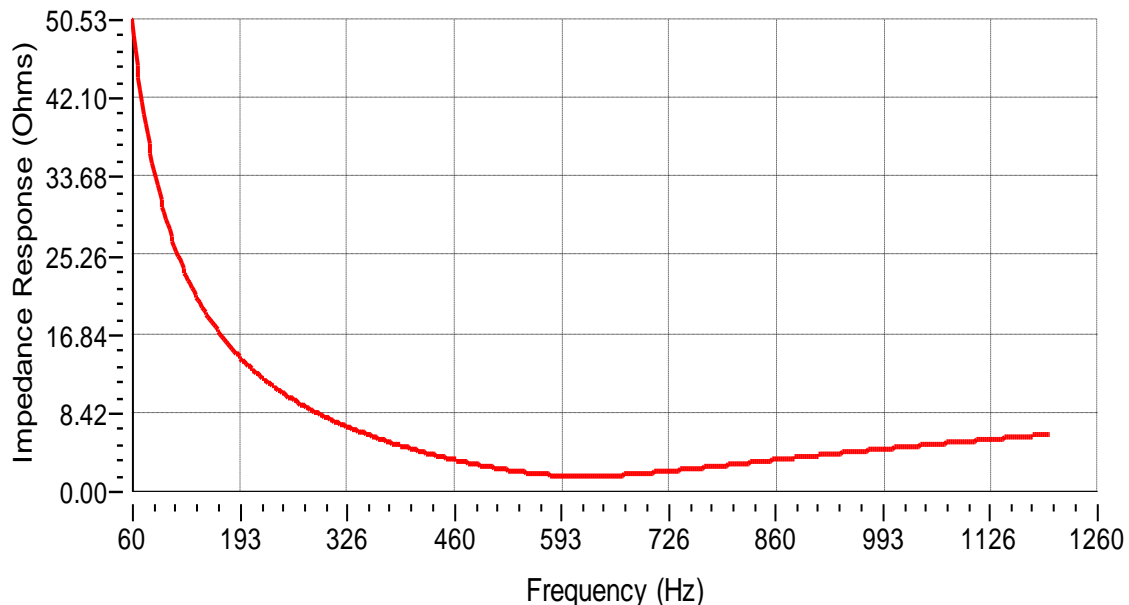


Figura 5.16 – Respuesta a la frecuencia del filtro

EDSA Harmonic Analysis

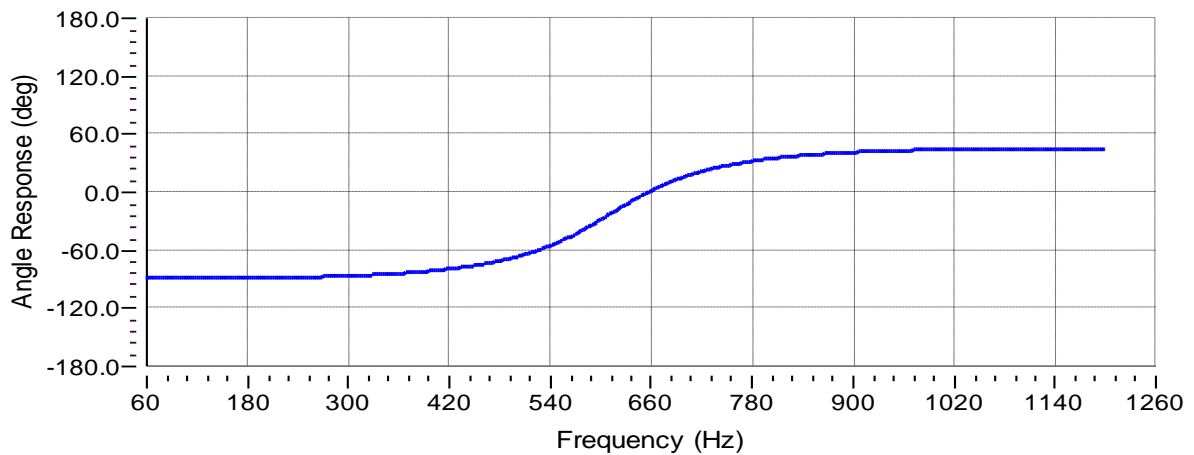


Figura 5.17 - Respuesta angular del filtro

5.10.3 ANÁLISIS DE IMPEDANCIAS

Para poder verificar que el sistema se comporta correctamente con el filtro hacemos un análisis de impedancias

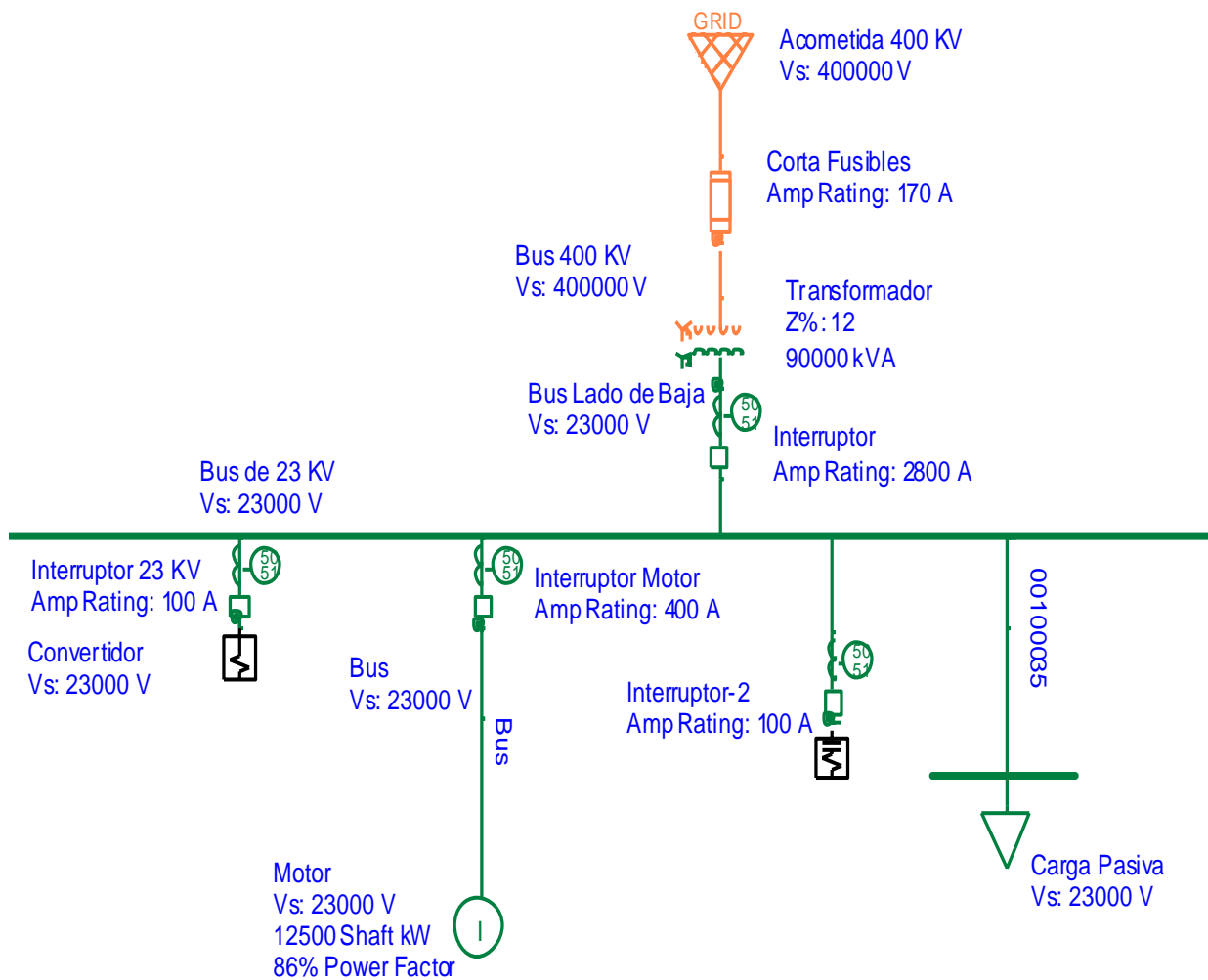


Figura 5.18 – Diagrama unifilar

5.10.3.1 IMPEDANCIAS DEL SISTEMA EN PU

Se analiza el sistema en PU se hace la reducción hasta llegar al bus de 23 KV

Base\100 MVA	Alta Tension	Baja Tension	Unidad
$S_{B3\phi}$	100	100	MVA
V_{BLL}	400	23	KV
V_{BLN}	230.94	13.28	KV
I_B	144.337	2510.22	A
Z_B	1600	5.29	Ω

Tabla 8 – Base en Por Unidad

$$Z_{BASE} = \frac{(KV_{LL})^2}{MVA}$$

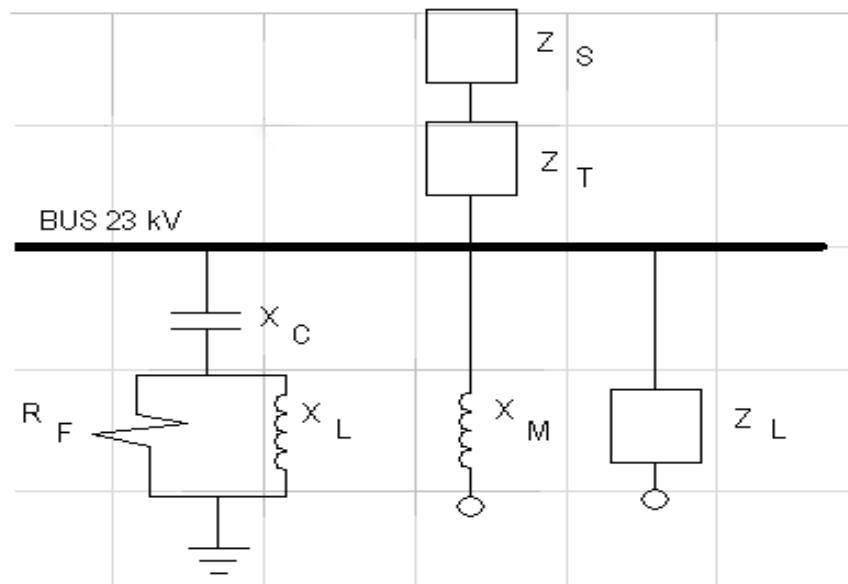


Figura 5.19 – Diagrama de impedancias

Para Z_s :

Dado la capacidad de cortocircuito a 400 KV => 1000 MVA, X/R= 10

$$I_{cc_{3\phi}} = \frac{1000MVA}{400KV\sqrt{3}} = 1443.38[A]$$

$$\theta = \text{ang tan}\left(\frac{X}{R}\right) = -84.29^\circ$$

$$I_{cc_{3\phi}} = 1443.38 \angle -84.29^\circ [A]$$

$$Z_S^+ = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}I_{cc_{3\phi}}} = \frac{400KV}{\sqrt{3} * 1443.38} = 159.99 \angle 84.29^\circ [\Omega]$$

$$Z_S^+ = 15.917 + j159.196[\Omega]$$

Usando

$$I_{1\phi} = 0.9I_{3\phi}$$

$$I_{1\phi} = 1299.04 \angle -84.29^\circ [A]$$

$$Z_S^0 = \frac{3V_{LL}}{\sqrt{3}I_{cc_{1\phi}}} = \frac{3 * 400KV}{\sqrt{3} * 1443.38} = 479.99 \angle 84.29^\circ [\Omega]$$

$$Z_S^0 = 47.776 + j477.608[\Omega]$$

Para la impedancia del transformador Z_T

400KV/23KV

90MVA

$R_g = 476.3 \Omega$

$$Z_T = 0.38 + j11.99\%$$

$$Z_T^+ = Z_T^- = \frac{\% Z_T * S_B}{100 S_T}$$

$$Z_T^+ = \frac{0.38 + j11.99}{100} * \frac{100}{90} = 0.00422 + j0.13322 pu$$

$$Z_{TH}^+ = 3.798 + j119.898[\Omega]$$

$$Z_{TL}^+ = 0.2232 + j0.70473[\Omega]$$

$$Z_T^0 = Z_T^+ + \frac{3R_g}{Z_{BL}} = 0.13329 \angle 88.18^\circ + \frac{3 * 476.3 \angle 0^\circ}{4.84}$$

$$Z_T^0 = 295.2315 + j0.13322 pu$$

$$Z_{TL}^0 = 1561.7745 + j0.70473[\Omega]$$

Para el motor:

23KV

P=12.5MW

F.P.=0.86

$\eta=88\%$
 $\%X_M=20\%$

$$S_M = \frac{P}{FP * \eta} = \frac{12.5MW}{0.86 * 0.88} = 16.5169MVA$$

$$X_M'' = \frac{\% X_M * S_B}{100 * S_M} = \frac{20}{100} * \frac{100}{16.5169} = 1.2108 pu$$

$$X_M'' = 6.406[\Omega]$$

$$R_M = \frac{X_M''}{X/R} = \frac{6.406}{10} = 0.6406[\Omega]$$

Para la carga pasiva:

23KV
 5MVA
 FP=0.94

$$S_L = 5 < \cos^{-1}(0.94)$$

$$S_L = 5 < 19.95^\circ [MVA]$$

$$I_N = \frac{5MVA}{23KV * \sqrt{3} * 0.94} = 133.52[A]$$

$$Z_L = \frac{(KV_{LL})^2}{MVA} = \frac{23^2}{5} < 19.95^\circ$$

$$Z_L = 105.8 < 19.95^\circ$$

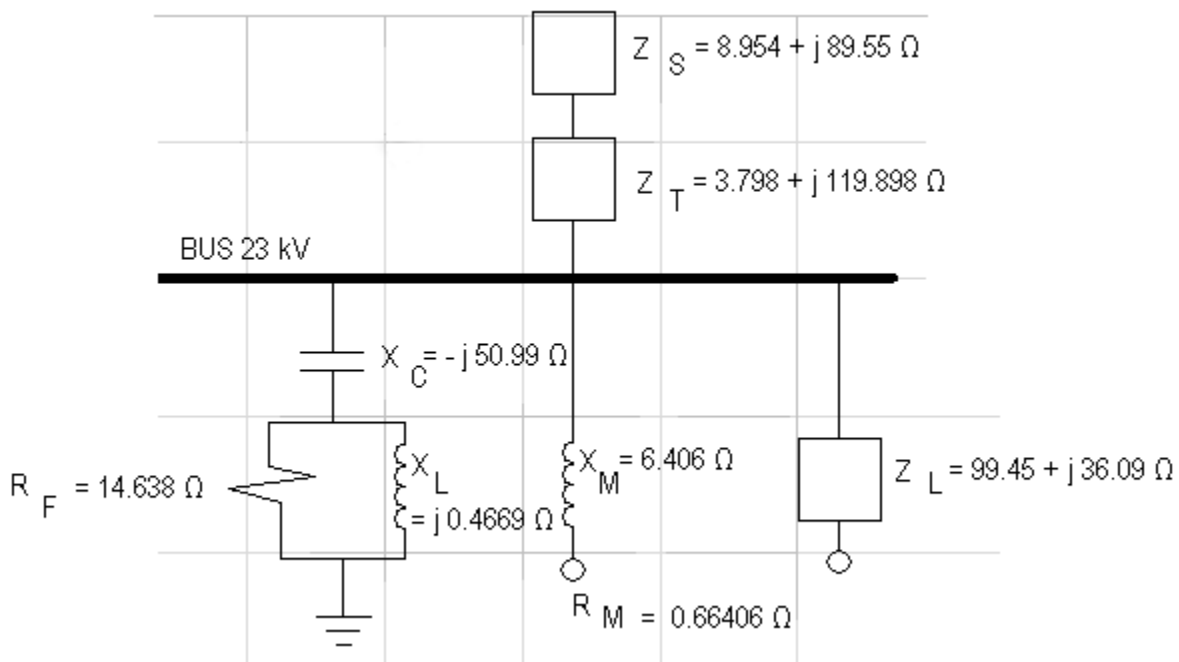


Figura 5.20 – Diagrama de Impedancias para la Carga

5.10.3.2 IMPEDANCIA DEL FILTRO

$$Z_F(h) = \frac{jRhX_L}{R + jhX_L} - j\frac{X_c}{h}$$

Escaneo de impedancias

En secuencia positiva (Impedancia vista del bus de 23KV)

$$Z_{23}(h) = Z_S(h) + Z_T(h)$$

$$\frac{1}{Z_{Eq}(h)} = \frac{1}{Z_F(h)} + \frac{1}{Z_M(h)} + \frac{1}{Z_L(h)}$$

$$Z_{23}(h) = 19.706 + j279.094h[\Omega]$$

$$Z_F(h) = \frac{j(14.796) * h * 0.477}{14.796 + j * h * 0.477} - j\frac{51.002}{h}[\Omega]$$

$$Z_M(h) = 0.6406 + j6.4006h[\Omega]$$

$$Z_L(h) = 99.45 + j36.09h[\Omega]$$

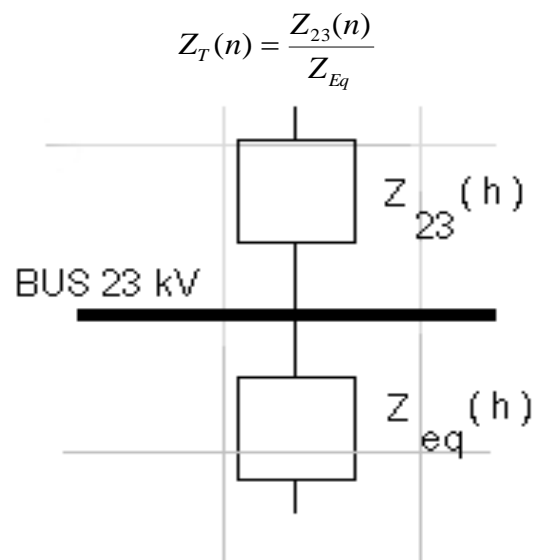


Figura 5.21 – Diagrama equivalente

Valores para el Filtro de Armónicas

$$Z_F(1) = \frac{j7.04052}{14.796 + j0.477} - j51.002$$

$$Z_F(1) = 50.525 < -89.98^\circ$$

$$Z_F(5) = 7.884 < -87.27^\circ$$

$$Z_F(11) = 1.653 < -0.843^\circ$$

Para la frecuencia a la que se sintonizó el filtro (10.34pu) tenemos

$$Z_F(10.34) = \frac{j72.976}{14.796 + j4.932} - j4.932$$

$$Z_F(10.45) = 1.559 < -18.45^\circ$$

Este valor es muy pequeño por lo que el filtro absorberá las armónicas de estas frecuencias.

Para el Bus de 23 KV:

$$Z_{23}(n) = 19.706 + j279.094h[\Omega]$$

$$Z_{23}(1) = 279.789 < 85.96^\circ[\Omega]$$

$$Z_{23}(3) = 837.514 < 88.65^\circ[\Omega]$$

$$Z_{23}(5) = 1395.61 < 89.19^\circ[\Omega]$$

$$Z_{23}(7) = 1953.76 < 89.42^\circ[\Omega]$$

$$Z_{23}(11) = 3700.1 < 89.63^\circ[\Omega]$$

$$Z_{23}(13) = 3628.28 < 89.69^\circ[\Omega]$$

$$Z_{23}(15) = 4186.46 < 89.73^\circ[\Omega]$$

Para el Motor:

$$Z_M(h) = 0.6406 + j6.406h[\Omega]$$

$$Z_M(1) = 6.437[\Omega]$$

$$Z_M(3) = 19.31[\Omega]$$

$$Z_M(5) = 32.189[\Omega]$$

$$Z_M(7) = 45.06[\Omega]$$

$$Z_M(11) = 70.81[\Omega]$$

$$Z_M(13) = 83.69[\Omega]$$

$$Z_M(15) = 96.56[\Omega]$$

Para la Carga:

$$Z_L(h) = 99.45 + j36.09h[\Omega]$$

$$Z_L(1) = 105.78[\Omega]$$

$$Z_L(3) = 317.35[\Omega]$$

$$Z_L(5) = 528.92[\Omega]$$

$$Z_L(7) = 740.5[\Omega]$$

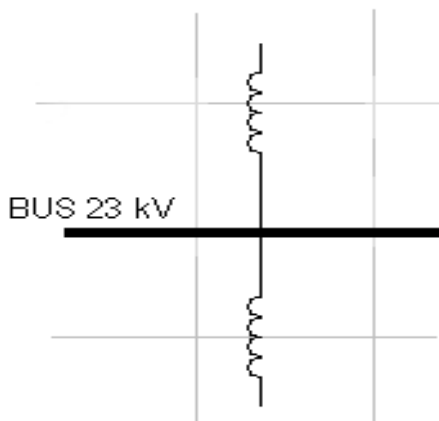
$$Z_L(11) = 1163.64[\Omega]$$

$$Z_L(13) = 1375.21[\Omega]$$

$$Z_L(15) = 1586.78[\Omega]$$

5.10.3.3 IMPEDANCIAS DEL SISTEMA A DISTINTAS FRECUENCIAS**Impedancia del Sistema a Frecuencia Fundamental**

$$Z_{23}(1) = 279.789[\Omega]$$



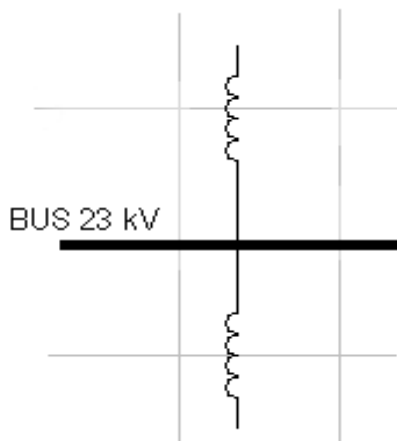
$$\frac{1}{Z_{Eq}}(1) = \frac{1}{50.525} + \frac{1}{6.437} + \frac{1}{105.78}$$

$$Z_{Eq}(1) = 5.4172[\Omega]$$

$$Z_T(1) = 5.314[\Omega]$$

Impedancia del Sistema a Quinta Armónica (300 Hz)

$$Z_{23}(5) = 1395.61[\Omega]$$



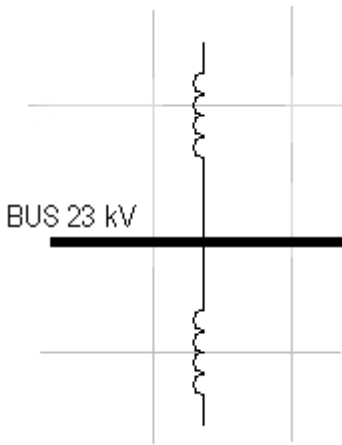
$$\frac{1}{Z_{Eq}}(5) = \frac{1}{7.884} + \frac{1}{32.184} + \frac{1}{528.92}$$

$$Z_{Eq}(5) = 6.258[\Omega]$$

$$Z_T(5) = 6.23[\Omega]$$

Impedancia del Sistema a 11^{va} Armónica (660 Hz)

$$Z_{23}(11) = 3700.1[\Omega]$$



$$\frac{1}{Z_{Eq}}(11) = \frac{1}{1.653} + \frac{1}{70.81} + \frac{1}{1163.64}$$

$$Z_{Eq}(11) = 1.613[\Omega]$$

$$Z_T(11) = 1.612[\Omega]$$

5.10.3.4 SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Se hace la simulación del sistema para corroborar los resultados obtenidos. En la gráfica se observa que el sistema tiene una impedancia muy baja para armónicas cercanas a la 11^a y relativamente baja para las armónicas posteriores (13, 15 19, 21,25, 29, 31). Se observa que la resonancia del sistema esta cerca de la 6^a armónica, y ya que no hay distorsión armónica cerca de esta frecuencia el filtro funcionara correctamente.

EDSA Harmonic Analysis

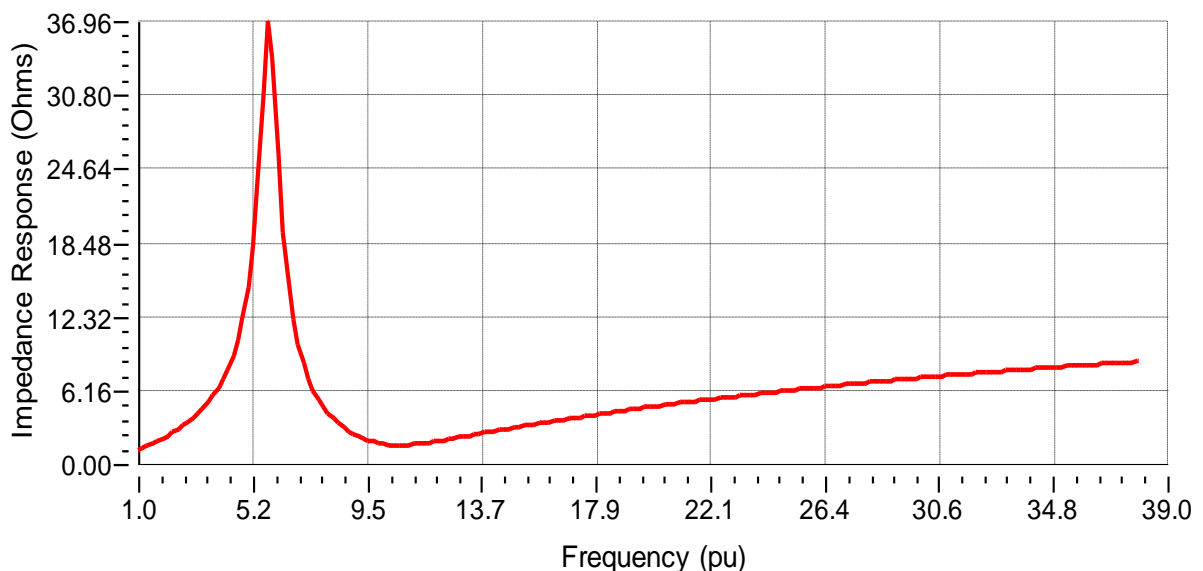


Figura 5.22 – Impedancia de respuesta a la frecuencia

5.10.4 OPTIMIZACIÓN DEL FILTRO DE ARMÓNICOS

5.10.4.1 BANCO DE CAPACITORES

La capacidad de voltaje de los capacitores se calcula de la siguiente manera:

$$V_R = \sum_{h=1}^{\infty} I(h)X_c(h)$$

Se calcula para el peor caso que es en el que el espectro de armónica es más alto. Todas las armónicas significativas serán incluidas en el cálculo del voltaje de operación de los capacitores. La corriente a frecuencia fundamental para un filtro conectado en estrella se calcula de la siguiente manera:

$$I_f(1) = \frac{V_S}{(X_C - X_L)}$$

$$I_f(1) = \frac{\left(\frac{23KV}{\sqrt{3}}\right)}{(51.002 - 0.477)} = 262.82 \text{ A}$$

5.10.4.2 CORRIENTES ARMÓNICAS QUE FLUYEN POR EL FILTRO

Como tenemos un convertidor de 12 pulsos trifásico, generará 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª, 19ª, 23ª, 25ª, 29ª, 31ª, 35ª, 37ª y demás. Sus magnitudes máximas serán de $I_5=I_1/5$, $I_7=I_1/7$, $I_{11}=I_1/11$, $I_{13}=I_1/13$... $I_{37}=I_1/37$. Es decir $H=KP \pm 1$; $I_h=I_1/h$.

Donde: H =orden de la armónica, $K=1,2,3,\dots$; P = Núm. de pulsos; I_1 = corriente fundamental a 60 Hz.

Se modela el sistema eléctrico y se realiza el análisis armónico para determinar que armónicas (orden y magnitud) fluyen al sistema, a las cargas y al filtro. El peor caso para el diseño del filtro es despreciando la carga y cuando se tiene una alta impedancia de la fuente (baja corriente de cortocircuito trifásica), así casi toda la corriente armónica generada fluirá hacia el filtro

En nuestro caso las corrientes armónicas que fluyen hacia el filtro son:

$$I_{F1}=1^{\text{a}} \text{ armónica} = 262.82 \text{ A}$$

$$I_{F5}=5^{\text{a}} \text{ armónica} = 52.564 \text{ A}$$

$$I_{F7}=7^{\text{a}} \text{ armónica} = 37.55 \text{ A}$$

$$I_{F11}=11^{\text{a}} \text{ armónica} = 23.89 \text{ A}$$

$$I_{F13}=13^{\text{a}} \text{ armónica} = 20.22 \text{ A} \dots$$

$$I_{F37}=37^{\text{a}} \text{ armónica} = 7.1 \text{ A}$$

Estos serán los valores máximos de corrientes que fluirán al filtro.

Con estos valores calculamos la corriente rms del filtro:

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + \dots + I_{37}^2} \text{ [A]}$$

$$I_{rms} = \sqrt{262.82^2 + 52.56^2 + 37.55^2 + 23.89^2 + \dots + 7.1^2} \text{ [A]}$$

$$I_{rms} = 274.15 \text{ [A]; Esta es la Corriente rms del Filtro}$$

Cálculo del voltaje del banco de capacitores.

$$V(1)_C = I(1)_F * X_C$$

$$V(1)_C = 262.82 * 51.002$$

$V(1)_C = 13.404 \text{ KV}$; Este es valor de voltaje para la primera armónica. Para obtener el valor total aplicamos la siguiente expresión:

$$V(h)_C = V_5 + V_7 + V_{11} + \dots + V_{37}$$

$$V(h)_C = \sum \frac{I_f(h)}{h} \left(\frac{X_C}{h} \right) V$$

$$V_5 = I_5 * \frac{X_C}{h} [V] = 52.56 * \frac{51.002}{5} = 536.13[V]$$

$$V_7 = 37.55 * \frac{51.002}{7} = 273.59[V]$$

$$V_{11} = 23.89 * \frac{51.002}{11} = 110.77[V]$$

$$V_{13} = 20.22 * \frac{51.002}{13} = 79.33[V] \dots$$

$$V_{37} = 7.1 * \frac{51.002}{37} = 9.79[V]$$

Sumando los voltajes armónicos tenemos:

$$V(h)_C = 536.13_5 + 273.59_7 + 110.77_{11} + 79.33_{13} + \dots + 9.79_{37}$$

$$V(h)_C = 1180.72[V]$$

Sumando el voltaje fundamental y voltajes armónicos tenemos el valor del voltaje aplicado al banco de capacitores V_r .

$$V_r = [V(1)_C + V(h)_C][V]$$

$$V_r = [13404 + 1180.72][V]$$

$$V_r = 14584.72 [V]$$

El valor de 14584.72 V es el valor de fase a neutro el valor trifásico será;

$$V_{3r} = \sqrt{3} * 14584.72 = 25,261.47[V]$$

El voltaje aplicado al banco de capacitores del filtro es mayor que el nominal del sistema, debido al reactor de sintonía y los voltajes armónicos resultantes de las corrientes armónicas. Se deben elegir unidades capacitivas que operen a 25,300 V en condiciones normales de operación o realizar el arreglo del banco de capacitores, por ejemplo, dos grupos serie que aguanten los 25,300 V. Aunque la norma IEEE Std 1036-1992 permite la operación continua del capacitor a un voltaje de 110% arriba del voltaje nominal y 120% arriba del voltaje pico nominal, estos márgenes deberán ser reservados para operación en contingencia o si las unidades capacitivas son diseñadas de acuerdo a la norma IEC 60871-1,2 éstas unidades no pueden operar de manera continua con algún sobre voltaje. Consecuentemente, en el diseño del filtro el voltaje del banco de capacitores debe especificarse para la condición de operación más severa, en éste caso será: 25,300 volts mas un voltaje adicional por corrientes armónicas futuras.

5.10.4.3 MÉTODO DE SOBREDIMENSIONAMIENTO DEL BANCO DE CAPACITORES

Basados en el voltaje entre fases y la impedancia del banco de capacitores, la capacidad trifásica del banco de capacitores es:

$$Q_{\text{Nominal}} = \frac{(V_{3r})^2}{X_C}$$

Donde:

Q_{Nominal} : Es la capacidad en MVAR trifásica del banco de capacitores

X_C : Es la reactancia del banco de capacitores

$$Q_{\text{Nominal}} = \frac{(25261.47)^2}{51.002} = 12.51 \text{ MVAR}$$

Este valor es significativamente mayor que la potencia reactiva efectiva requerida calculada al principio 10.47 [MVAR]. La razón es que el voltaje del banco de capacitores es mayor que el voltaje nominal del sistema como se explicó previamente. La potencia reactiva del banco de capacitores se incremento en un 19.77%. La corriente nominal del capacitor basada en el voltaje y su potencia nominales se calcula como sigue:

$$I_{\text{Nom}} = \frac{Q_{\text{Nom}} [\text{KVAR}]}{\sqrt{3} * V_{\text{Nom}} [\text{KV}]}$$

$$I_{\text{Nom}} = \frac{12.51 [\text{MVAR}]}{\sqrt{3} * 25261.47 [\text{V}]}$$

$$I_{\text{Nom}} = 285.91 [\text{A}]$$

Ésta corriente RMS que fluirá por el filtro

Basados en la norma IEEE 1036-1992, la corriente RMS total a través del capacitor del filtro deberá ser menor que 121% de la corriente nominal del capacitor basada en el voltaje y KVAR nominales. La corriente RMS nominal del filtro (incluyendo armónicas) es 285.91 [A] rms y es la nominal del banco de capacitores considerando la peor condición que es cuando se suman aritméticamente los voltajes armónicos. Por lo tanto, el filtro estará compuesto por reactores de 0.477Ω en serie con el banco de capacitores con capacidad de 12.51 [MVAR] para 25.3 [KV].

La revisión final en el diseño del filtro de armónicas es la verificación del calentamiento del dieléctrico del capacitor del filtro y se evalúa por la desigualdad siguiente:

$$\left| \sum_h V(h) * I(h) \right| \leq \left| 1.33 * Q_{Nom} \right|$$

$$|3 * [(13404.35 * 262.82) + (536.13 * 52.56) + (273.59 * 37.55) + (110.77 * 23.898) + \dots + (9.79 * 7.1)]| \leq |1.33 * 12.51 MVAR|$$

$$|3 * 3.568 [MVAR]| \leq |16.63 [MVAR]|$$

$$|10.703 [MVAR]| \leq |16.63 [MVAR]|$$

Basados en la norma IEEE 1036-1992, la desigualdad se cumple con un margen substancial y el calentamiento del dieléctrico del diseño propuesto es satisfactorio.

5.10.4.4 ARREGLO DEL BANCO DE CAPACITORES

Basados en el método de sobredimensionamiento del banco de capacitores:

$$Q_{Nominal} = \frac{(25261.47)^2}{51.002} = 12.51 MVAR$$

El filtro estará conformado por reactores de 0.477Ω y un banco de capacitores trifásico de 12.51 MVAR, en 23 kV. El banco de capacitores estará formado por 1 grupo serie con 8 unidades capacitoras (U.C.) en paralelo de 521.25 kVAR y 13.28 kV cada una, fabricadas en base a la norma IEEE-Std-1036.

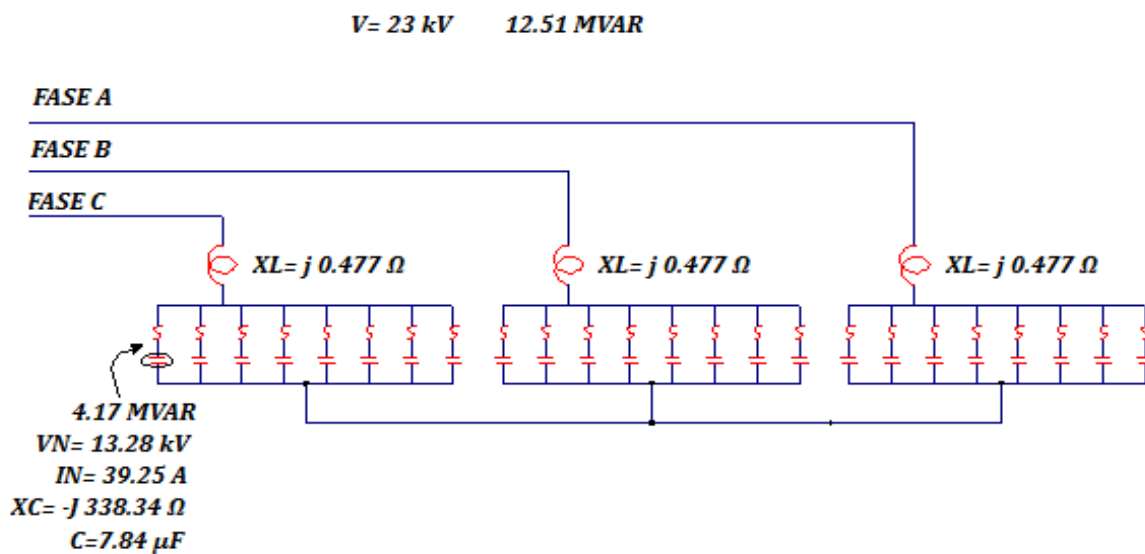


Figura 5.23 –Arreglo de banco de capacitores

Aplicando el concepto de gradiente de potencial a unidades capacitivas un posible diseño sería el siguiente:

1- Voltaje por bobina:

$$V_B = \frac{13280}{13} = 1021.54 \text{ V}$$

2- Gradiente de potencial de operación:

$$\frac{V}{\mu - M} = \frac{1021.54}{27.2} = 37.56 \frac{V}{\mu - M}$$

3- Capacitancia de la unidad capacitiva (U.C.)

$$C_N = \frac{0.52125}{13.28^2 * 2\pi * 60} = 7.26\mu F$$

4- Capacitancia por bobina o elemento

$$C_B = \frac{C_{U.C.} * B_S}{B_P} = \frac{7.26 * 13}{3} = 31.46\mu F$$

Un posible diseño de las unidades capacitivas es el siguiente, (U.C.) de 521.25kVAR y 13.28kV nominales formada por 13 grupo serie con tres bobinas en paralelo por cada grupo serie, con dos películas de polipropileno de 13.6μ – M de espesor entre bobinas como dieléctrico.

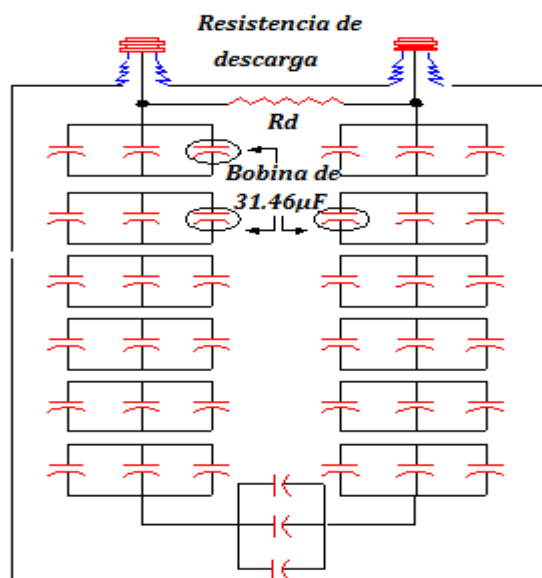


Figura 5.24 – Arreglo de unidad capacitiva

5.10.4.5 DIMENSIONAMIENTO DEL CONDUCTOR DEL FILTRO

El conductor se selecciona a partir de la corriente que demande el filtro de armónicos, esto se puede hacer por dos métodos; ampacidad o por caída de tensión. Para este ejemplo el conductor se dimensionara por ampacidad.

$$I = \frac{KVA * 1000}{\sqrt{3} * V}$$

$$I = \frac{4170 * 1000}{\sqrt{3} * 23000} = 104.7 \text{ A}$$

$$I = 104.7 * 1.35 = 141.35 \text{ A}$$

Esta es la capacidad de corriente que deberá soportar el conductor.

5.10.4.6 ANÁLISIS ARMÓNICO CON EL FILTRO

Simulando el sistema con el filtro de armónicos y midiendo la distorsión armónica total (THDi). La THDi = 2.49% y el THDv = 2.63%, la cual esta dentro de la norma IEEE-519-1992, esta tomada en el lado de baja del transformador. En las siguientes figuras se muestran las formas de onda de la señal con el filtro de armónicos.

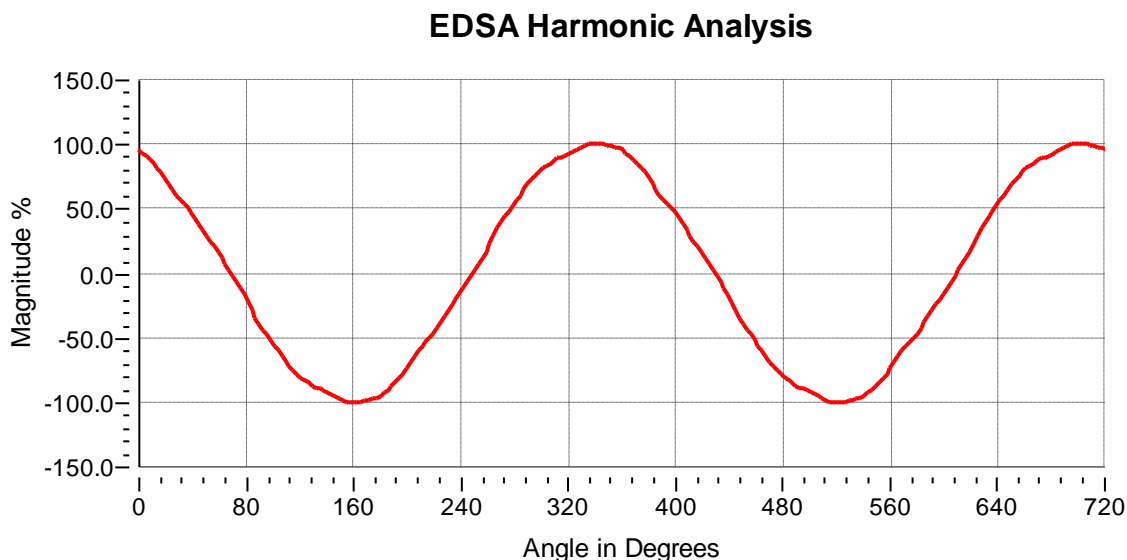


Figura 5.25 – Forma de onda de corriente en el PAC

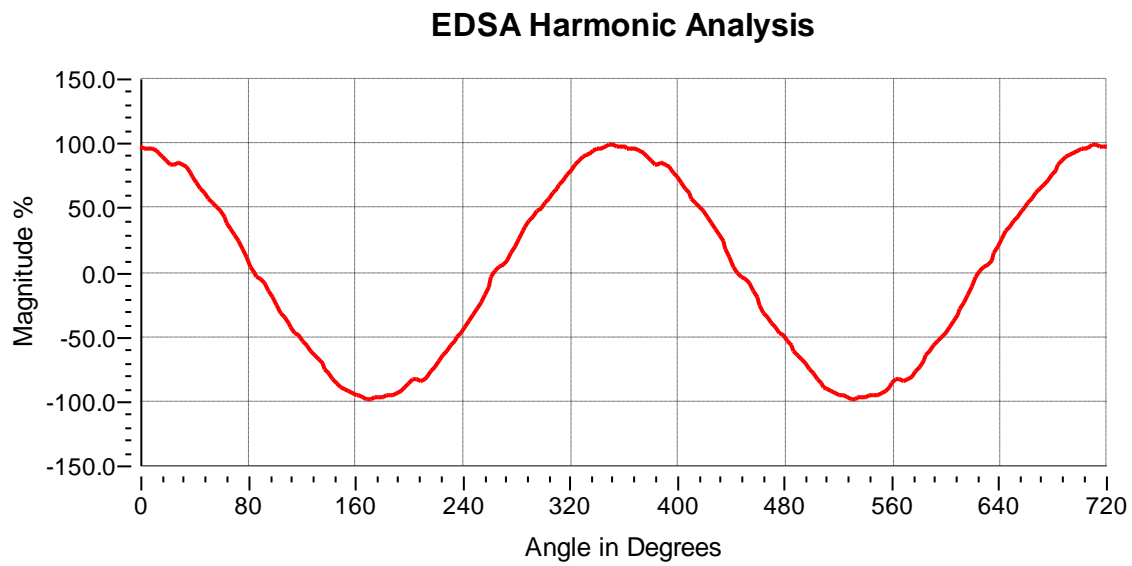


Figura 5.26 – *Forma de onda de Voltaje en el PAC*

CONCLUSIONES

La elaboración de esta tesis cumple con la descripción del diseño y la aplicación de filtros de armónicas. Se describen los tipos de filtros de armónicas como son; filtros sintonizados los cuales pueden filtrar una determinada armónica y filtros paso altas que filtran armónicas de orden mayor.

Con esta tesis se muestran las características esenciales para un adecuado diseño del filtro tomando en cuenta las configuraciones y especificaciones de los componentes del mismo, como son factor de calidad, factor de potencia, límites de distorsión de armónicos y capacidad de aguante del equipo.

Se discutieron varios aspectos del diseño del filtro, como son la ubicación y configuración del filtro, mostrando como las capacidades de los componentes son identificadas y verificadas para propósitos de especificación, esto es para obtener una mejor calidad de la energía.

Se logro la conjunción de normas de cada componente del filtro de armónicas para establecer una guía que sirva como base para el diseño de filtros de armónicas.

ANEXO A**1- LÍMITES DE DISTORSIÓN DE VOLTAJES ARMÓNICOS****NORMA IEEE 519 – 1992**

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

Tabla A – Límites máximos de distorsión armónica total en tensión en el punto de acometida, para alta tensión

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

Tabla B Límites máximos de distorsión armónica total en tensión en el punto de acometida para baja tensión

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

Tabla C - Desbalance máximo permitido en la tensión en el punto de acometida**IEC (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION)****NORMA IEC 61000-2-2 LÍMITES PARA REDES DE BAJO VOLTAJE**

Armónicas	Impares	Armónicas	Pares	Armónicas	Triples
h	HDv(%)	h	HDv(%)	h	HDv(%)
5	6	22	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3	8	0.5	≥21	0.2
17	2	10	0.5		
19	1.5	≥12	0.2		
23	1.5				
25	1.5				

≥ 29	x				
-----------	---	--	--	--	--

Tabla D – Límites para redes de bajo voltaje

THDv(%) \leq 8% para todas las armónicas hasta 40.

$$x = 0.2 + 12.5/h \text{ para } h = 29,31,35,37; HD_v = 0.63, 0.56, 0.54\%$$

NORMA IEC 61000-2-4 LÍMITES PARA PLANTAS INDUSTRIALES

Armónicas Impares		Armónicas Pares		Armónicas Triples	
h	HDv(%)	h	HDv(%)	h	HDv(%)
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3	8	0.5	≥ 21	0.2
17	2	10	0.5		
19	1.5	≥ 12	0.2		
23	1.5				
25	1.5				
≥ 29	x				

Tabla E – Límites para redes en plantas industriales

$$x = 0.2 + 12.5/h \text{ para } h = 29,31,35,37; HD_v = 0.63, 0.56, 0.54\%$$

NORMA IEC 61000-2-4 CLASE 3

Armónicas Impares		Armónicas Pares		Armónicas Triples	
h	HDv(%)	h	HDv(%)	h	HDv(%)
5	8	2	3	3	6
7	7	4	1.5	9	2.5
11	5	≥ 6	1	15	2
13	4.5			21	1.75
17	4			≥ 27	1
19	4				
23	3.5				
25	3.5				
≥ 29	y				

Tabla F – Límites de Distorsión Armónica de Voltaje

$$y = 5\sqrt{11/h} \text{ para } h = 29,31,35,37; HD_v = 3.1, 3.0, 2.8, 2.7\%$$

NORMAS EUROPEAS EN (EUROPEAN NORMS)**NORMA EN - 50160**

Armónicas Impares		Armónicas Pares		Armónicas Triples	
h	HDv(%)	h	HDv(%)	h	HDv(%)
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6... 24	0.5	15	0.5
13	3			21	0.5
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

Tabla G – Límites de Distorsión Armónica para bajo voltaje

Armónicas Impares		Armónicas Pares		Armónicas Triples	
h	HDv(%)	h	HDv(%)	h	HDv(%)
5	6	2	2	3	5*
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6... 24	0.5	15	0.5
13	3			21	0.5
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

Tabla H – Límites de Distorsión Armónica para medio voltaje ($1kV < V < 35kV$)**NORMAS NORSOK (NORWEGIAN OIL INDUSTRY ASSOCIATION)****NORSOK E-001**

	HDv(%)	THDv(%)	IEC 61000-2-4
ALTO VOLTAJE (>1kV) barras	6	8	Clase 2
Bajo voltaje (< 1 kV) barras	8	10	Clase 3

Tabla I – Límites de Distorsión Armónica según la NORSOK E - 001**2- LÍMITES DE DISTORSIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS****NORMA IEEE 519 - 1992****SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN 120V – 69 kV**

Impedancia Relativa (Isc / IL)	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	h≥35	Distorsión Armónica Total de Corriente en % (THDi)
(Isc / IL) < 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 ≤ (sc / IL) < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 ≤ (Isc / IL) < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 ≤ (Isc / IL) < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
(Isc / IL) ≥ 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabla J – Límites de Distorsión Armónica (H_{Di} %), para sistemas de distribución para armónicas impares

Sistemas de Subtransmisión 69Kv – 161 Kv

Impedancia Relativa (Isc / IL)	h<1 1	11≤h<17 17	17≤h<23 23	23≤h<35 35	h≥3 5	Distorsión Armónica Total de Corriente en %THD
(Isc / IL) < 20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 ≤ (Isc / IL) < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 ≤ (Isc / IL) < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 ≤ (Isc / IL) < 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
(Isc / IL) ≥ 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

Tabla K – Límites de Distorsión Armónica (H_{Di} %), para sistemas de subtransmisión para armónicas impares

SISTEMAS DE TRANSMISIÓN (> 161 Kv)

Impedancia Relativa (Isc / IL)	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	h≥35	Distorsión Armónica Total de Corriente en % (TDD%)
(Isc / IL) < 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
(Isc / IL) ≥ 50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Tabla L – Límites de Distorsión Armónica (H_{Di} %), para sistemas de Alto Voltaje para armónicas impares

NORMA DE LA COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD CFE-L000045

Impedancia Relativa (Isc / IL)	h<11 %HDi	11≤h<17 %HDi	17≤h<23 %HDi	23≤h<35 %HDi	h≥35 %HDi	Distorsión Armónica Total de Corriente en (% THD)
(Isc / IL) < 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 ≤ (Isc / IL) < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 ≤ (Isc / IL) < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 ≤ (Isc / IL) < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
(Isc / IL) ≥ 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabla M - Límites máximos de distorsión armónica total e individual de corriente. Para baja, media y alta tensión hasta 69 kV (para armónicas impares)

Impedancia Relativa (Isc / IL)	h<11 % HDi	11≤h<17 % HDi	17≤h<23 % HDi	23≤h<35 % HDi	h≥35 % HDi	Distorsión Armónica Total de Corriente en (% THD)
(Isc / IL) < 20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 ≤ (Isc / IL) < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 ≤ (Isc / IL) < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 ≤ (Isc / IL) < 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
(Isc / IL) ≥ 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

Tabla N - Límites máximos de distorsión armónica total de corriente y de CAIMC. Para alta tensión (mayor de 69 kV y hasta 161 kV), para armónicas impares.

Impedancia Relativa (Icc / IL)	h<11 % HDi	11≤h<17 % HDi	17≤h<23 % HDi	23≤h<35 % HDi	h≥35 % HDi	Distorsión Armónica Total de Corriente (% THD)
(Icc / IL) < 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
(Icc / IL) ≥ 50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Tabla Ñ - Límites máximos de distorsión armónica total de corriente y de CAIMC. Para alta tensión (mayor de 161 kV), para armónicas impares.

NORMA IEC

h	3	5	7	9	11	13	15	...39
Max I_{h_r} A	2.3	1.14	0.77	0.40	0.33	0.21	0.15x15/h	

Tabla O – Límites de distorsión armónica de corriente. (Corriente de entrada al equipo < 16 A por fase)

NORMA NORSOK

I_{sc}/I_L	6 Pulsos (S_{conv}/S_L en %)	12 Pulsos (S_{conv}/S_L en %)
(I_{sc} / I_L) < 20	17	36
$20 \leq (I_{sc} / I_L) < 50$	27	57
$50 \leq (I_{sc} / I_L) < 100$	40	86
$100 \leq (I_{sc} / I_L) < 1000$	50	100
(I_{sc} / I_L) > 1000	67	100

Tabla P – Límites de distorsión armónica de corriente para convertidores de 6 y 12 pulsos.

ANEXO B

SERIE TRIGONOMÉTRICA DE FOURIER

Las series de Fourier permiten representar funciones periódicas mediante combinaciones de senos y cosenos (serie trigonométrica de Fourier) o de exponenciales (forma compleja de la serie de Fourier)

Si f es una función periódica de periodo $2T$ seccionalmente continua admite la siguiente representación en los puntos de continuidad:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi t}{T} + b_n \operatorname{sen} \frac{n\pi t}{T} \right)$$

Donde:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_a^{a+2T} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_a^{a+2T} f(t) \cos \frac{n\pi t}{T} dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_a^{a+2T} f(t) \operatorname{sen} \frac{n\pi t}{T} dt$$

Algunas funciones periódicas $f(t)$ de periodo T pueden expresarse por la siguiente serie, llamada *Serie Trigonométrica de Fourier*

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + a_1 \cos(\omega_0 t) + a_2 \cos(2\omega_0 t) + \dots + b_1 \operatorname{sen}(\omega_0 t) + b_2 \operatorname{sen}(2\omega_0 t) + \dots$$

$$\text{Donde: } \omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

Es decir

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \operatorname{sen}(n\omega_0 t)]$$

Así, una función periódica $f(t)$ se puede escribir como la suma de **componentes sinusoidales** de diferentes frecuencias; $\omega_n = n\omega_0$

A la componente sinusoidal de frecuencia $n\omega_0$: $C_n * \cos(n\omega_0 t + \theta_n)$ se le llama la **enésima armónica** de $f(t)$.

A la primera armónica ($n=1$) se le llama la **componente fundamental** y su periodo es el mismo que el de $f(t)$

A la frecuencia $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T}$ se le llama **frecuencia angular fundamental**.

A la componente de frecuencia cero C_0 se le llama **componente de corriente directa** (cd) y corresponde al valor promedio de $f(t)$ en cada periodo.

Los coeficientes C_n y los ángulos θ_n son respectivamente las **amplitudes** y los **ángulos de fase** de las *armónicas*.

Un ejemplo de la componente de corriente directa es:

La función siguiente tiene;

$$f(t) = 1 + \cos\left(\frac{t}{3}\right) + \cos\left(\frac{t}{4}\right)$$

Tiene tantas partes arriba como abajo de 1 por lo tanto, su componente de CD es 1.

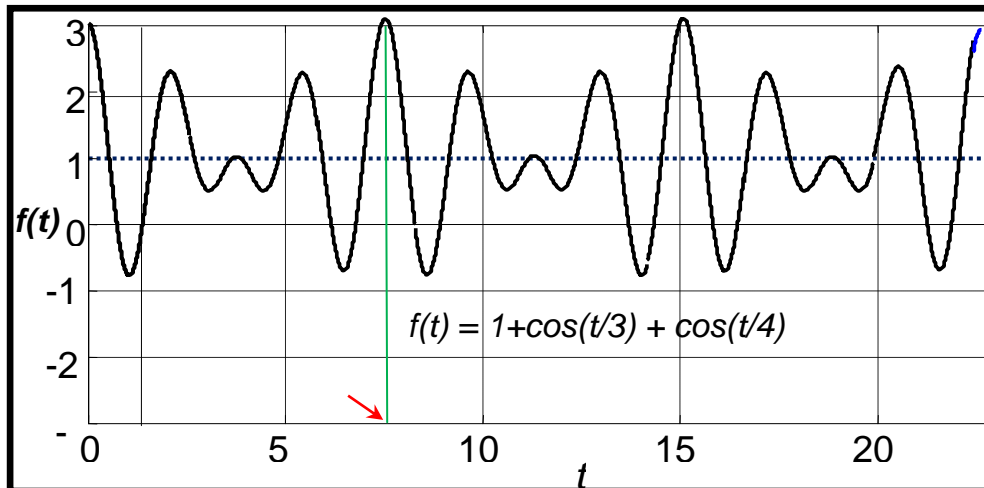


Figura B.1 - Función con componente de corriente directa

Ejemplo: Encontrar la Serie de Fourier para la siguiente función de periodo T :

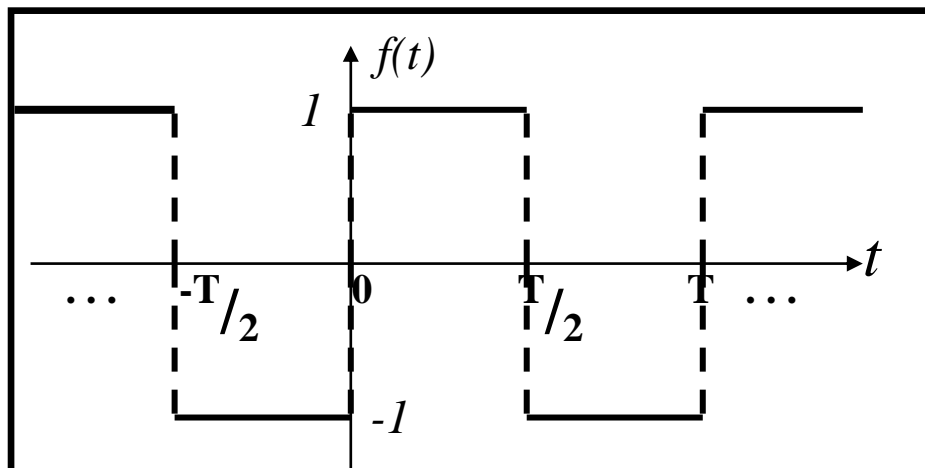


Figura B.2 – Función de periodo T

Solución: La expresión para $f(t)$ en $-T/2 < t < T/2$ es:

Coefficiente a_0 :

$$f(t) = \begin{cases} -1 & \text{para } -\frac{T}{2} < t < 0 \\ 1 & \text{para } 0 < t < \frac{T}{2} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \\ &= \frac{2}{T} \left[\int_{-T/2}^0 -dt + \int_0^{T/2} dt \right] \\ &= \frac{2}{T} \left[-t \Big|_{-T/2}^0 + t \Big|_0^{T/2} \right] = 0 \end{aligned}$$

Coefficientes a_n :

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \\ &= \frac{2}{T} \left[\int_{-T/2}^0 -\cos(n\omega_0 t) dt + \int_0^{T/2} \cos(n\omega_0 t) dt \right] \\ &= \frac{2}{T} \left[-\frac{1}{n\omega_0} \operatorname{sen}(n\omega_0 t) \Big|_{-T/2}^0 + \frac{1}{n\omega_0} \operatorname{sen}(n\omega_0 t) \Big|_0^{T/2} \right] \\ &= 0 \quad \text{para } n \neq 0 \end{aligned}$$

Coefficientes b_n :

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \operatorname{sen}(n\omega_0 t) dt \\ &= \frac{2}{T} \left[\int_{-T/2}^0 -\operatorname{sen}(n\omega_0 t) dt + \int_0^{T/2} \operatorname{sen}(n\omega_0 t) dt \right] \\ &= \frac{2}{T} \left[\frac{1}{n\omega_0} \cos(n\omega_0 t) \Big|_{-T/2}^0 - \frac{1}{n\omega_0} \cos(n\omega_0 t) \Big|_0^{T/2} \right] \\ &= \frac{1}{n\pi} [(1 - \cos(n\pi)) - (\cos(n\pi) - 1)] \\ &= \frac{2}{n\pi} [1 - (-1)^n] \quad \text{para } n \neq 0 \end{aligned}$$

Finalmente la Serie de Fourier queda como:

$$f(\omega t) = \frac{4}{\pi} \left[\text{sen}(\omega_0 t) + \frac{1}{3} \text{sen}(3\omega_0 t) + \frac{1}{5} \text{sen}(5\omega_0 t) + \dots \right]$$

En la siguiente figura se muestran: la suma parcial de los primeros cuatro términos de la serie (fundamental, 3, 5, 7, armónico).

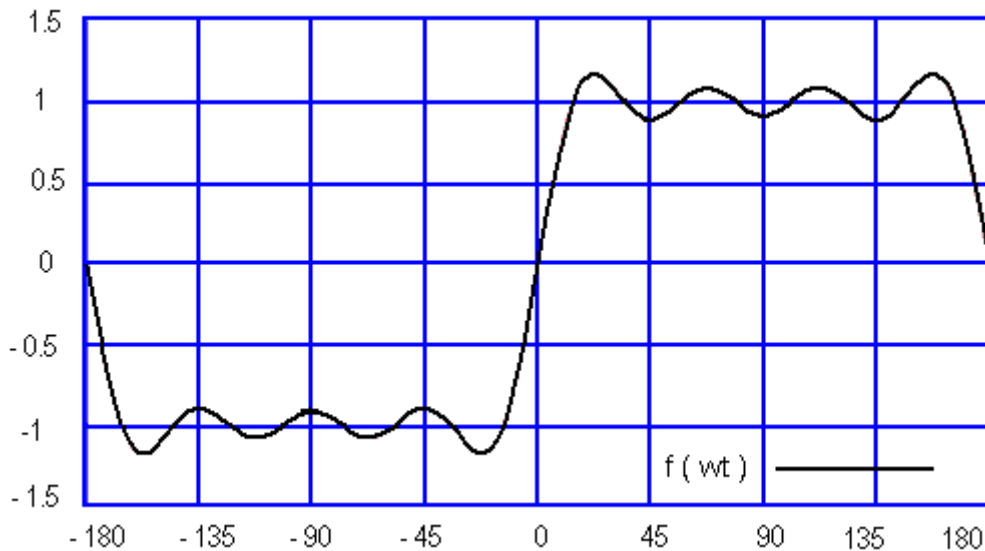


Figura B.3 - Gráfica de función en serie de Fourier

TRANSFORMADA DE FOURIER

Las series de Fourier permiten calcular la representación de funciones periódicas. Cuando existen funciones no periódicas se pueden asimilar a una periódica de periodo infinito. Con esta idea se llega a la transformada de Fourier de una función definida por:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

En base a ella se puede representar a la función f mediante una integral.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega$$

Ambas expresiones se suelen relacionar mediante la simbología.

$$f(t) \leftrightarrow F(\omega)$$

Estas expresiones nos permiten calcular la expresión $F(\omega)$ (dominio de la frecuencia) a partir de $f(t)$ (dominio del tiempo) y viceversa.

Ejemplo. Calcular $F(\omega)$ para el pulso rectangular $f(t)$ siguiente:

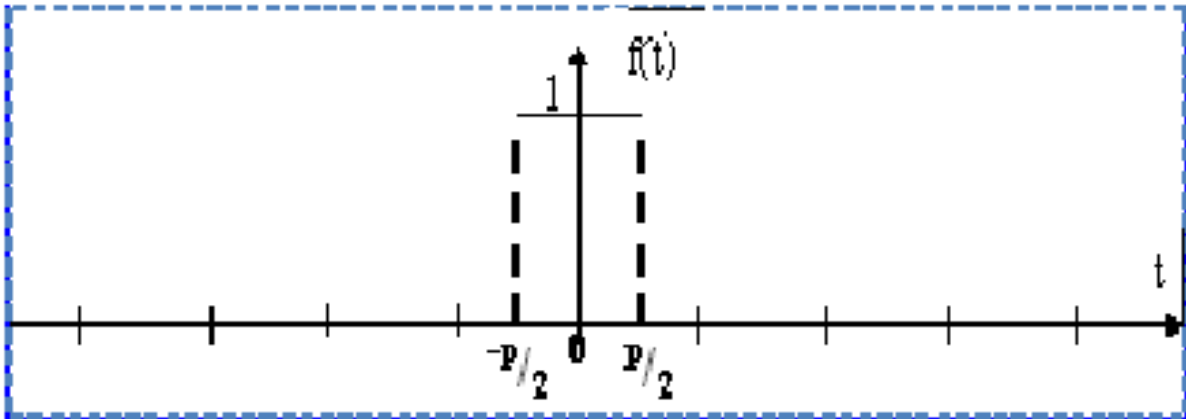


Figura B.4 – Pulso rectangular

La expresión en el dominio del tiempo de la función es:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < -\frac{p}{2} \\ 1 & -\frac{p}{2} < t < \frac{p}{2} \\ 0 & \frac{p}{2} < t \end{cases}$$

A partir de la integral de Fourier:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt = \int_{-p/2}^{p/2} e^{-j\omega t} dt$$

Integrando

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{-j\omega} e^{-j\omega t} \Big|_{-p/2}^{p/2} \\ &= \frac{1}{-j\omega} (e^{-j\omega p/2} - e^{j\omega p/2}) \end{aligned}$$

Usando la fórmula de Euler tenemos:

$$F(\omega) = p \frac{\text{sen}(\omega p/2)}{\omega p/2}$$

Graficando $F(\omega)$ con $p=1$

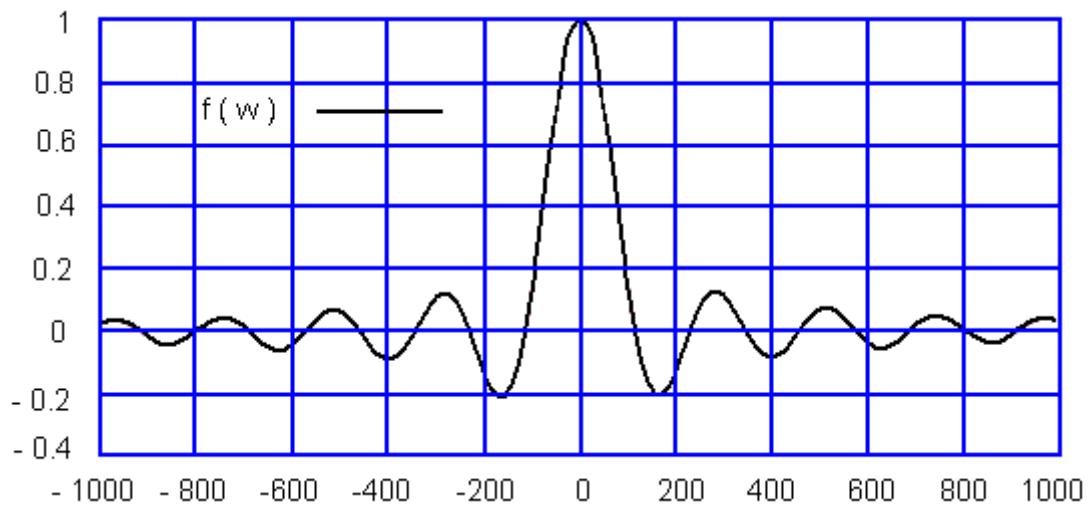


Figura B.5 – Transformada de Fourier de una función pulso rectangular

ANEXO C

BIL DEL SISTEMA PARA INTERRUPTORES Y ENSAMBLE DEL CAPACITOR

Máximo Voltaje Nominal (r.m.s)	Voltaje de aguante al impulso (pico)		Voltaje de aguante de corta duración
KV	Lista 1 kV	Lista 2 KV	kV
1.2	-	25	6
2.4	-	35	8
3.6	20	40	10
7.2	40	60	20
12	60	75	28
17.5	75	95	38
24	95	125	50
36	145	170	70

Tabla Q – Niveles de aislamiento estándar para voltajes nominales menores de 52 kV

Serie I (Para Europa y otros países)

Máximo Voltaje Nominal (r.m.s) en kV	Voltaje de aguante al impulso por descarga atmosférica nominal en kV	Voltaje de aguante de corta duración a la frecuencia del sistema 60 Hz (r.m.s.) en kV
1.30	30	6
2.75	45	13
5.5	75	24
15.5	95	30
19.8	125	36
27.5	150	50
38.0	200	70
48.3	250	95

Tabla R – Niveles de aislamiento estándar para voltajes nominales menores de 52 kV Serie II
(Para Norteamérica y otros países)

Máximo Voltaje nominal U_m (r.m.s.) kV	Valores de fase a neutro basados en $U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ Pico kV	Voltaje de aguante al impulso por descarga atmosférica nominal (pico) kV	Voltaje de aguante de corta duración a la Frecuencia del sistema (60 Hz) (r.m.s.) kV
52	42.5	250	95
72.5	59	325	140
123	100	450	185
145	118	550	230
170	139	650	275
245	200	750	325
		850	360
		950	395
		1050	460

Tabla S – Niveles de aislamiento para voltajes $52 \text{ kV} \leq U_m < 300 \text{ kV}$

1	2	3	4	5	6
Máximo Voltaje nominal U_m (r. m. s.) kV	Valores de fase a neutro basados en $U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ (Pico) kV	Voltaje de aguante al impulso por Cambios (pico)		Proporción entre el Voltaje de aguante al impulso por descarga atmosférica y por cambios	Voltaje de aguante al impulso por descarga atmosférica nominal (pico) kV
		p.u.	kV		
300	245	3,06	750	1,13 1,27	850 950
362	296	3,47 2,86	850	1,12 1,24	1050
420	343	3,21 2,76	950	1,11 1,24	1175
525	429	3,06 2,45	1050	1,12 1,24	1300
765	625	2,74 2,08 2,28 2,48	1175 1300 1425 1550	1,11 1,36 1,21 1,10 1,32 1,19 1,09 1,38 1,26 1,16 1,26 1,47 1,55	1425 1550 1800 1950 2100 2400

Tabla T – Niveles de aislamiento para voltajes $U_m \geq 300$ Kv

ANEXO D

Multiplicadores para corregir el Factor de Potencia en Kilowatt

Corrección del Factor de Potencia

	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.0					
0.50	0.982	1.008	1.034	1.060	1.086	1.112	1.139	1.165	1.192	1.220	1.248	1.276	1.304	1.332	1.360	1.400	1.440	1.480	1.520	1.580	1.732					
0.51	0.937	0.962	0.989	1.015	1.041	1.067	1.093	1.120	1.146	1.172	1.200	1.226	1.254	1.281	1.320	1.358	1.396	1.434	1.480	1.540	1.687					
0.52	0.893	0.919	0.945	0.971	0.997	1.023	1.050	1.076	1.102	1.128	1.154	1.181	1.207	1.233	1.240	1.310	1.350	1.390	1.440	1.500	1.643					
0.53	0.850	0.876	0.902	0.928	0.954	0.980	1.006	1.032	1.058	1.084	1.110	1.136	1.162	1.188	1.200	1.270	1.310	1.350	1.400	1.390	1.450					
0.54	0.807	0.833	0.859	0.885	0.911	0.937	0.963	0.989	1.015	1.041	1.067	1.093	1.119	1.145	1.160	1.190	1.230	1.270	1.300	1.350	1.559					
0.55	0.764	0.790	0.816	0.842	0.868	0.894	0.920	0.946	0.972	0.998	1.024	1.050	1.076	1.102	1.120	1.150	1.190	1.220	1.260	1.310	1.519					
0.56	0.721	0.747	0.773	0.799	0.825	0.851	0.877	0.903	0.929	0.955	0.981	1.007	1.033	1.059	1.080	1.110	1.150	1.180	1.220	1.270	1.480					
0.57	0.678	0.704	0.730	0.756	0.782	0.808	0.834	0.860	0.886	0.912	0.938	0.964	0.990	1.016	1.040	1.070	1.110	1.140	1.180	1.230	1.442					
0.58	0.635	0.661	0.687	0.713	0.739	0.765	0.791	0.817	0.843	0.869	0.895	0.921	0.947	0.973	1.000	1.040	1.070	1.110	1.200	1.260	1.405					
0.59	0.619	0.645	0.671	0.697	0.723	0.749	0.775	0.801	0.827	0.853	0.879	0.905	0.931	0.957	1.000	1.040	1.070	1.110	1.160	1.220	1.369					
0.60	0.583	0.609	0.635	0.661	0.687	0.713	0.739	0.765	0.791	0.817	0.843	0.869	0.895	0.921	0.930	1.000	1.040	1.080	1.130	1.190	1.333					
0.61	0.549	0.575	0.601	0.627	0.653	0.679	0.705	0.731	0.757	0.783	0.809	0.835	0.861	0.887	0.900	0.970	1.000	1.040	1.090	1.150	1.299					
0.62	0.516	0.542	0.568	0.594	0.620	0.646	0.672	0.698	0.724	0.750	0.776	0.802	0.828	0.854	0.870	0.930	0.970	1.010	1.060	1.120	1.266					
0.63	0.483	0.509	0.535	0.561	0.587	0.613	0.639	0.665	0.691	0.717	0.743	0.769	0.795	0.821	0.830	0.900	0.940	0.980	1.030	1.090	1.233					
0.64	0.450	0.476	0.502	0.528	0.554	0.580	0.606	0.632	0.658	0.684	0.710	0.736	0.762	0.788	0.800	0.870	0.910	0.950	0.990	1.060	1.201					
0.65	0.417	0.443	0.469	0.495	0.521	0.547	0.573	0.600	0.626	0.652	0.678	0.704	0.730	0.756	0.770	0.840	0.880	0.920	0.960	1.020	1.169					
0.66	0.384	0.410	0.436	0.462	0.488	0.514	0.540	0.566	0.592	0.618	0.644	0.670	0.696	0.722	0.730	0.800	0.840	0.880	0.930	0.990	1.138					
0.67	0.351	0.377	0.403	0.429	0.455	0.481	0.507	0.533	0.559	0.585	0.611	0.637	0.663	0.689	0.700	0.770	0.810	0.850	0.900	0.960	1.108					
0.68	0.328	0.354	0.380	0.406	0.432	0.458	0.484	0.510	0.536	0.562	0.588	0.614	0.640	0.666	0.670	0.740	0.780	0.820	0.870	0.930	1.078					
0.69	0.295	0.321	0.347	0.373	0.399	0.425	0.451	0.477	0.503	0.529	0.555	0.581	0.607	0.633	0.640	0.710	0.750	0.790	0.840	0.900	1.049					
0.70	0.270	0.296	0.322	0.348	0.374	0.400	0.426	0.452	0.478	0.504	0.530	0.556	0.582	0.608	0.610	0.680	0.720	0.760	0.810	0.870	1.020					
0.71	0.247	0.273	0.299	0.325	0.351	0.377	0.403	0.429	0.455	0.481	0.507	0.533	0.559	0.585	0.590	0.660	0.700	0.740	0.790	0.840	0.992					
0.72	0.214	0.240	0.266	0.292	0.318	0.344	0.370	0.396	0.422	0.448	0.474	0.500	0.526	0.552	0.560	0.630	0.670	0.710	0.760	0.820	0.964					
0.73	0.181	0.207	0.233	0.259	0.285	0.311	0.337	0.363	0.389	0.415	0.441	0.467	0.493	0.519	0.520	0.590	0.630	0.680	0.730	0.790	0.936					
0.74	0.158	0.184	0.210	0.236	0.262	0.288	0.314	0.340	0.366	0.392	0.418	0.444	0.470	0.496	0.500	0.570	0.610	0.660	0.710	0.760	0.909					
0.75	0.135	0.161	0.187	0.213	0.239	0.265	0.291	0.317	0.343	0.369	0.395	0.421	0.447	0.473	0.470	0.540	0.580	0.630	0.670	0.730	0.882					
0.76	0.102	0.128	0.154	0.180	0.206	0.232	0.258	0.284	0.310	0.336	0.362	0.388	0.414	0.440	0.440	0.510	0.550	0.600	0.650	0.710	0.855					
0.77	0.079	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.235	0.261	0.287	0.313	0.339	0.365	0.391	0.417	0.410	0.480	0.520	0.570	0.620	0.680	0.829					
0.78	0.056	0.082	0.108	0.134	0.160	0.186	0.212	0.238	0.264	0.290	0.316	0.342	0.368	0.394	0.390	0.460	0.500	0.550	0.590	0.650	0.802					
0.79	0.023	0.049	0.075	0.101	0.127	0.153	0.179	0.205	0.231	0.257	0.283	0.309	0.335	0.361	0.360	0.430	0.470	0.520	0.570	0.630	0.776					
0.80	0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.208	0.234	0.260	0.286	0.312	0.338	0.340	0.410	0.450	0.490	0.540	0.600	0.750					
0.81		0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.208	0.234	0.260	0.286	0.312	0.310	0.380	0.420	0.460	0.510	0.570	0.720					
0.82			0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.208	0.234	0.260	0.286	0.280	0.350	0.390	0.430	0.480	0.540	0.690					
0.83				0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.208	0.234	0.260	0.250	0.320	0.360	0.400	0.450	0.510	0.660					
0.84					0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.208	0.234	0.220	0.290	0.330	0.370	0.420	0.480	0.630					
0.85						0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.208	0.190	0.260	0.300	0.340	0.390	0.450	0.600					
0.86							0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.160	0.230	0.270	0.310	0.360	0.420	0.570					
0.87								0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.130	0.200	0.240	0.280	0.330	0.390	0.540					
0.88									0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.100	0.170	0.210	0.250	0.300	0.360	0.510					
0.89										0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.070	0.140	0.180	0.220	0.270	0.330	0.480					
0.90											0.000	0.026	0.052	0.078	0.040	0.110	0.150	0.190	0.240	0.300	0.450					
0.91												0.000	0.030	0.060	0.090	0.120	0.160	0.200	0.250	0.310	0.460					
0.92													0.000	0.030	0.060	0.090	0.130	0.170	0.220	0.280	0.430					
0.93														0.000	0.030	0.060	0.100	0.140	0.190	0.250	0.400					
0.94															0.000	0.030	0.070	0.110	0.160	0.220	0.370					
0.95																0.000	0.030	0.070	0.120	0.180	0.330					
0.96																	0.000	0.030	0.070	0.120	0.180	0.330				
0.97																		0.000	0.030	0.070	0.120	0.180	0.330			
0.98																			0.000	0.030	0.070	0.120	0.180	0.330		
0.99																				0.000	0.030	0.070	0.120	0.180	0.330	
1.00																					0.000	0.030	0.070	0.120	0.180	0.330

0.96																0.000	0.041	0.089	0.149	0.292
0.97																	0.000	0.048	0.108	0.251
0.98																		0.000	0.060	0.203
0.99																			0.000	0.143
																				0.000

Tabla U – *Multiplicador para corregir Factor de Potencia*

ANEXO E

TIPOS DE FILTROS DE ARMÓNICAS

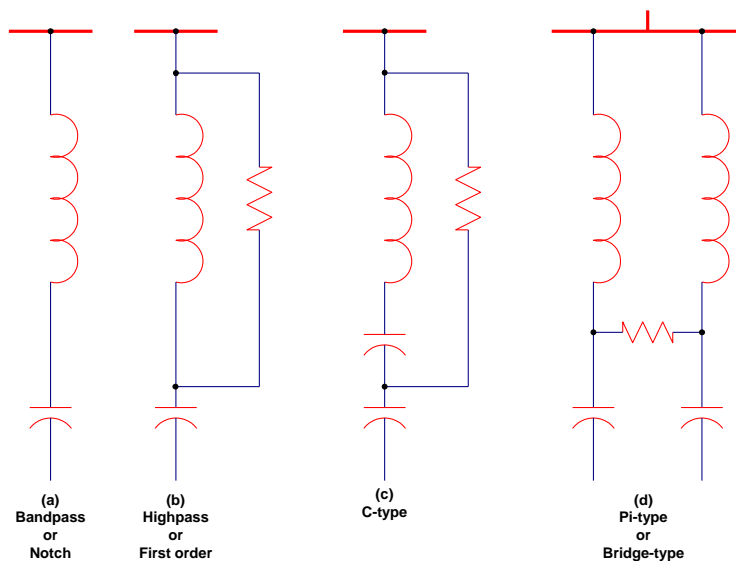


Figura E.1 – *Tipos de filtros de armónicas comúnmente aplicados*

- a) El filtro de armónicas Paso Banda es el tipo más simple y ampliamente aplicado. La ventaja es su impedancia casi cero a la frecuencia resonante o de sintonía y realiza el filtrado casi perfecto a esta frecuencia. Un inconveniente es el alto valor de impedancia con la red (resonancia paralelo) a una frecuencia cercana a la de sintonía que puede amplificar otras armónicas creando posiblemente un nuevo problema armónico. Tiene un filtrado pobre de armónicas superiores a la frecuencia de sintonía.
- b) El filtro Paso Altas atenúa armónicas de la frecuencia de sintonía y otras de mayor frecuencia. Filtra armónicas de la 7^a u 11ava hacia arriba y también puede amortiguar efectivamente las oscilaciones tipo ranura o muesca (Notch) de alta frecuencia. Se podría seleccionar la resistencia para atenuar la resonancia paralelo de menor orden. La resistencia puede consumir alta potencia de frecuencia fundamental, por consiguiente, normalmente se aplica a filtros mayores de 5^a armónica.
- c) El filtro armónico tipo C tiene un desempeño muy similar al filtro paso altas, con la ventaja que la resistencia no consume potencia fundamental a los parámetros nominales. Por esta razón, es principalmente aplicado donde la atenuación es requerida para filtros de 5^a armónica y menores. Se usa frecuentemente instalaciones con hornos del arco eléctrico o con ciclo convertidores para evitar amplificaciones de bajo-orden y armónicas no-enteras.
- d) El filtro tipo Pi (π) es esencialmente dos filtros tipo paso banda enlazados con una resistencia. La ventaja principal de este filtro el buen desempeño del filtrado en ambas frecuencias de sintonía o resonantes, con muy buena atenuación de las resonancias paralelo. Típicamente la resistencia puede ser de menor capacidad que la contenida en los filtros paso altas o tipo C. A veces puede ahorrarse una resistencia comparada con la instalación de dos filtros paso altas o dos tipo C. Una restricción es que las dos piernas del filtro deben conmutarse como un grupo de filtros.

ANEXO F

ESPECIFICACIONES DE FILTROS DE ARMÓNICAS

Los filtros de armónicos de media tensión son diseñados para sistemas de potencia comercial, industrial, y de utilidad que requieren corrección de factor de potencia, control de armónicos, cumplimiento de IEEE 519, capacidad de sistema reducido y mejorar la regulación de de tensión.

Estos filtros ya sea para uso interior y exterior tienen accesorios para cumplir virtualmente con todos los requerimientos y configuraciones deseadas en todo tipo de instalaciones. Filtros de una y varias etapas, sintonizado simple y múltiple, con o sin configuraciones pasa altos.

Los filtros de armónicas de media tensión están diseñados para ser conectados en cualquier lugar del sistema eléctrico. Típicamente son conectados en el punto medio entre la fuente de suministro y el cliente.

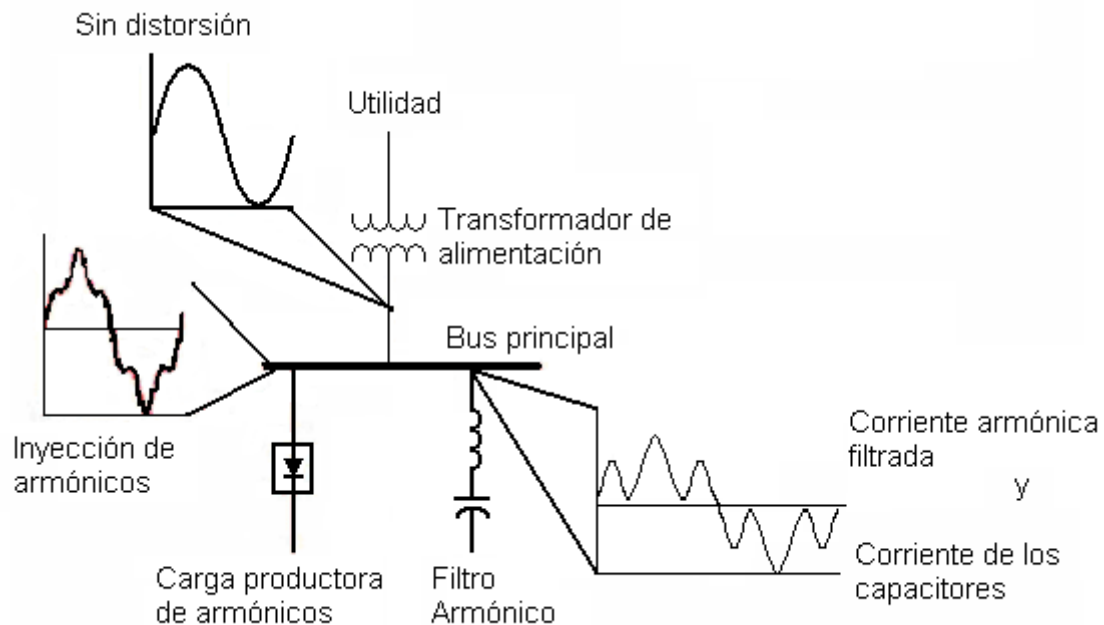


Figura F.1 - Los filtros de armónicos reducen la distorsión armónicos de tensión y corriente y corrigen el factor de potencia.

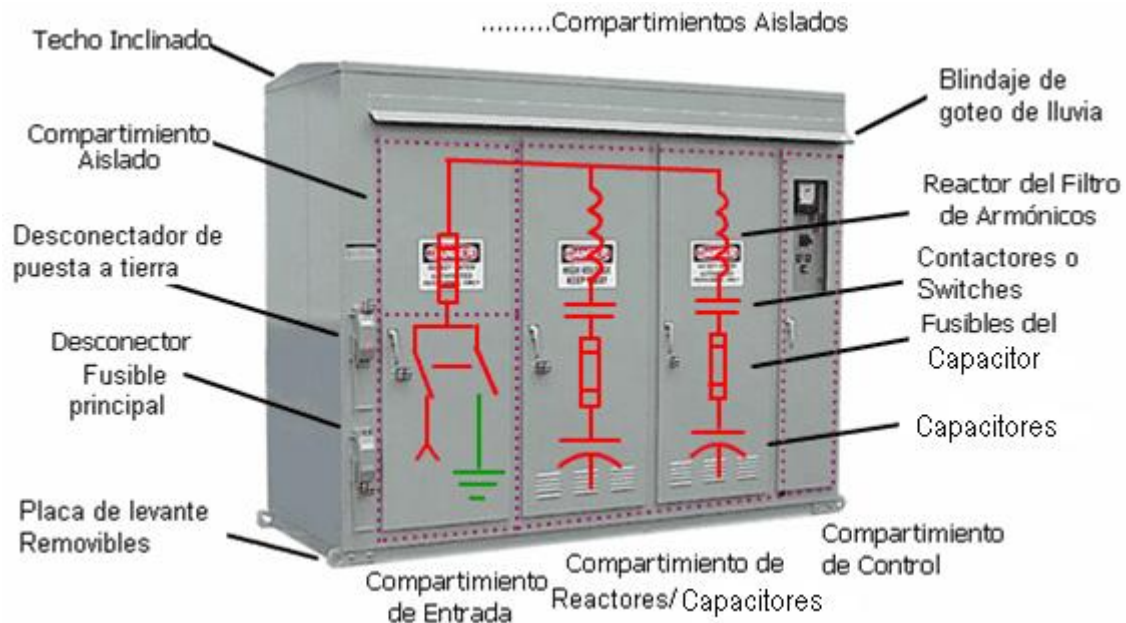


Figura F.2 - Típico Filtro Armónicos Automático de Dos Etapas Mostrando las Características de Ubicación de los Compartimientos Aislados.

Características Estándares

Gabinete

Los gabinetes deben de ser autosoportados, con compartimientos, completamente soldado, estructura metálica de Acero Galvanizado, con puertas, bisagras y manillas de acero inoxidable. El gabinete está pintado con pintura epóxica anticorrosiva ANSI gris-61. El nivel de protección Standard es NEMA 3R; NEMA 12 y 4X están disponibles en forma opcional. Las puertas y ventanas son estándar.

Capacitores

Capacitores de doble aislador y bajas pérdidas que alcanzan o exceden los estándares de *IEC 871*, *IEEE 18*. Los capacitores están conectados en Y levantados de tierra como configuración estándar. Las resistencias de descarga interna reducen la tensión residual a menos de 50 volts dentro de los 5 minutos desde la desenergización. El fluido dieléctrico no daña el medio ambiente, es biodegradable, sin PCB, y de baja toxicidad. Los capacitores con fusibles internos están disponibles a medida que se necesiten.

Desconector fusible bajo carga

El desconector fusible de operación externa, proporciona la "interrupción visible" requerida por la norma NEC. Este desconector se encuentra localizado en los compartimientos separados que permite tanto a fusibles principales y al resto de los otros compartimientos (Capacitores y rectores) ser intervenidos sin necesidad de desenergizar el conductor eléctrico principal que alimenta el banco.

Sistema de Detección de Fusible Quemado

Un sistema de detección mediante un actuador mecánico de golpe es suministrado para cada etapa los relees tienen un punto de alarma y otro de desconexión. El punto de desconexión permite desconectar los capacitores para no causar daño a los restantes al momento de producirse una falla.

Desconector de Puesta a Tierra.

Se proporciona un desconector de puesta a tierra enclavado para colocar a tierra los terminales de carga del desconector principal o los capacitores para manutención segura del equipo.

Fusibles de Entrada Principales

Los fusibles principales de entrada proporcionan protección para el conductor eléctrico principal y protección de respaldo para todo el filtro de armónicos.

Apartarrayos

Las apartarrayos de clase de distribución reforzados protegen el filtro de armónicos de los relámpagos y de los transitorios de conmutación.

Reactores del Filtro Armónicos

Los reactores de filtro de núcleo de hierro proporcionan la reactancia necesaria para sintonizar el banco de capacitores a la frecuencia deseada. Además de la sintonización, los reactores reducen significativamente la frecuencia y magnitud de las corrientes de irrupción durante la conmutación del banco de capacitores.

Contactores de Vacío

Cada etapa está controlada por contactores o switches de vacío de larga vida y bajo mantenimiento (para tensión de menos de 6,6kV).

Fusibles de los capacitores

Cada capacitor se provee individualmente con fusibles limitadores de corriente de 40kA. Los fusibles están equipados con indicadores de fusible quemado.

Transformador de Control

Se puede colocar un transformador de potencial para el control, protección y operación del filtro de armónicos.

Barra Conductora Principal y De Puesta a Tierra.

Una barra plateada de cobre de $\frac{1}{4}$ " por 2" es proporcionada a través del ancho del gabinete para asistir en la puesta a tierra durante el mantenimiento del equipo. Todo el conductor eléctrico de las fases se encuentra plateado y está diseñado como mínimo a 135% de la corriente nominal del banco de capacitores. }

Controlador Automático de Serie de Filtro Armónico

Las etapas del banco son controladas automáticamente por uno de una variedad de controladores que pueden conectar o desconectar las etapas frente a cambios de corriente, carga reactiva, factor de potencia, temperatura, hora del día, impulso de tarificación o tensión.

Controles Auxiliares

Selectores On/Off Automáticos estándar con indicadores de etapas on y off. Los controles previenen la re-energización de una fase de filtro en menos de 5 minutos. Los controles estándares de cerrado previenen los filtros sintonizados de alta frecuencia. Las luces del gabinete están en los compartimientos de control, fusibles de entrada principal y capacitores. Se suministra un conveniente conducto de escape en el compartimiento de control.

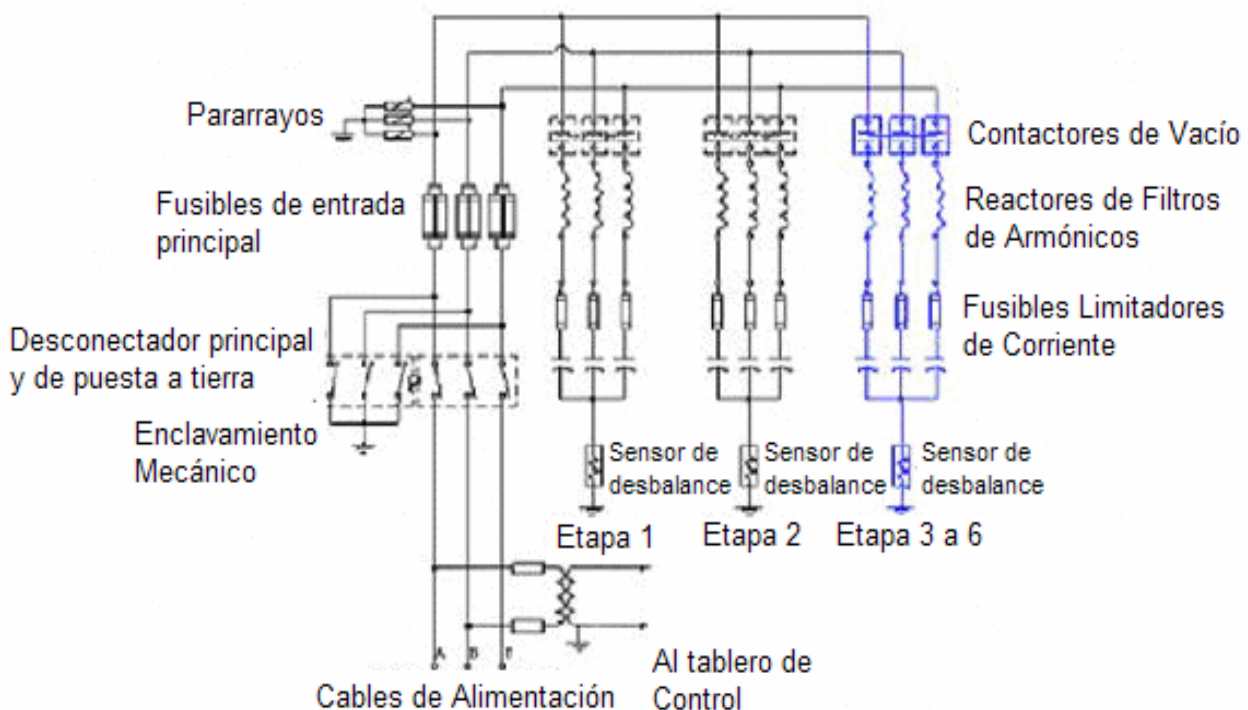


Figura F.3 – Típico Diagrama de Tres Líneas. Número de Etapas, Evaluaciones y Configuración Específica del Banco y Componentes son Dependientes de la Evaluación de Tensión, Carga Armónica, Requerimientos de Sintonización y Requerimientos del Cliente

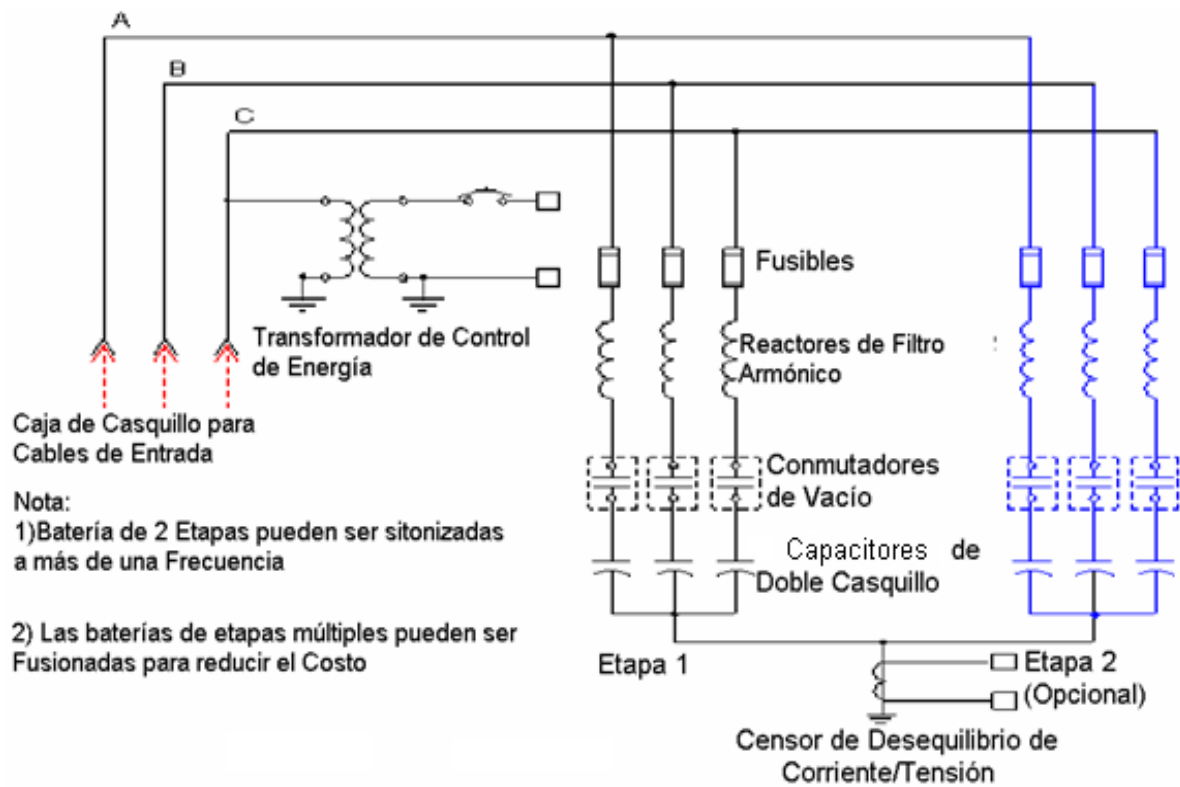


Figura F.4 – *Típica Clasificación de Diagrama de Tres Líneas, Configuración Específica de Bancos, Componentes y Dependientes de los Requerimientos del Cliente y Clasificación de Tensión.*

REFERENCIAS

- Libros

- WAKILEH, George J., *Power Systems Harmonics –Fundamentals, Analysis and filter design-* Austria, ed., Springer, 2001.
- RAÚLL, Martín José, *Diseño de subestaciones eléctricas*, México, UNAM Facultad de Ingeniería, 2ª. ed., 2000.
- SANKARAN C., *Power quality*, Washington, D.C., ed. CRC PRESS, 2001.
- MADRIGAL, Manuel, *Power Systems Harmonics –Computer Modeling and Analysis*, England, ed. John Wiley & Sons, LTD, 2002.
- ELMORE, Walter A., *Protective Relaying, Theory and Applications*, New York USA, ed. Marcel Dekker, Inc., 1994.
- EDSA Software Micro Corporation, 2005

- Normas

- IEEE C57.16-1996
- IEEE STD.32-1972
- IEEE STD.141-1993
- IEEE STD.142-1991
- IEEE STD.551-2006
- IEEE STD.1531-2003
- IEEE STD.C37.48-1997
- IEEE C37.99-1990
- IEEE C37.04-1999
- IEEE C37.012-1979
- IEEE STD.C57.12.00-2000
- IEEE STD.C57.110-1998
- IEEE.STD.C62.22-1997
- IEEE STD.18-2002
- IEEE STD.1036
- IEEE 519-1992
- NOM-SEDE-001-2005