



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DIMENSIONAMIENTO Y
ESPECIFICACIÓN DE UN FILTRO DE
ARMÓNICAS PARA UN PARQUE
EÓLICO**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A N

JOSÉ LUIS RODRÍGUEZ TÉLLEZ

ELIAB EMMANUEL VEGA RUIZ

DIRECTOR DE TESIS

ING. FRANCISCO CUEVAS ARTEAGA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a cada profesor que formó parte de mi carrera universitaria, a esta bella facultad y sobre todo a esta magnífica institución educativa, “por mi raza hablara el espíritu”.

Agradezco al Ing. Francisco Cuevas Arteaga por ser asesor de esta tesis de proporcionarnos la información y los conocimientos suficientes para elaborarla así mismo agradecer a nuestros sinodales por sus conocimientos.

Madre, quiero darte las gracias por darme vida y apoyarme a cada momento, por escucharme y aconsejarme, sin ti no hubiera alcanzado muchas de mis metas.

Padre, agradezco tu entrega, tus ganas por demostrarnos que la educación siempre nos abrirá puertas y que gracias a ella todo se logra.

Hermana, a ti solo te digo: te amo, sabes lo importante que eres para mí.

Tía Roció, gracias por brindarme su confianza y dejarme quererla tanto, siempre será mi segunda madre y mi segunda casa.

Sandra, gracias por estar a mi lado, por permitirme andar en tu camino y enseñarme a alcanzar mis sueños con paciencia y ternura, te amo.

José Luis Rodríguez Téllez

Le agradezco a DIOS por haberme guiado y acompañado en esta grandiosa etapa de mi vida estudiantil, por todos los aprendizajes y retos que tuve en ella. Muchas gracias Dios por siempre estar ahí cuando lo necesitaba y por ayudarme a no darme por vencido en las adversidades y estar ahí siempre que lo necesitaba.

A mi mamá, Juanita, por siempre apoyarme en cada momento de mi vida, ser mi gran ejemplo de perseverancia y nunca darte por vencida en la vida. Muchas gracias por siempre estar al pendiente de mí. Te amo mamá.

A mi papá, Luis Carlos, por ser siempre mi ejemplo a seguir. Por todos los valores que me inculcaste, por darme la mejor educación y enseñarme que cada día uno se debe superarse. Te amo papá.

A mis hermanos Luis Carlos y Kevin, por siempre apoyarme en mi etapa estudiantil, por cada momento alegre que tuvimos. Muchas gracias por todos los consejos que me diste Luis, siempre los tendré conmigo. Kevin, gracias por ser como eres, por ser una hermano tan alegre, tenaz y perseverante. Los amo.

A José Luis por haber sido un excelente compañero de Tesis pero sobre todo un gran amigo, gracias por apoyarme en cada momento y ser una motivación para lograr este trabajo de investigación. Gracias por ayudarme a seguir adelante sin importar los momentos de desesperación que tuvimos. ¡Muchas gracias hermano!

A mis amigos y hermanos de la vida, Luis Manuel, Sergio P, Luis Rdz., Rogelio, Ramón, Enrique, Alexa, Jesús V, Erika, Alma, Leny, Fer R., Eduardo, Andrés P., Marifer, Andrea L., y Edgar, por siempre estar ahí en cada momento sin importar la distancia, siempre me apoyaron en cada sentido. Gracias por ser tan únicos, leales y un gran ejemplo para mí. Los amo y siempre apreciare su amistad.

A mis amigos Anuar, Enrique P. y Alex. Gracias por haberse convertido en grandes y buenos amigos en tan poco tiempo. Tengo siempre en mente su consejos, los buenos momentos que hemos convivido juntos. Por siempre apoyarme en cada momento y motivarme para hacer grandes cosas. ¡Muchas gracias por todo!

A mis roomies y exroomies, Carlitos, Fede y Hector. Muchas Gracias por haberse convertido en grandes hermanos para mí, por siempre estar en los momentos buenos y difíciles que hemos compartido juntos, gracias por apoyarme, haberme dado los mejores consejos y ser un gran ejemplo de lealtad y hermandad.

A Luis Saldaña, gracias por convertirte en uno de mis mejores amigos y un hermano, muchas gracias por ser una motivación constante de superación y perseverancia. ¡Siempre agradeceré y apreciaré tu amistad hermano!

A mis amigos de la facultad, sobre todo a Misael, Jorge P, Diego D., Emilio M., Pablo, José, Abraham, Carlitos, Fer. Félix, Tamara, Fabricio, Ivan T., Fanny, Alicia, Dulce, Ana S., Emilio L., Paco F., Gerardo C., Abán, María José, Juan C., Luis G.T., por estar siempre ahí en cada momento, por ser grandes amigos dentro y fuera del aula. Siempre los tendré en mi mente y en mí corazón.

A Diego Ramírez Gatica (QEPD), porque aunque ya no estés con nosotros, te agradeceré siempre tu ayuda en cada momento, ser un gran ejemplo para todos nosotros, siempre estar para el servicio de los que teníamos alguna duda o necesitábamos un consejo. ¡Te lo agradeceré siempre!

A mi grupo Lazos Misioneros por haberme dado muchas enseñanzas de vida, por cada momento hermoso y grandioso que viví en compañía del grupo y con todas las fraternidades que tuve la oportunidad de vivir experiencias inolvidables en la Sierra de Durango. Le agradezco sobre todo a Sergio R. porque te convertiste en un gran compañero y en un gran amigo. Te agradezco por los momentos buenos, divertidos y difíciles que tuvimos oportunidad de compartir juntos.

A mis profesores que tuve en toda mi formación estudiantil, por haber compartido sus conocimientos conmigo, haberme tenido confianza en mí potencial y darme su apoyo a lo largo de mi formación como profesional.

Al Ingeniero Francisco Cuevas Arteaga, por ser uno de los mejores profesores que tuve en mi formación profesional. Muchas gracias por ser un gran apoyo en cada momento que teníamos dificultades, por haber confiado en nosotros para realizar este trabajo de investigación, y sobre todo en haberse convertido en un gran amigo. ¡Muchas Gracias Ing. Cuevas!

Eliab Emmanuel Vega Ruiz

Índice

NOMENCLATURA	I
LISTA DE FIGURAS	II
LISTA DE TABLAS	III
OBJETIVO	IV
1. Sistema Eléctrico de Potencia	1
1.1 Sistema Eléctrico de Potencia	2
1.2. Topología de un Sistema Eléctrico	2
1.3. Subestaciones eléctricas	3
1.3.1. Arreglo de barras	4
1.3.2. Equipo de una subestación	10
2. Calidad de la energía	19
2.1. La importancia de la calidad de la energía	19
2.2. ¿Qué es la calidad de la energía?	19
2.3. Tipos de disturbios en los Sistemas Eléctricos de Potencia	19
2.3.1. Transitorios	19
2.3.2. Variaciones de tensión de larga duración	21
2.3.3. Variaciones de tensión de corta duración	23
2.3.4. Desbalance de tensión	26
2.3.5. Distorsión en la forma de onda	26
2.3.6. Fluctuaciones de tensión (Flicker)	29
2.3.7. Variaciones en la frecuencia	30
2.3.8. Curva CBEMA	30
3. Armónicas	32
3.1. Introducción	32
3.2. Definición de armónica	32
3.3. Distorsión Armónica	33
3.4. Distorsión Armónica Total	33
3.5. Fuentes comunes de armónicas	34

3.5.1. Rectificadores	34
3.5.2. Transformadores	35
3.5.3. Máquinas rotatorias	35
3.5.4. Dispositivos de arco eléctrico	35
3.6. Resonancia	36
3.6.1. Resonancia serie	36
3.6.2. Resonancia paralelo	36
3.7. Normatividad sobre el problema de armónicas	36
3.7.1. Norma IEEE Std. 519-1992	36
3.7.2. Especificación CFE L0000-45-2005	38
3.8. Efectos de la distorsión armónica	39
3.8.1. En elementos del sistema de potencia	39
3.8.2. Efectos en el sistema eléctrico de potencia	41
3.8.3. En las comunicaciones	42
3.8.4. En el equipo electrónico	42
4. Filtros de corrientes armónicas	43
4.1. Introducción	43
4.2. Filtros pasivos	43
4.2.1. Filtros en derivación	43
4.2.2. Filtros serie	48
4.2.3. Filtros paso bajas	49
5. Análisis para el diseño de un filtro pasivo de armónicas	50
5.1. Consideraciones para el diseño del filtro de armónicas	50
5.1.1. Estudio de la interacción entre el sistema y las cargas no lineales	51
5.1.2. Condiciones normales de operación del sistema	53
5.1.3. Condiciones normales de operación del filtro	54
5.1.4. Condiciones de contingencia del sistema	54
5.1.5. Condiciones de contingencia del filtro	54
5.1.6. Ubicación del filtro	54
5.1.7. Configuración del filtro	54

5.2. Filtros de armónicas para sistemas de media y alta tensión	54
5.2.1. Consideraciones de sobrecarga armónica	54
5.2.2. Especificación de los principales componentes	56
5.2.3. Control de conmutación para el filtro de armónicas	67
5.2.4. Protección	68
5.2.5. Diseño del filtro de armónicas	68
5.3. Estudios de flujos de potencia y análisis armónico	72
5.3.1. Antecedentes Filtro para Parque Eólico Dominica, ubicado en el poblado de Charcas, San Luis Potosí.	72
5.3.2. Diagrama Unifilar de sistema eléctrico Dominica I	75
6. Dimensionamiento y especificación del filtro de armónicas	82
6.1. Dimensionamiento del filtro de 4ª armónica de 5.4 [MVAR] en 34.5 [kV] sintonizado a 3.9 PU del parque eólico	82
6.2. Componentes del filtro 4ª armónica de 11 [MVAR] en 34.5 [kV]	82
6.2.1. Sintonización del filtro	85
6.2.2. Corriente de operación del filtro	86
6.2.3. Calidad del filtro	87
6.2.4. Protección del filtro	87
6.2.5. Análisis armónico para la corriente de 5º orden	93
6.2.6. Resonancia serie-paralelo del filtro con el sistema de potencia	97
6.2.7. Aplicación de la especificación CFE L0000-45-2005	98
6.2.8. Especificación de los componentes	99
Conclusiones	101
Bibliografía	103

I. NOMENCLATURA

1. **fn**: Frecuencia armónica. [Hz]
 2. **n**: Orden de la armónica o múltiplo.
 3. **f1**: Frecuencia fundamental. [Hz]
 4. **THD_i**: Distorsión Total Armónica de Corriente. [%]
 5. **THD_v**: Distorsión Total Armónica de Voltaje. [%]
 6. **I₁**: Corriente a frecuencia fundamental. [Vrms]
 7. **V₁**: Voltaje en la frecuencia fundamental. [Vrms]
 8. **TDD**: Distorsión Total de la Demanda. [%]
 9. **I_L**: Corriente de carga máxima a frecuencia fundamental. [Arms]
 10. **I_n**: Valor eficaz de la enésima corriente armónica. [Arms]
 11. **P_{e-c}**: Pérdidas en el conductor. [W]
 12. **R_n**: Resistencia efectiva que presenta el conductor a **I_n**. [Ω]
 13. **R_{CD}**: Resistencia del conductor a corriente directa. [Ω]
 14. **d**: Diámetro del conductor. [cm]
 15. **SCR**: Relación corto circuito
 16. **S**: **MVA**: Potencia aparente en la carga [MVA]
 17. **Y_n**: Admitancia armónica asociada a **I_n**. [$\frac{1}{\Omega}$]
 18. **V_n**: Voltaje armónico asociado a **I_n**. [V]
 19. **V_c**: Voltaje rms nominal del capacitor. [Vrms]
 20. **X_{cn}**: Reactancia capacitiva a la armónica **I_n**. [V]
 21. **V_s**: Voltaje máximo del sistema aplicada al capacitor [Vrms]
 22. **Q**: Potencia Reactiva [VAR]
 23. **X_c**: Impedancia del capacitor [Ω]
 24. **X_l**: Impedancia del inductor [Ω]
 25. **V_{L-N}**: Voltaje línea a neutro [Vrms]
 26. **V_{L-L}**: Voltaje línea a línea [Vrms]
 27. **V_{max}**: Voltaje máximo [Vrms]
 28. **V_R**: Voltaje rms nominal del reactor. [Vrms]
 29. **X_{Ln}**: Reactancia inductiva del reactor a la armónica **I_n**. [V]
 30. **MCOV**: Tensión máxima de operación continua. [Vrms]
 31. **TOV**: Sobretensiones temporales. [V]
 32. **X_{eff}**: Reactancia efectiva del filtro a frecuencia fundamental. [Ω]
 33. **Q_{eff}**: Potencia reactiva efectiva del filtro. [MVA]
 34. **V _{ϕ - ϕ S}**: Voltaje nominal de sistema de fase a fase. [V]
-

II. LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Fig.1.1 Diagrama descriptivo de un sistema eléctrico de potencia.	1
Fig.1.2 Diagrama básico de un sistema radial.	2
Fig.1.3 Diagrama básico de un sistema en anillo.	2
Fig.1.4 Diagrama básico de un sistema tipo red.	3
Fig.1.5 Arreglo de barra tipo: barra principal.	4
Fig.1.6 Arreglo de barra tipo: barra principal con barra de transferencia.	5
Fig.1.7 Arreglo de barra tipo: barra principal con barra auxiliar.	6
Fig.1.8 Arreglo de barra tipo: doble barra con barra de transferencia.	7
Fig.1.9 Arreglo de barra tipo: anillo.	8
Fig.1.10 Arreglo de barra tipo: interruptor y medio.	9
Fig.1.11 Arreglo de barra tipo: doble interruptor.	10
Fig.1.12 Diagrama unifilar de un sistema eléctrico de potencia con compensador estático de potencia reactiva.	17
Fig.1.13 Circuito básico de un reactor controlado por tiristores.	18
Fig.1.14 Circuito básico de un capacitor controlado por tiristores.	18
Fig.2.1 Ejemplo de un transitorio oscilatorio.	21
Fig.2.2 Condición de sobretensión.	22
Fig.2.3 Condición severa de baja tensión.	22
Fig.2.4 Ejemplo de una interrupción momentánea.	24
Fig.2.5 Sag en un alimentador debido a una falla.	24
Fig.2.6 Swell de voltaje provocado por la energización de un banco de capacitores.	25
Fig.2.7 Corriente armónica y voltaje de línea.	27
Fig.2.8 Espectro de frecuencias armónicas.	27
Fig.2.9 Notching ocasionado por equipo no lineales.	28
Fig.2.10 Flicker producido por el arranque automático de un calefactor.	30
Fig.2.11 Curva CBEMA.	31
Fig.4.1 Conexión típica en derivación de un filtro.	44
Fig.4.2 Conexión típica de un filtro de una sintonía.	44
Fig.4.3 Conexión típica de un filtro de doble sintonía.	45
Fig.4.4 Conexión típica de un filtro amortiguado de primer orden.	46
Fig.4.5 Conexión típica de un filtro amortiguado de segundo orden.	46
Fig.4.6 Conexión típica de un filtro amortiguado de tercer orden.	47
Fig.4.7 Conexión típica de un filtro amortiguado tipo C.	48
Fig.4.8 Conexión típica en serie de un filtro.	48
Fig.4.9 Conexión típica de un filtro pasa bajas.	49
Fig.5.1 Tiempo de descarga a 10% de la tensión nominal para unidades capacitoras de media tensión teniendo 50 volts en 5 minutos.	68

III. LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.7-1 Niveles de distorsión armónica permisibles en la corriente de acuerdo al estándar IEEE 519-1992.	37
Tabla 3.7-2 Niveles de distorsión armónica permisibles en la tensión de acuerdo al estándar IEEE 519-1992.	38
Tabla 3.7-3 Niveles de distorsión armónica permisibles en la corriente de acuerdo a la especificación CFE L0000-45 2005	39
Tabla 3.7-4 Niveles de distorsión armónica permisibles en la tensión de acuerdo a la especificación CFEL0000 -45 2005	39
Tabla 5.3-1 Contribución de Cortocircuito en el Punto de Interconexión en 115 kV.	73
Tabla 5.3-2 Datos de los aerogeneradores modelados.	74

IV. OBJETIVO:

Realizar un análisis armónico y determinar el dimensionamiento y especificación de un filtro de corrientes armónicas para un parque eólico de 50 MW, que cumpla con los límites permitidos de distorsión de corrientes y voltajes armónicos establecidos en la Norma CFE L0000 45 de Comisión Federal de Electricidad.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA:

En los parques eólicos están compuestos por los componentes clásicos de los sistemas eléctricos de potencia y por aerogeneradores que generan corrientes armónicas y generalmente se presentan resonancias paralelo que incrementan las amplitudes de esas corrientes armónicas y por ende se presentan altas distorsiones tanto de corriente como de voltaje que deterioran los aislamientos de los equipos primarios y de control, disminuyendo su vida útil y no cumpliendo con los límites establecidos en Norma CFE L0000 45. Por tanto, se realizará el estudio de análisis armónico para determinar que filtro de corrientes armónicas se debe instalar para atenuar las corrientes armónicas y cumplir con la norma de calidad de la energía de CFE L0000 45.

Estos estudios son muy importantes ya que los productores independientes de energía eléctrica que no cumplan con las normas de calidad de la energía de CFE no se podrán interconectar al Sistema Eléctrico de Potencia Nacional de CFE.

CAPITULO 1.**SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA**

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

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

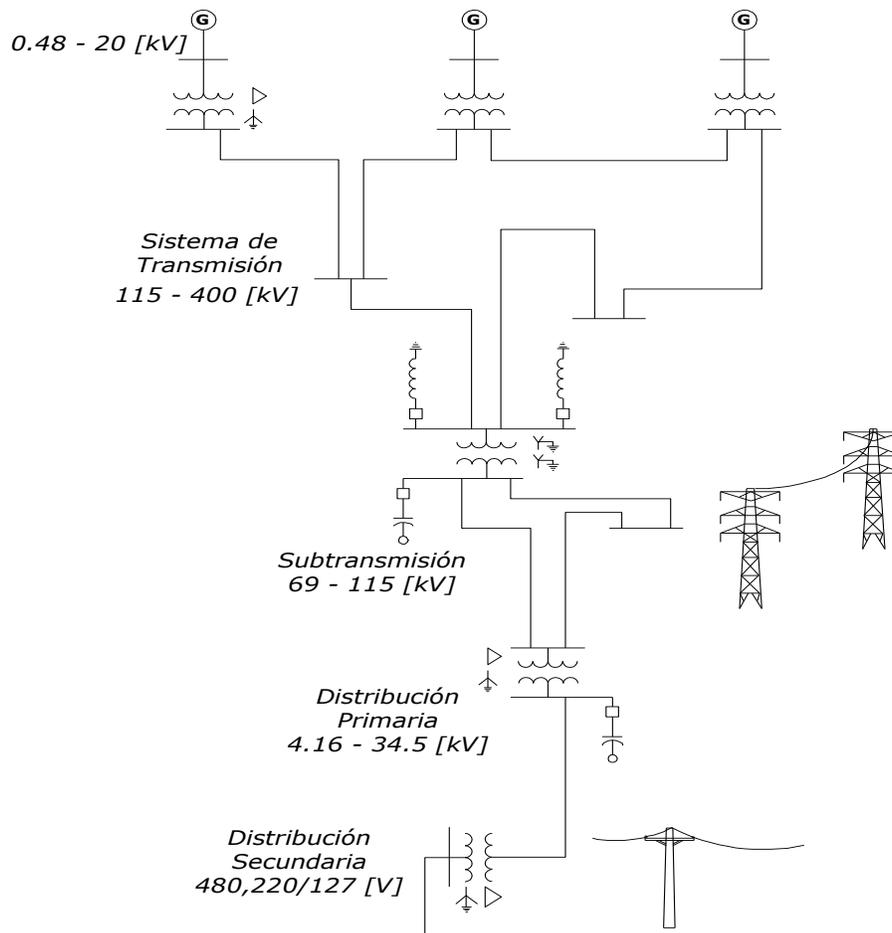


Fig1.1 Diagrama descriptivo de un sistema eléctrico de potencia.

1.1. Cargas en un Sistema Eléctrico de Potencia

La carga de un sistema está constituida por un conjunto de cargas individuales de diferentes tipos, industrial, comercial y residencial. En general, una carga demanda generalmente potencia real y potencia reactiva; es el caso de las cargas con dispositivos de estado sólido, por ejemplo, los motores con sus controladores de velocidad y muchas otras cargas. Las cargas puramente resistivas demandan únicamente potencia real como las planchas, resistencias calefactoras y alumbrado incandescente.¹ De aquí que las cargas de un sistema eléctrico también se clasifiquen en lineales y no lineales.

1.2. Topología de un Sistema Eléctrico

Un sistema eléctrico dependiendo de su confiabilidad se puede clasificar en tres tipos:¹

Sistema radial (menos confiabilidad y más económico)

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

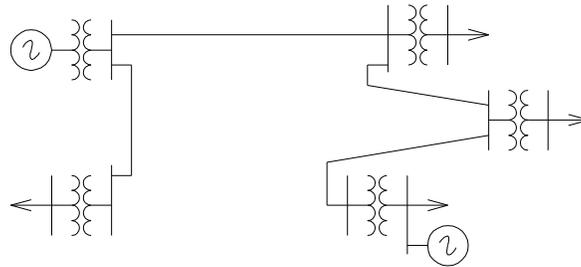


Fig.1.2 Diagrama básico de un sistema radial.

Sistema en anillo (mayor confiabilidad y costo)

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

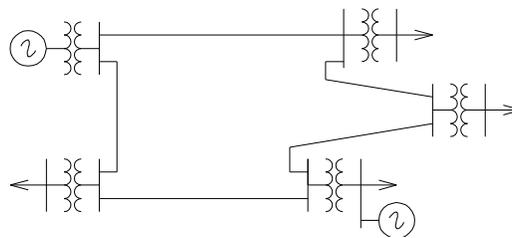


Fig.1.3 Diagrama básico de un sistema en anillo.

Red (mayor confiabilidad y costo)

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

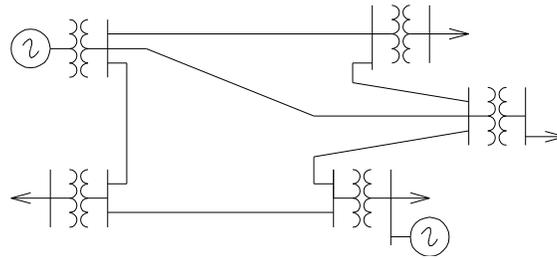


Fig.1.4 Diagrama básico de un sistema tipo red.

1.3. Subestaciones eléctricas

Es un conjunto de dispositivos eléctricos que forman parte de un sistema eléctrico de potencia y se encarga de transformar tensiones y derivar circuitos de potencia.²

Las subestaciones pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de función que desarrollan en:²

- a) Subestaciones elevadoras.
- b) Subestaciones de maniobra o seccionadoras de circuito.
- c) Subestaciones reductoras.

Asimismo, pueden agruparse de acuerdo con la potencia y tensión que operan en:²

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

1.3.1. Arreglos de barras

El arreglo de barras de una subestación es la configuración ordenada de los elementos que lo conforman. La elección del arreglo de una subestación depende de las características de cada sistema eléctrico que se está trabajando y de la función que realiza esta subestación en el sistema.

Los criterios utilizados en la selección del arreglo de barras más adecuado de una instalación son la continuidad de servicio, flexibilidad de operación, cantidad y costo del equipo eléctrico y facilidad de mantenimiento de los equipos,² a continuación se describen los arreglos de barras más utilizados en el sistema eléctrico:

Barra sencilla (menos confiabilidad y más económica)

Es el arreglo más simple desde el punto de vista constructivo, considerando la cantidad de equipo y el área que ocupa, también resulta ser el más económico. No obstante, la confiabilidad de servicio es poca, ya que una falla en la barra principal provoca la salida de operación de la misma.³ Asimismo, el mantenimiento a los interruptores se dificulta, ya que es necesario dejar fuera de servicio parte de la subestación.²

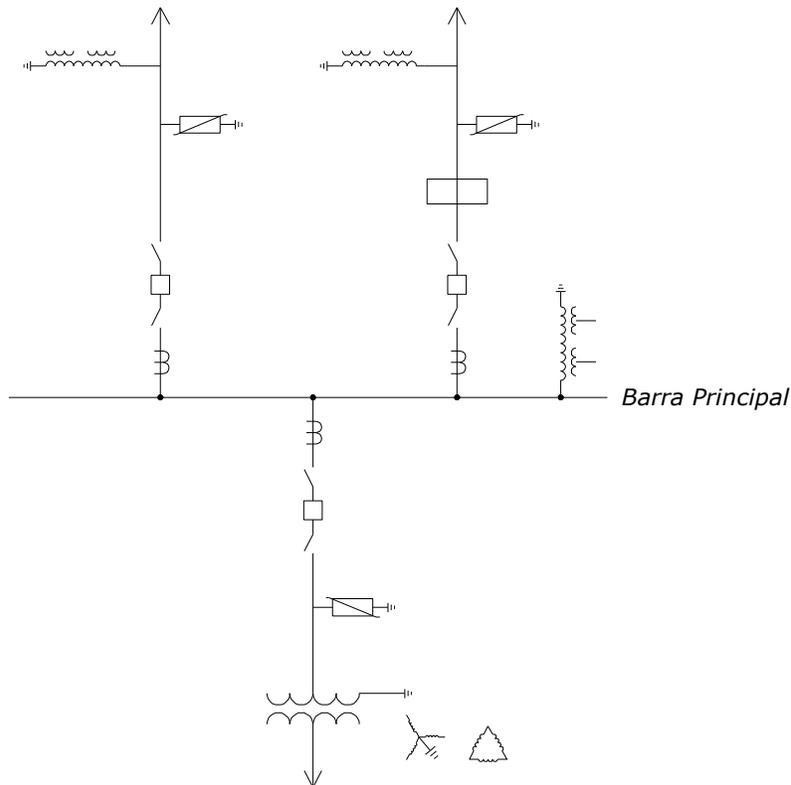


Fig.1.5 Arreglo de barra tipo: barra principal.

Barra principal y barra de transferencia

Es una variante del arreglo anterior, en el cual se utiliza una barra de transferencia con un interruptor de enlace para poder dar mantenimiento a interruptores y barra principal.²

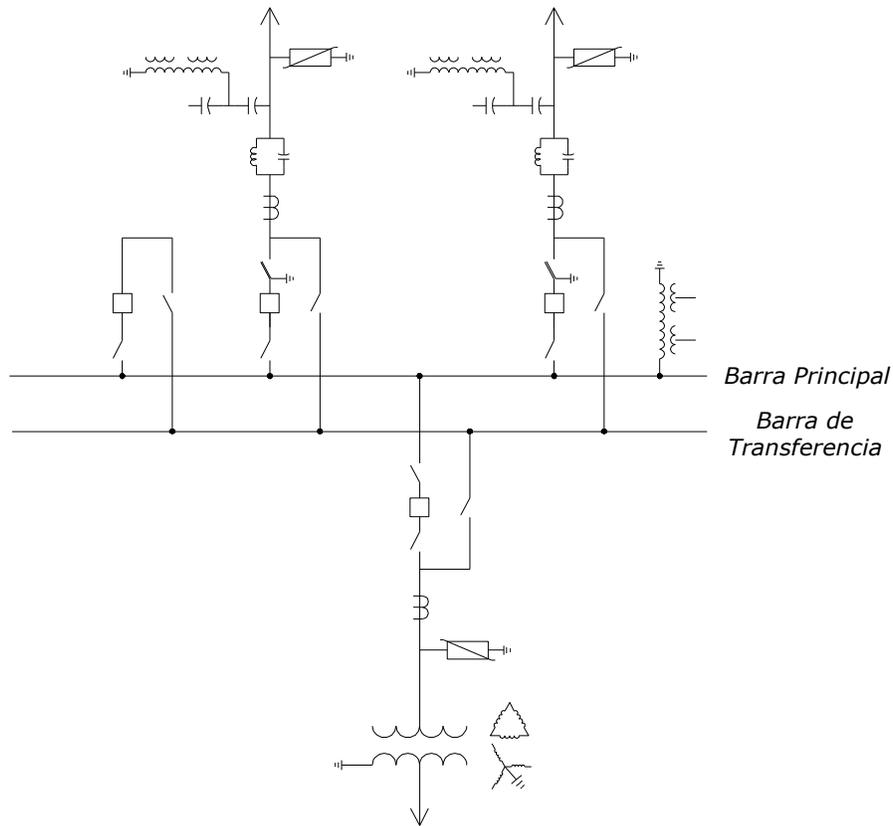


Fig.1.6 Arreglo de barra tipo: barra principal con barra de transferencia.

Barra principal y barra auxiliar

Este arreglo ofrece una mayor continuidad y confiabilidad de servicio, ya que, en caso de existir una falla en cualquiera de las dos barras, ocasiona la pérdida de los elementos conectados a la barra fallada, debido a la condición de falla la subestación puede ser operada como dos subestaciones independientes con arreglo de barra simple.³

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

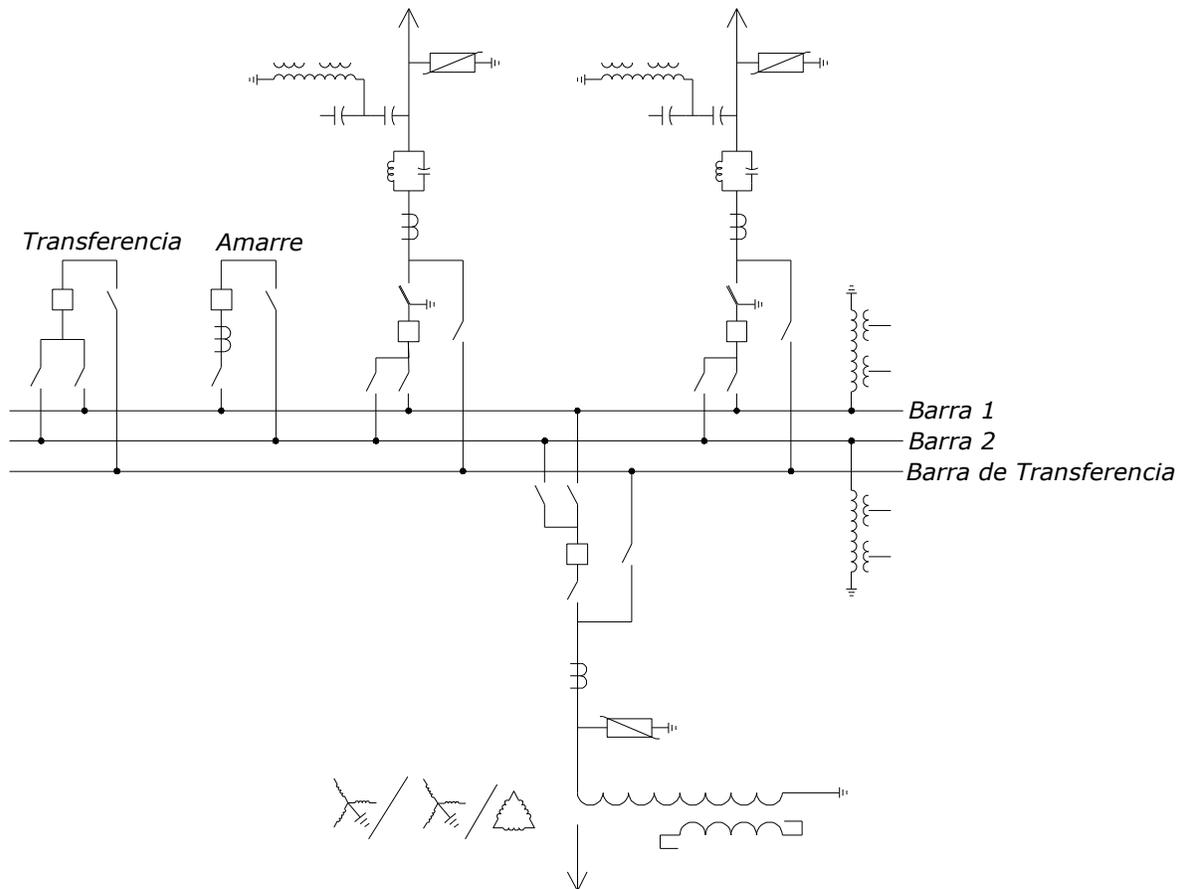


Fig.1.8 Arreglo de barra tipo: doble barra con barra de transferencia.

Anillo (mayor confiabilidad y costo)

Arreglo que permite continuidad de servicio, ya que evita la salida completa en caso de falla en las barras. Además, ofrece la posibilidad de dar mantenimiento a los interruptores sin que se pierda el suministro de energía.³

Cuando un interruptor está en mantenimiento, pueden ocurrir disparos en la protección, debido a que al abrir el anillo puede incrementar la corriente de carga en los otros interruptores que permanecen con servicio. Esto puede evitarse realizando el mantenimiento en condiciones de baja carga, este arreglo es utilizado en la salida de 23 [kV] de las subestaciones de distribución, utilizando anillo sencillo o doble en caso de haber más de dos transformadores.²

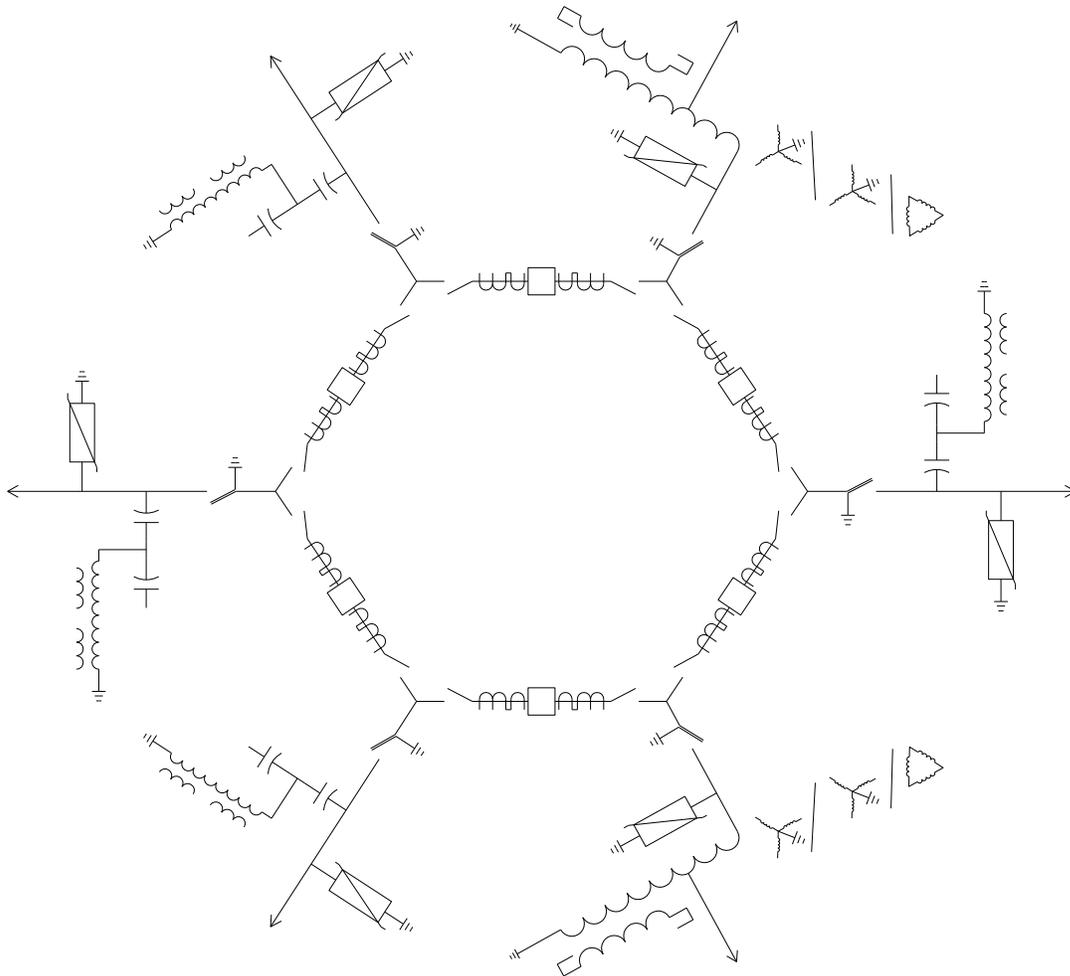


Fig.1.9 Arreglo de barra tipo: anillo.

Interrupción y medio

Arreglo que ofrece buena confiabilidad y ventajas para las operaciones de mantenimiento sin tener que interrumpir el servicio. Regularmente las transferencias se hacen a través de los interruptores, lo que permite conservar la protección aun cuando alguno se encuentre en mantenimiento.³

Ocurre lo mismo que con el arreglo de anillo, cuando un interruptor está en mantenimiento, al tener algún interruptor fuera de servicio, puede manifestarse un exceso de carga en los restantes y provocar disparos en las protecciones, este arreglo se utiliza en subestaciones de 115, 230 y 400 [kV], sobre todo en aquellas de interconexión que forman parte de un sistema en anillo.

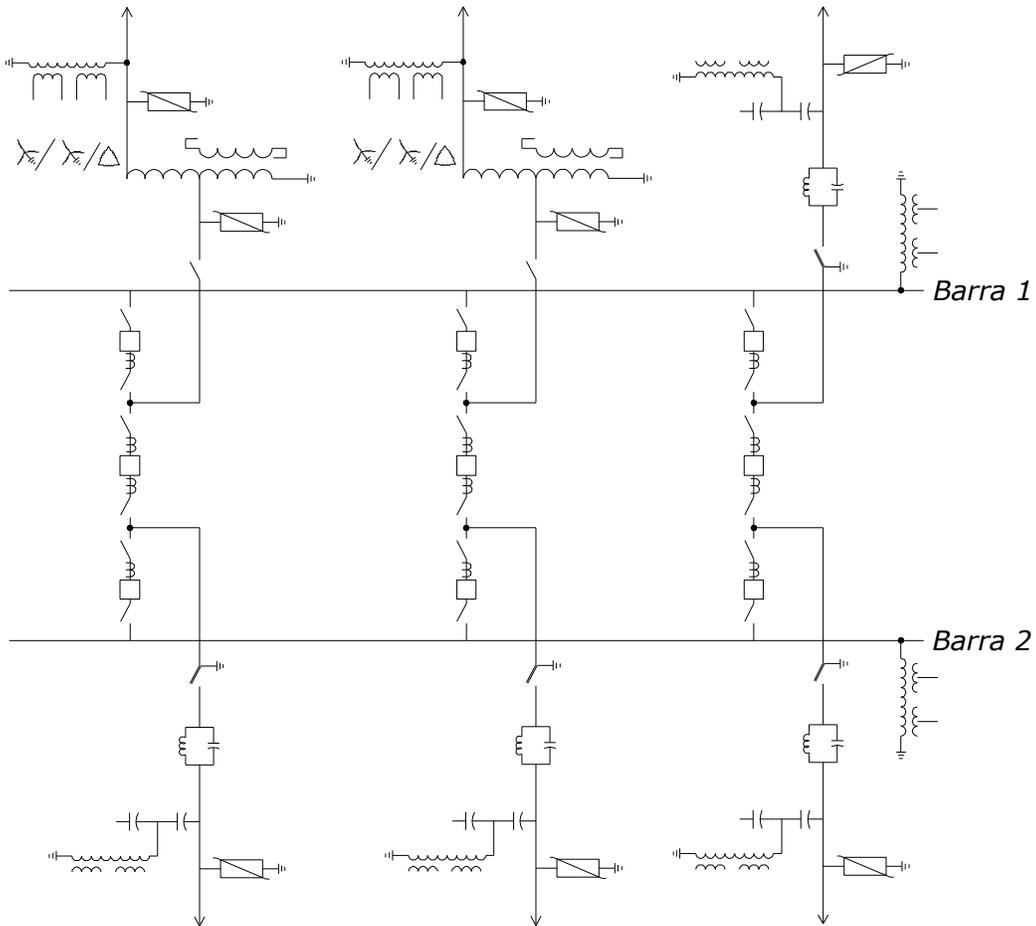


Fig.1.10 Arreglo de barra tipo: interruptor y medio.

Doble interruptor (mayor confiabilidad y costo)

Es la mejor opción en cuanto a confiabilidad se refiere, sin embargo, es un arreglo costoso a comparación de los anteriores y por ello se emplea en aquellos casos en que la continuidad es muy importante. Con un interruptor fuera de servicio, ocasiona la pérdida de únicamente el elemento disparado, las subestaciones con éste arreglo pueden ser operadas como dos subestaciones independientes de barra simple.³

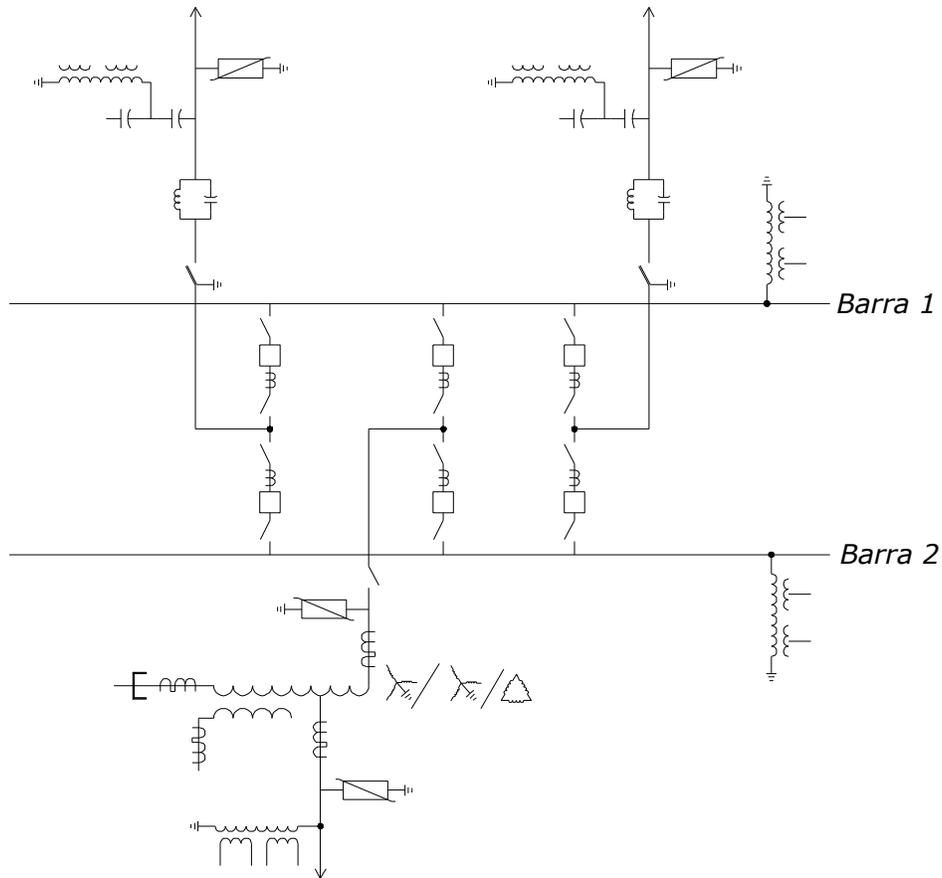


Fig.1.11 Arreglo de barra tipo: doble interruptor.

1.3.2. Equipo de una subestación

Transformadores de potencia

Un transformador es una máquina eléctrica que eleva o reduce la magnitud de tensión eléctrica.² Está formado por tres partes principales:²

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

Bancos de tierra

Es un transformador que conecta a tierra el neutro del sistema, para proporcionar un circuito de retorno a la corriente de cortocircuito² una característica que se presenta en un sistema de potencia con neutro flotante es: el aumento de $\sqrt{3}$ veces, el voltaje de las fases sanas cuando ocurre una falla de fase a tierra.

Existen dos tipos de bancos de tierra:²

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

Transformadores de instrumentos

Son dispositivos electromagnéticos que decremantan a escala las magnitudes de tensión y corriente que se utilizan para la protección, control y medición de los circuitos de una subestación, debido a que los aparatos que realizan éstas funciones no están diseñados para soportar grandes tensiones y corrientes.²

Existen dos tipos de transformadores de instrumentos: transformadores de corriente y transformadores de potencial.²

a) Transformadores de corriente

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

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

b) Transformadores de potencial

Son de tipo inductivo y tienen como función principal reducir los valores de tensión del sistema a valores suficientemente bajos para alimentar a equipos de protección, control y medición. En consecuencia, el transformador tiene que ser muy exacto para que no distorsione los verdaderos valores de tensión.

Dispositivos de potencial capacitivo

Se utilizan para alimentar a equipos de protección, control y medición. Facilita los propósitos de tele-medición, control en tiempo real y en general aspectos de comunicación.²

Capacitores

Dispositivos formados por dos placas conductoras, separadas por un elemento dieléctrico y al aplicar una diferencia de potencial almacenan carga eléctrica.

En las subestaciones se utilizan capacitores de potencia con arreglos serie-paralelo para conectarlos en alta tensión y dar la capacidad de potencia reactiva requerida.²

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

a) Bancos de capacitores

Los capacitores instalados en grupos son llamados bancos, los cuales se utilizan en instalaciones industriales y de potencia.² Los bancos de capacitores pueden ser conectados en delta, estrella sólidamente aterrizada o flotante, doble estrella sólidamente aterrizada o flotante, la conexión delta se encuentra en sistemas de baja tensión y esto se determina generalmente por razones económicas; la conexión estrella y doble estrella sólidamente aterrizada se aplican sólo en sistemas eléctricos de potencia donde se encuentran múltiples puestas a tierra y en todos los niveles de tensión, en éste caso las armónicas triples existentes (de secuencia cero) fluyen por los circuitos de neutro o de retorno a tierra y pueden causar problemas de interferencia telefónica o en los circuitos de control, la ventaja es que se presentan sobretensiones transitorias menores que en la conexión flotante.

La conexión estrella y doble estrella flotante se aplica en cualquier sistema (con múltiples puestas a tierra o flotante) por lo general, los bancos de capacitores de alta tensión se conectan en estrella con neutro flotante, de esta manera se evita la circulación de corrientes armónicas triples que pueden dañar los capacitores. La instalación de capacitores en los sistemas eléctricos tiene por objetivo suministrar potencia reactiva y mejorar el bajo factor de potencia, logrando por ello reducir el flujo de potencia reactiva en líneas y equipos y con ello incrementar la capacidad de carga en los transformadores, líneas y generadores; y ayudando a regular la tensión.

Apartarrayos

Dispositivos eléctricos que limitan la magnitud de las sobretensiones originadas por descargas atmosféricas u operación de interruptores y conducen a tierra las corrientes producidas por estas sobretensiones.²

Los apartarrayos se dividen en tres grupos:² cuernos de arqueo, apartarrayos autovalvulares y apartarrayos de óxidos metálicos. Actualmente éstos últimos son los más utilizados.

a) Cuernos de arqueo

Es el caso más simple y económico para proteger los equipos de distribución. Deben ser capaces de soportar la tensión nominal más alta del sistema y producir la descarga cuando haya una sobretensión.⁴

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

b) Apartarrayos autovalvulares

Los apartarrayos tipo autovalvular están formados por un entrehierro y una resistencia no lineal. El entrehierro descarga las corrientes transitorias a tierra con una tensión de descarga baja; la resistencia presenta una alta impedancia a la corriente que sigue a la transitoria.⁴

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

c) Apartarrayos de óxidos metálicos

Es un dispositivo de protección para sobretensiones basado en las propiedades semiconductoras de los óxidos metálicos, como el óxido de zinc (ZnO). Tiene mejores características de no linealidad que el carburo de silicio, debido a ello y a sus bajas pérdidas a tensiones nominales, ha sido posible no utilizar entrehierro, permitiendo así reducir el tamaño de estos equipos y en consecuencia su peso.⁴

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

de importancia considerar su temperatura de operación, porque su comportamiento es sensible a la temperatura; a medida que la temperatura ambiente se eleva, la energía que debe disipar el apartarrayos se incrementa, provocando que la corriente que circula a través de éste aumente, incrementando nuevamente la temperatura y, por consiguiente, un calentamiento en el equipo. Por ello el apartarrayos nunca debe trabajar por arriba de su capacidad térmica, de lo contrario puede fallar.

Interruptores de potencia

Los interruptores de potencia son dispositivos destinados al cierre y apertura de los circuitos bajo condiciones de carga, en vacío y en condiciones de falla. Asimismo, permite insertar o retirar equipos y máquinas, líneas aéreas o cables de un circuito energizado.²

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

Los interruptores pueden cerrar o abrir en forma manual o automática por medio de relevadores, los cuales monitorean las condiciones de la red. La interrupción del arco puede llevarse a cabo por medio de:⁴

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

Asimismo, tienen un mecanismo de almacenamiento de energía que le permite cerrar hasta cinco veces antes de que la energía sea interrumpida completamente; este mecanismo puede ser:⁴

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

Debido a las funciones tan importantes que desempeña, es uno de los dispositivos del esquema de protección más importante en los sistemas eléctricos.²

Cuchillas

Dispositivos que sirven para conectar y desconectar los elementos de una instalación eléctrica en caso de tener que realizar maniobras de operación o bien para darles mantenimiento.²

Las cuchillas, a diferencia de un interruptor, no pueden abrir circuitos cuando está fluyendo corriente a través de ellas (operan sin carga), siempre debe abrirse primero el interruptor correspondiente a la cuchilla. De acuerdo a su tipo de construcción, las cuchillas pueden ser de tipo:

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

Fusibles

Es un dispositivo de protección que opera cuando una sobrecorriente pasa a través de él. Por lo tanto, las funciones de un fusible son aislar la parte del circuito donde se presenta una falla del resto del alimentador y así impedir el daño a los equipos instalados en el mismo.⁴

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

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

Los fusibles de potencia más conocidos son:²

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

Los fusibles se diseñan para fundirse en un tiempo especificado a una determinada corriente, para tal propósito es necesario conocer las curvas de operación tiempo-corriente. Existen tres tipos de curvas: las curvas características promedio de fusión tiempo-corriente, las curvas instantáneas de corriente pico y las curvas I^2t . La primera curva se aplica a toda clase de fusibles y las dos últimas a fusibles limitadores de corriente.⁴

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

Reactores

Son bobinas con diversas funciones. Cuando se conectan en serie limitan la corriente de corto circuito para poder disminuir la capacidad interruptiva de interruptores y en paralelo o derivación absorben potencia reactiva (líneas largas en demanda mínima).² En subestaciones, los reactores se colocan en el neutro de los bancos de transformadores para limitar la corriente de corto circuito monofásica. Según su capacidad, los reactores pueden ser de tipo seco para potencias reactivas pequeñas o del tipo sumergido para potencias elevadas.

a) Compensadores estáticos de potencia reactiva.

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

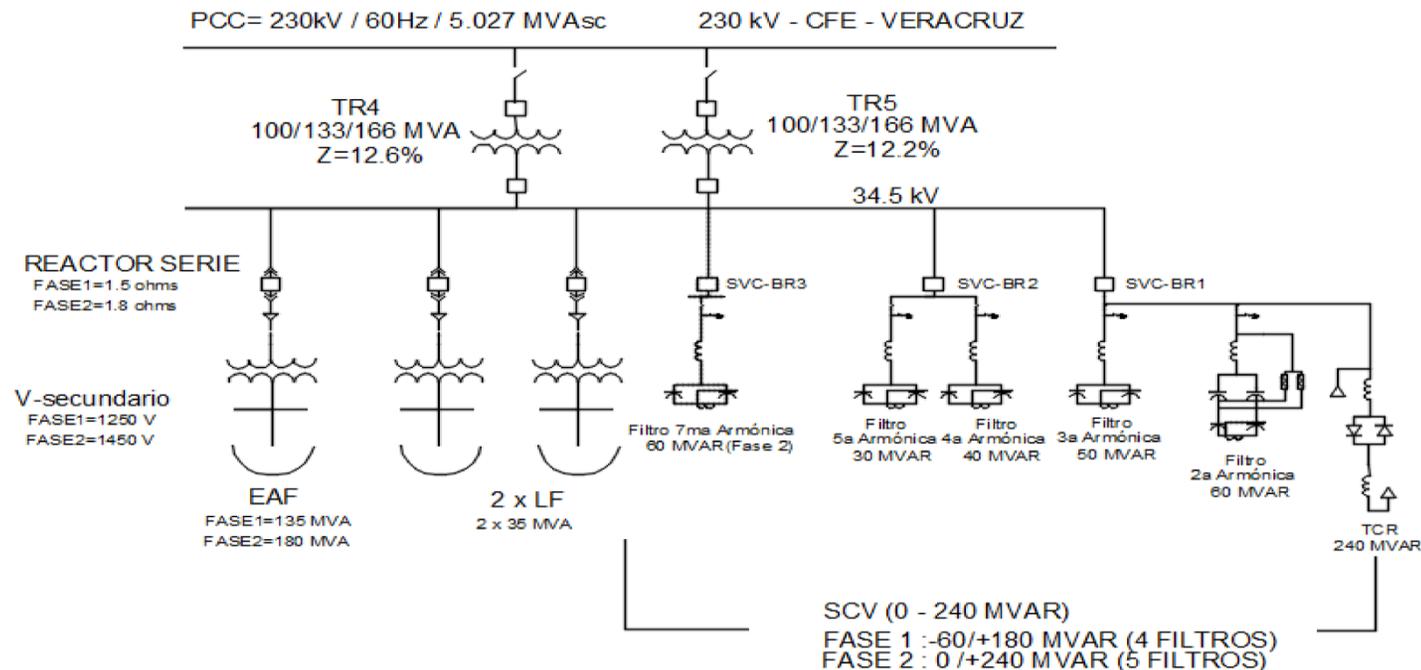


Fig.1.12 Diagrama unifilar de un sistema eléctrico de potencia con compensador estático de potencia reactiva.

A continuación, se muestran dos circuitos básicos de cuales parte la configuración de un compensador estático de potencia reactiva, estos mismos pueden ser controlados por algún otro dispositivo semiconductor que proporcione una capacidad interruptiva más rápida o una eficiente pérdida de energía.

- **Reactor controlado por tiristores**

Reactores generalmente conectados en delta y controlados por tiristores.

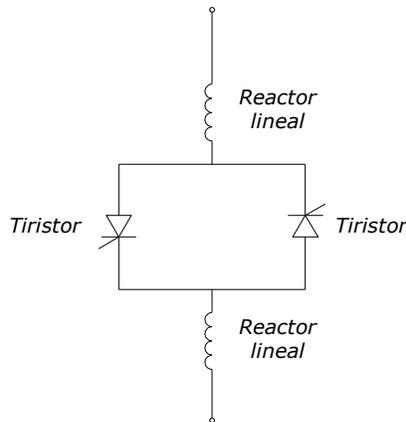


Fig.1.13 Circuito básico de un reactor controlado por tiristores.

- **Capacitor controlado por tiristores**

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

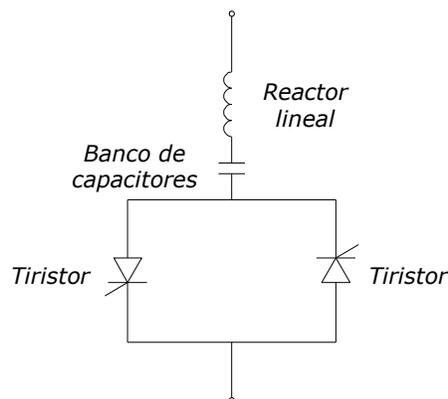


Fig.1.14 Circuito básico de un capacitor controlado por tiristores.

CAPÍTULO 2.

CALIDAD DE LA ENERGÍA

2.1. La importancia de la calidad de la energía

La principal razón por la que hay interés en los estudios de calidad de energía es de tipo económico. En los últimos años, se ha incrementado el número de cargas sensibles a las variaciones de los parámetros en el suministro de energía eléctrica.⁵

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

2.2. ¿Qué es la calidad de la energía?

La calidad de la energía puede definirse como la ausencia de problemas manifestados en tensión, corriente y frecuencia que pueden conducir a una falla o salida de operación en el equipo de los usuarios finales.⁶

La calidad del suministro está definida por tres factores importantes: continuidad del servicio (considerando el mínimo de fallas del suministro de potencia), limitación de las variaciones de tensión y control de la frecuencia eléctrica a su valor nominal.¹

Debido a la importancia que representa la energía eléctrica en nuestra vida y la forma en que afectan los problemas de calidad del servicio, podemos decir que el propósito de la calidad de la energía es encontrar los métodos efectivos para poder corregir los disturbios y variaciones de tensión que afectan a los usuarios, así como proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan en el sistema eléctrico de potencia.⁵

2.3. Tipos de disturbios en los Sistemas Eléctricos de Potencia

2.3.1. Transitorios

El término transitorio es utilizado para denotar las variaciones indeseables y momentáneas en la forma de onda de corriente o tensión.⁶

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

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

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

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

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

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

Transitorios de impulso

Es un cambio súbito de tensión, corriente o ambas, a una frecuencia distinta de la fundamental; es unidireccional en su polaridad. Se caracterizan por ondas de sobretensión de frente rápido y de aumento relativamente lento en la escala de tiempo que se maneja.

Por ejemplo, un transitorio de impulso de 1.2×50 [μ s], 5000 [V] nominales se eleva desde cero a su valor pico de 5000 [V] en 1.2 [μ s] y después decae a la mitad de su valor pico en 50 [μ s]. La causa más común de los transitorios de impulso son las descargas atmosféricas.⁶

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

Transitorios oscilatorios

Transitorios cuyo valor instantáneo de tensión o corriente cambia rápidamente de polaridad. Pueden ser causados, por ejemplo, por la conexión de líneas, bancos de capacitores o energización de transformadores.⁶

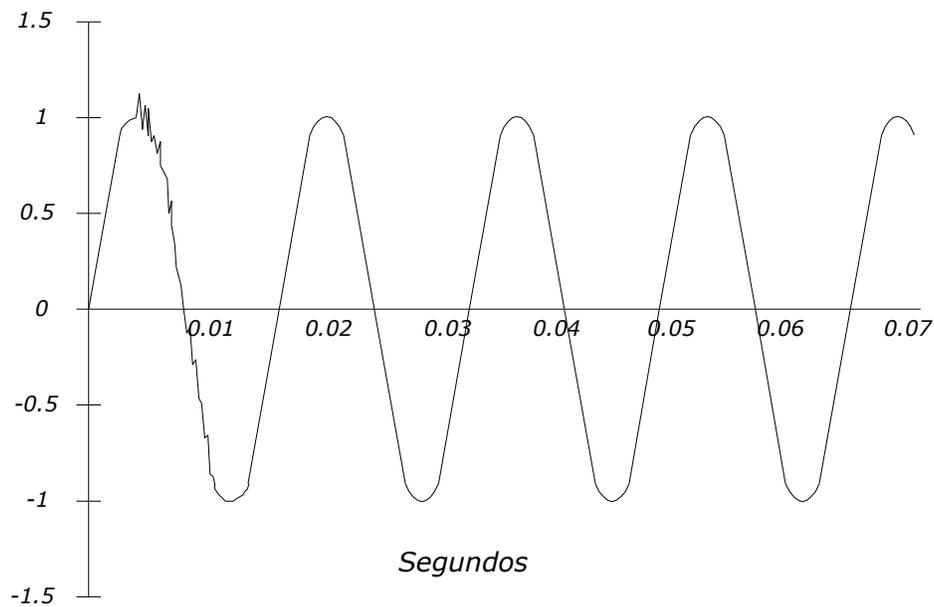


Fig.2.1 Ejemplo de un transitorio oscilatorio.

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

2.3.2. Variaciones de tensión de larga duración

Son variaciones de tensión a la frecuencia del sistema por tiempos mayores a 1 minuto. Estas variaciones son causadas por variaciones en la carga y por las operaciones de conmutación en el sistema.⁶

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

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

Sobretensión de larga duración

Una sobretensión es un incremento en el valor de tensión RMS mayor del 110% por más de 1 minuto.⁶

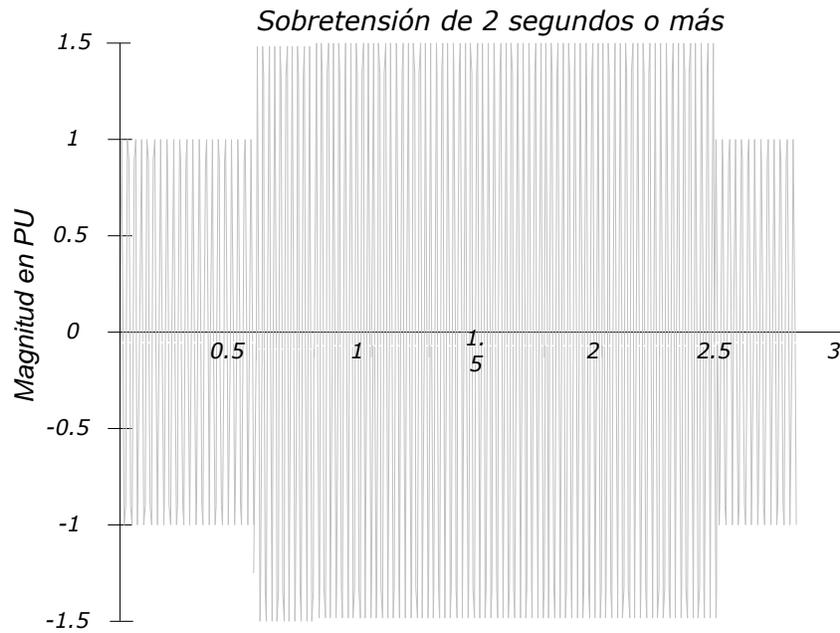


Fig.2.2 Condición de sobretensión.

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

Baja tensión de larga duración

La baja tensión es un decremento en el valor de tensión RMS menor al 90% por más de 1 minuto.⁶

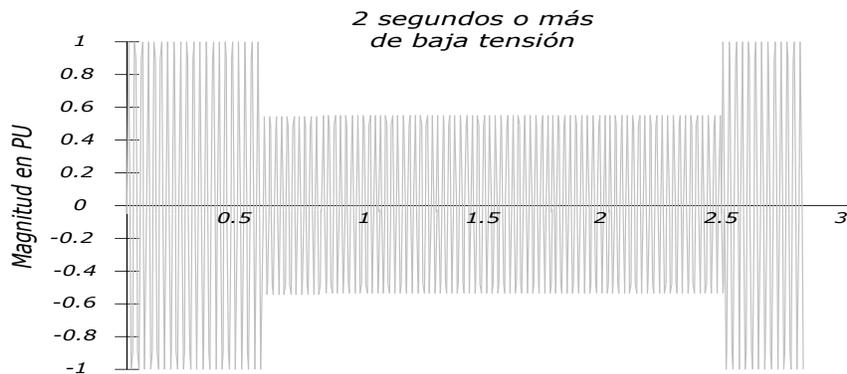


Fig. 2.3 Condición severa de baja tensión.

Las bajas tensiones también son producto de la conmutación de cargas, pero con efectos opuestos a las sobretensiones. Por ejemplo, la energización de una carga conduce a una

caída de tensión, hasta que el equipo de regulación u otro dispositivo compensen dicho cambio.

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

Interrupciones sostenidas

Interrupciones de tensión con una duración mayor a un minuto y que requieren de la intervención del personal para restaurar el sistema.⁶

2.3.3. Variaciones de tensión de corta duración

Las variaciones de tensión de corta duración son causadas por condiciones de falla o conmutación de cargas o pérdidas discontinuas de conexiones en la instalación y su duración está limitada a 3 segundos. La falla puede provocar caídas de tensión temporales (sags), sobretensiones temporales (swells) o una pérdida por completo de energía (interrupciones), dependiendo de su localización y las condiciones del sistema.⁶

Interrupciones

Una interrupción es una pérdida de potencia menor a 0.1 pu por un periodo de tiempo no mayor a un minuto.⁶ Las interrupciones pueden resultar de fallas en el sistema de potencia, fallas en el equipo o mal funcionamiento del control. La duración de una interrupción debida a una falla en el sistema está determinada por el tiempo de operación de los dispositivos de protección utilizados.

Las interrupciones se clasifican de acuerdo a su tiempo de duración en:⁶

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

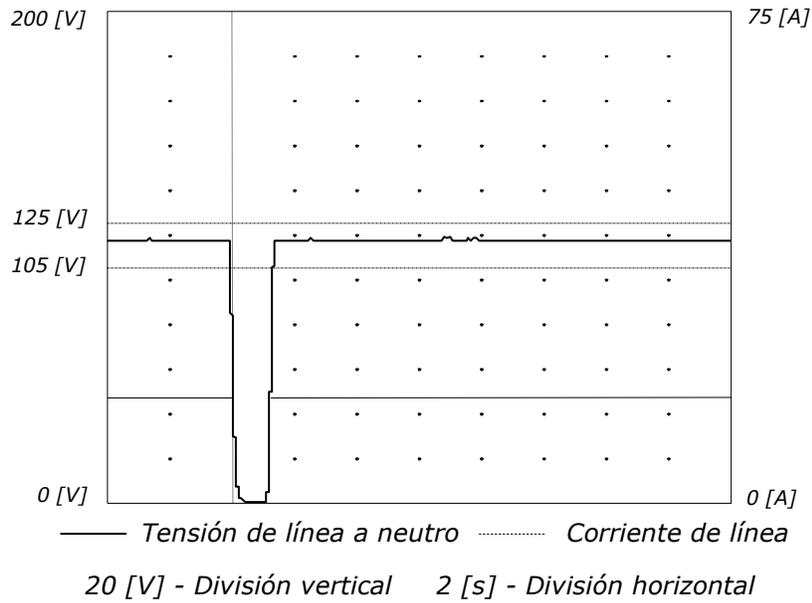


Fig.2.4 Ejemplo de interrupción momentánea.

Sags

Un sag es un decremento entre 0.1 y 0.9 pu en el valor de tensión RMS a la frecuencia fundamental, con una duración de 0.5 ciclos a 1 minuto.⁶ La duración típica de los sags es de 10 a 500 milisegundos, pero podrían alcanzar los 2 segundos (120 ciclos).

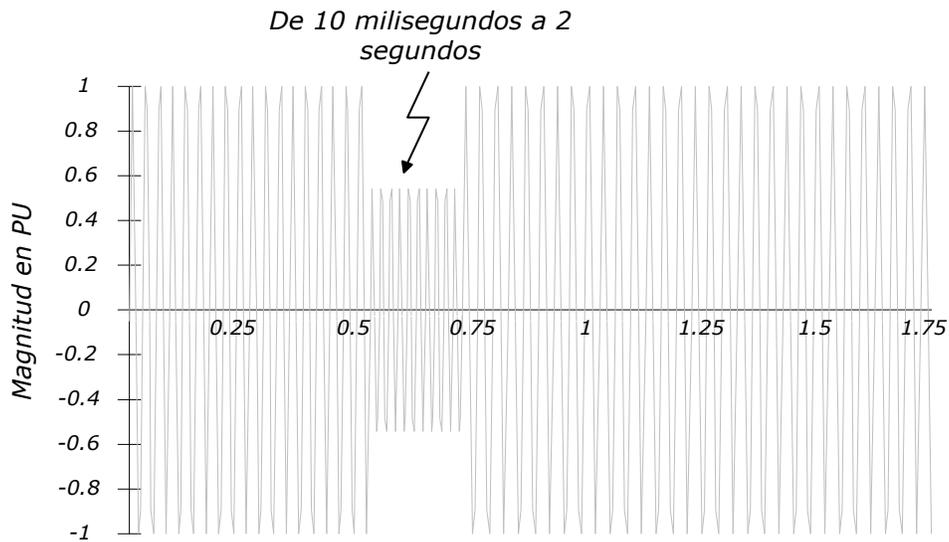


Fig.2.5 Sag en un alimentador debido a una falla.

Los sags generalmente son asociados con fallas en el sistema, pero al igual pueden ser causados por arranque de motores, energización de cargas pesadas o por fallas en alimentadores adyacentes y su duración depende de los tiempos de libramiento de la corriente de falla.

Los sags más comunes son debidos a fallas de línea a tierra, pero los más severos son debidos a fallas trifásicas. El problema más común causado por el sag es el disparo indeseado de los controladores de proceso y apertura de contactos de contactores.

Swells

Un swell es un incremento entre el 1.1 y 1.8 pu en la magnitud de la tensión RMS en cualquiera de las fases del sistema. La duración del swell puede ser de 0.5 ciclos a 1 minuto.⁶

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

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

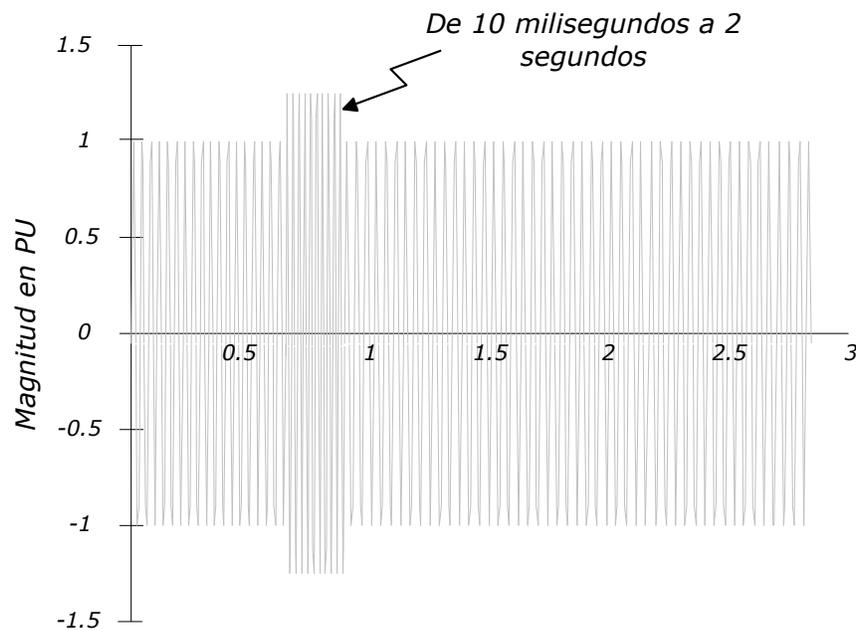


Fig.2.6 Swell de voltaje provocado por la energización de un banco de capacitores.

2.3.4. Desbalance de tensión

Condición en la cual las tensiones de las tres fases difieren en amplitud o están desplazadas a diferente ángulo de su defasamiento normal (120°).⁶

El desbalance de tensión está definido como la relación de la componente de secuencia negativa o cero a la componente de secuencia positiva.⁵ Las tensiones de secuencia negativa o cero en un sistema de potencia, generalmente resultan del desbalance de cargas que originan corrientes de secuencia negativa o cero.

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

2.3.5. Distorsión en la forma de onda

Es una distorsión en estado estable de una onda senoidal ideal a la frecuencia fundamental, caracterizada principalmente por el contenido espectral de la distorsión.⁶

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

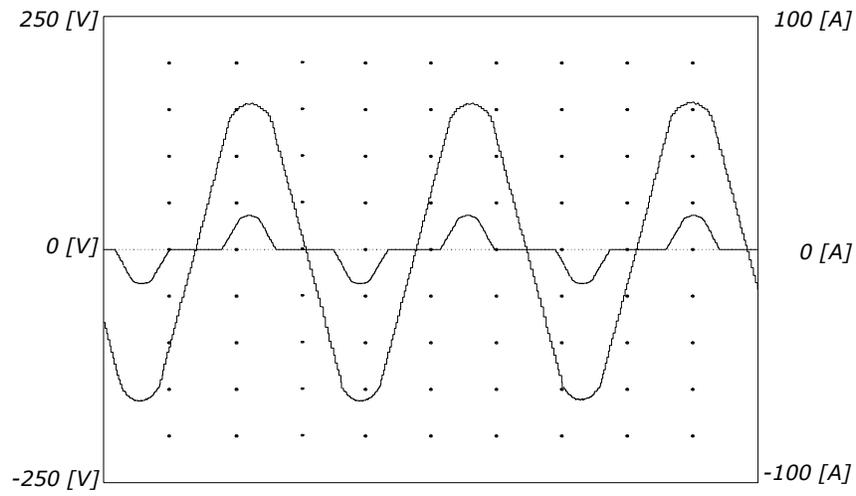
Componente de DC

Es la presencia de corriente directa en un sistema de corriente alterna. Esto puede ocurrir por convertidores electrónicos conectados a la red de suministro o durante la entrada en operación de cargas no-lineales como son los hornos de arco eléctrico y soldadoras.⁶

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

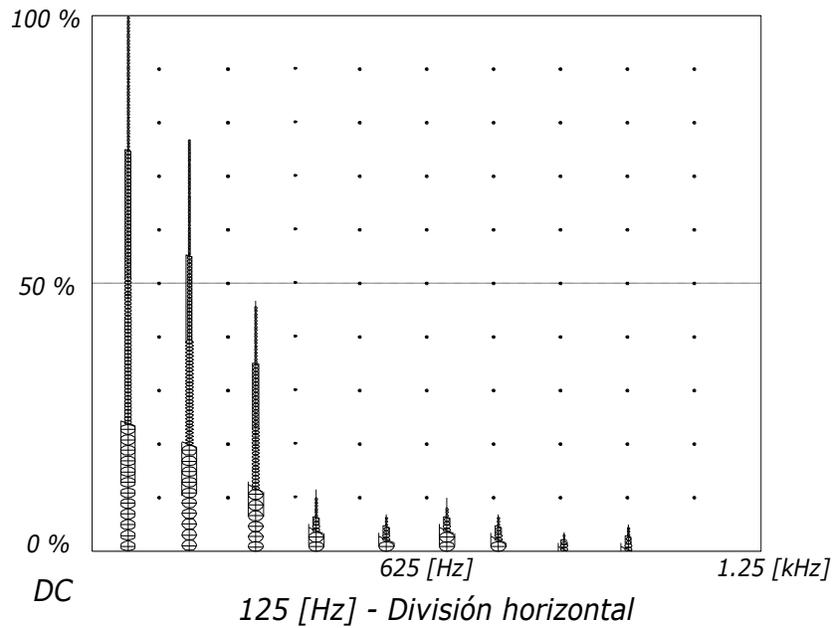
Armónicas

Las armónicas son señales cuya frecuencia es un entero, múltiplo de la frecuencia principal o fundamental.⁶ Las armónicas son producidas por cargas no lineales, como dispositivos electrónicos, dispositivos de arqueo, equipo con núcleo magnético, etc.



5 [ms] - División horizontal

Fig.2.7 Corriente armónica y voltaje de línea.



125 [Hz] - División horizontal

Fig.2.8 Espectro de frecuencias armónicas.

Interarmónicas

Las interarmónicas son tensiones o corrientes senoidales con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.⁶

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

Notching

Es un disturbio repetitivo en la forma de onda de tensión, causado por el traslape en la conducción de los dispositivos de electrónica de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra.⁶

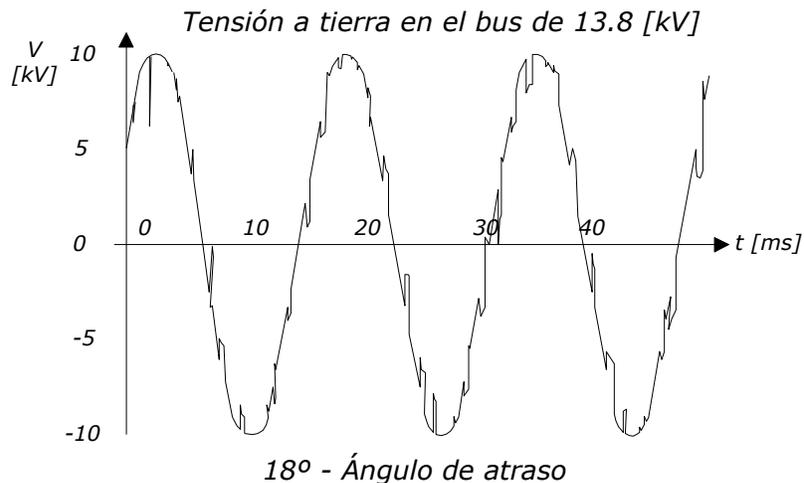


Fig.2.9 Notching ocasionado por equipo no lineales.

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

Ruido

El ruido es una señal eléctrica indeseable con ancho de banda menor a 200 [kHz] superpuesta a la señal de corriente o tensión del sistema.⁶

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

Por lo general, el ruido resulta de los dispositivos de electrónica de potencia, arco entre conductores o cargas con rectificadores de estado sólido.

Puede existir ruido en cualquiera de las dos siguientes formas:

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

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

El modo de ruido común puede con frecuencia ser eliminado a través del uso de transformadores de aislamiento; el modo normal de ruido requiere filtros o líneas acondicionadoras para ser eliminados. El método apropiado para controlar el ruido depende de la susceptibilidad del equipo, método de acoplamiento y el rango de frecuencia del ruido.

2.3.6. Fluctuaciones de tensión (Flicker)

Son una serie de cambios continuos en la tensión, los cuales regularmente no exceden el rango de 0.9 a 1.1 pu.⁶ Las variaciones de tensión originadas por cargas no lineales que demandan altas y variables corrientes, se denominan flicker. Si las variaciones de tensión se repiten a intervalos cortos de tiempo, se producirán fluctuaciones en la iluminación perceptibles para el ojo humano, principalmente de aquella emitida por lámparas incandescentes.

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

Los hornos de arco eléctrico, así como las soldadoras, son la causa más común de las variaciones de tensión en el sistema de transmisión y distribución. En instalaciones residenciales, el efecto de flicker es producido por el arranque automático de refrigeradores o al energizarse calefactores o estufas eléctricas.⁶

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

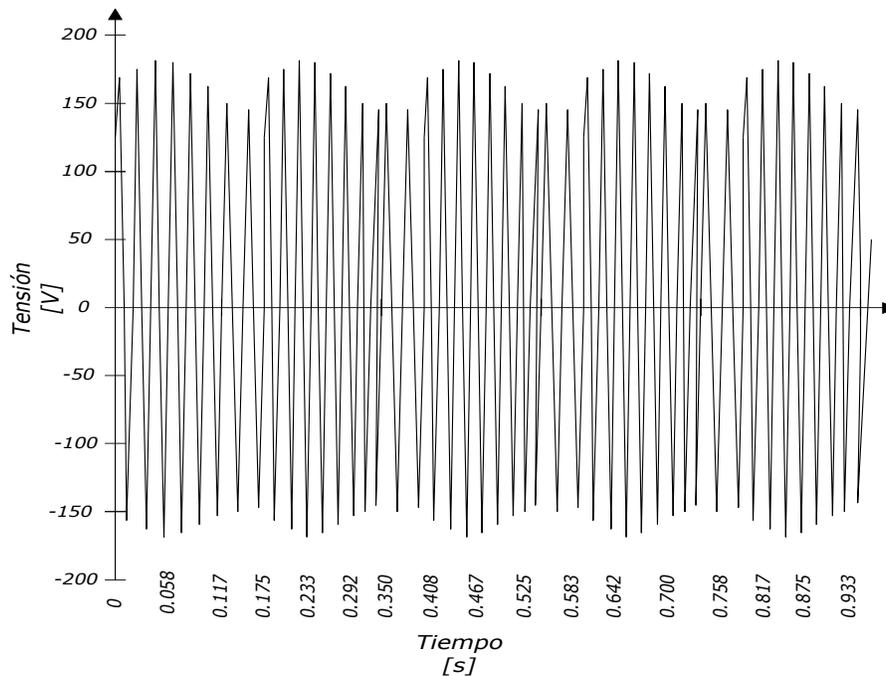


Fig.2.10 Flicker producido por el arranque automático de un calefactor.

2.3.7. Variaciones en la frecuencia

La frecuencia de un sistema eléctrico está definida por la relación entre la carga y la capacidad de generación; si éste balance cambia, se presentan ligeros cambios en la frecuencia. La magnitud de las variaciones y su duración dependen de las características de la carga y de la respuesta del sistema de generación.⁶ Las variaciones en la frecuencia pueden ser causadas por fallas en el sistema de transmisión, desconexión de grandes cargas o paro de alguna fuente de generación.

2.4. Curva CBEMA

La curva CBEMA define los límites, en estado estable y transitorio, dentro de los cuales la tensión de alimentación puede variar sin afectar el funcionamiento o causar algún daño a los equipos de cómputo.⁷

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

Los puntos debajo de la envolvente son causados por fallas en el sistema de potencia, pérdida de energía o incremento de la carga. Los puntos arriba de la envolvente son causados por fallas de aislamiento, operación de fusibles limitadores de corriente, sobretensión y sobreexcitación.⁶

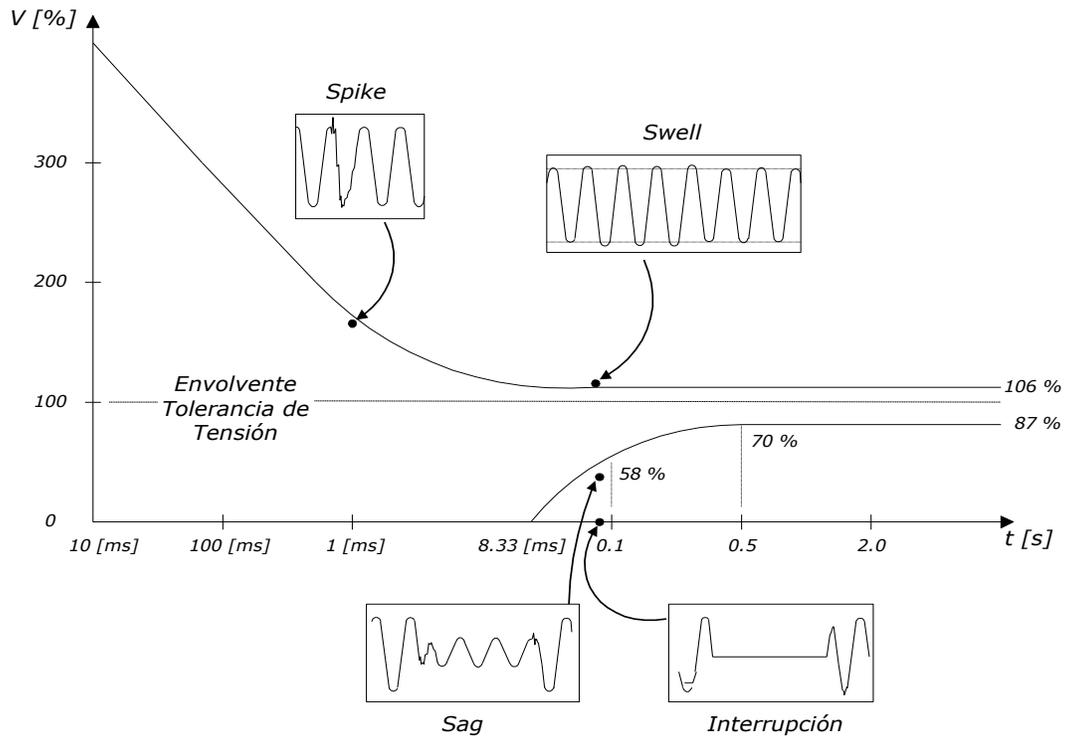


Fig.2.11 Curva CBEMA.

Capítulo 3.

Armónicas

3.1 Introducción

El constante incremento de cargas no lineales, así como de equipos que mejoren el funcionamiento de la energía eléctrica han provocado el aumento de efectos que deterioran la calidad de la energía y han ocasionado mayor interés en el estudio sobre armónicos y sus efectos en los sistemas eléctricos de potencia, estos distorsionan la onda fundamental de voltaje de 60Hz y a su vez la corriente que le demandan a la fuente de alimentación alterna. Debido a estas distorsiones, tanto los usuarios interconectados y la empresa suministradora presentan diversos problemas, por ejemplo: aumento excesivo de la temperatura de los transformadores y de cables conductores, el mal funcionamiento de plantas eléctricas, resonancia, interferencia electromagnética en equipos de comunicación, entre otros.

Con lo anterior es necesario considerar un trabajo en conjunto de la empresa suministradora y de los usuarios para llevar a cabo acciones que eviten estas alteraciones.

3.2 Definición de Armónica

Según la norma IEEE-519, está definido como el contenido de la señal, cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia de repetición base o frecuencia fundamental⁸

Por lo tanto, una frecuencia armónica está expresada de la ecuación (3.1):

$$f_n = n * f_1 \quad (3.1)$$

Donde:

f_n : frecuencia Armónica. [Hz]

n : orden de la armónica o múltiplo

f_1 : frecuencia fundamental. [Hz]

En el caso del sistema eléctrico de potencia la frecuencia fundamental f_1 tiene un valor de 60Hz o 50Hz.

3.3 Distorsión armónica

Esta se presenta cuando la frecuencia fundamental y la forma de onda fundamental se ven modificadas por las diversas armónicas presentes en el sistema eléctrico de potencia, originadas por diversas cargas no lineales o perturbaciones en el sistema eléctrico de potencia.

3.4 Distorsión armónica total

La distorsión armónica total (THD, de sus siglas en inglés) es una expresión usada para cuantificar el nivel de armónicas en las formas de onda de voltaje y corriente. La siguiente ecuación muestra como calcular el THD de las ondas de voltaje y corriente, se realiza comparando la magnitud del contenido armónico presente en un punto del sistema eléctrico con la magnitud de la frecuencia fundamental, ya sea para voltaje o corriente:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}{I_1} * 100\% \quad (3.2)$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}}{V_1} * 100\% \quad (3.3)$$

THD_i : Distorsión Total Armónica de Corriente. [%]

THD_v : Distorsión Total Armónica de Voltaje. [%]

I_1 : corriente a frecuencia fundamental. [Vrms]

V_1 : voltaje e a frecuencia fundamental. [Vrms]

I_n : valor eficaz de la enésima corriente. [Arms]

3.5 Fuentes comunes de armónicas

La generación de corrientes armónicas en los sistemas eléctricos de potencia es debida a la presencia de cargas no lineales, y equipos lineales que con electrónica de potencia se comportan como cargas no lineales entre ellos podemos encontrar compensadores estáticos, rectificadores, convertidores, variadores de frecuencia, y se tienen cargas que por su operación normal son también generadoras de corrientes armónicas como hornos de inducción, de arco eléctrico, soldadoras, entre otros.

3.5.1 Rectificadores

Son dispositivos que se encargan de convertir la corriente alterna en corriente directa, el cual es operado con elementos semiconductores para la conversión de la corriente alterna a directa. Con respecto al número de fases que se opera en un sistema eléctrico de potencia existen dos tipos de rectificadores: monofásico y polifásicos; estos proporcionan perturbaciones considerables a la red eléctrica debido a su continua utilización.

- i. Los rectificadores monofásicos, son una de las fuentes principales de distorsión armónica en la red de consumo doméstico, debido a:
fuentes de alimentación en ordenadores de computo, reguladores de velocidad de aire acondicionado, reactancias electrónicas para alumbrado público, solo por mencionar algunos. Cabe recalcar, que el uso en conjunto es la causante de la distorsión de la corriente en el sistema eléctrico, lo que origina circulación de corrientes armónicas. A su vez, estos rectificadores son empleados en aplicaciones de gran potencia eléctrica como: la tracción eléctrica de motores; ocasionando distorsión en la onda de corriente, lo que puede provocar desequilibrios importantes en la red.
- ii. Los rectificadores polifásicos, son fuentes principales de distorsión armónica en cargas industriales, son usados principalmente en inversores y en variadores de velocidad para motores eléctricos. En estos su potencia es considerablemente mayor a los presentes en la red doméstica, por lo que su inyección de corriente armónica se ve modificada por el tipo de filtrado usado en el rectificador y por la impedancia presente en el lado de alterna.

3.5.2 Transformadores

Los transformadores son elementos pasivos de importancia en el sistema eléctrico de potencia debido a que permiten el aumento o la disminución de un valor de tensión de corriente alterna, sin embargo, para lograr su condición de operación es necesario una corriente de magnetización en el núcleo del transformador que permite inducir un valor de tensión en los devanados del transformador que contiene corriente de 3^{er} y 5^o orden principalmente.

3.5.2.1 Corriente de inrush

La corriente de inrush es una corriente de energización del transformador cuyo valor es de 8 a 12 veces la corriente a plena carga con una duración de 100 milisegundos; una vez alcanzado su valor la corriente decae a su valor nominal de plena carga.

Dicha corriente llega a provocar el mal funcionamiento de interruptores y fusibles, ocasionando:

- Sobretensiones de 60 Hz en la red eléctrica debidas a resonancia y sobretensiones transitorias por maniobra de interruptores de potencia.
- Radio interferencias en líneas de comunicación próximas.

3.5.3 Máquinas rotatorias

Las maquinas rotatorias producen armónicas de alto grado y de amplitud normalmente despreciable, las pequeñas maquinas síncronas son sin embargo generadoras de tensiones armónicas de 3^{er} orden que pueden tener influencia, en:

- El calentamiento permanente de las resistencias de las puestas a tierra del neutro de los alternadores.
- El funcionamiento de los relés de protección contra defectos de aislamiento.

3.5.4 Dispositivos de arco eléctrico

Dentro del dispositivo de arco eléctrico encontramos el alumbrado de alta potencia eléctrica (a base de vapor de mercurio o de aditivos metálicos) así mismo las maquinas soldadoras individuales y los hornos de arco eléctrico, estos últimos aportan gran cantidad de armónicos a la red eléctrica.

Estos dispositivos ocasionan:

- Generación de todas las corrientes armónicas 2^a, 3^a, 4^a, 5^a, 7^a,

3.6 Resonancia

La resonancia es un efecto en el sistema eléctrico de potencia que sucede cuando la reactancia inductiva total cancela la reactancia capacitiva total, es decir, la impedancia equivalente del circuito es la resistencia de corto circuito; al presentarse este efecto los valores RMS de corriente y de tensión alcanzan valores altos, provocando vibraciones y ruido con una alta intensidad en los transformadores de potencia ocasionando así disturbios en la red.

3.6.1 Resonancia en serie

La resonancia serie ocurre cuando una reactancia inductiva y una reactancia capacitiva que están en serie son iguales a alguna frecuencia, este concepto es utilizado para el diseño de filtros de corrientes armónicas. El filtro de corrientes armónicas se diseña para filtrar o atenuar la corriente armónica más significativa de los sistemas industriales, comerciales y de empresas suministradoras. Por lo tanto, el filtro ofrece una impedancia muy baja al flujo de corrientes armónicas de frecuencia igual a la de resonancia serie. Bajo estas condiciones, la impedancia del circuito resonante serie puede ser utilizada para absorber corrientes armónicas deseadas.

3.6.2 Resonancia en paralelo

La resonancia en paralelo ocurre cuando la reactancia inductiva del sistema eléctrico es igual a la reactancia capacitiva (conectada en paralelo con respecto al sistema de potencia) de bancos de capacitores, cables de potencia o línea de transmisión; La característica de un circuito resonante paralelo es una alta impedancia al flujo de corrientes armónicas de frecuencia igual a la de resonancia paralelo. Un ejemplo de utilización de este fenómeno son las trampas de onda ya que su frecuencia de resonancia paralelo es del orden de 350 KHz.

3.7 Normatividad sobre el problema de armónicas

3.7.1 Estándar IEEE 519-1992¹⁰

En este estándar se aborda el problema de armónicas como un problema común entre el usuario con cargas no lineales de la red eléctrica y la empresa encargada de suministrar energía eléctrica, ya que en ella se establecen los límites de distorsión armónica que los usuarios pueden proporcionar a la red eléctrica. Así mismo, establece los límites de

distorsión armónica para la tensión que la compañía suministradora proporciona a los usuarios.

Estos límites están referidos al punto común de conexión (PCC, de sus siglas en inglés) entre usuario y empresa suministradora, dichos límites son tales que proporcionan la correcta operación de los equipos y del sistema.

La siguiente tabla muestra los valores máximos de los valores armónicos impares en el sistema eléctrico:

$V_N \leq 69[\text{kV}]$						
I_{cc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	<i>TDD</i>
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69[\text{kV}] < V_N \leq 161[\text{kV}]$						
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	5.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.75	0.7	10.0
$V_N > 161[\text{kV}]$						
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Tabla 3.7-1 Niveles de distorsión armónica permisibles en la corriente de acuerdo al estándar IEEE 519-1992.¹⁰

Donde la Distorsión Total de la Demanda (*TDD*, de sus siglas en inglés) la ecuación (3.4) muestra como calcularla.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}{I_L} * 100\% \quad (3.4)$$

TDD: Distorsión Total de la Demanda. [%]

I_L : corriente de carga máxima a frecuencia fundamental . [Arms]

I_n : valor eficaz de la *n*ésima corriente armónica. [Arms]

De la tabla:

- h , es el orden de la armónica.
- V_N , es la tensión nominal de conexión al sistema.
- I_{cc} , corriente de corto circuito máxima en PCC.
- I_L , es la componente fundamental de la corriente de carga máxima.

Una manera de saber que tan robusto es el PCC, es realizando la relación I_{cc}/I_L , por lo que un usuario con una relación baja representa una situación de conexión desfavorable, es decir, que a una relación mayor los límites serán menos estrictos.

Para la tabla anterior hay que considerar lo siguiente:

- Para armónicas pares, los límites son un 25% del mostrado en la tabla.
- En todos los equipos de generación los límites usuales se muestran en el renglón cuya relación es $I_{cc}/I_L < 20$.
- Estos límites son máximos y sólo se permiten bajo condiciones de operación. Si en el sistema se presentan operaciones inusuales o anormales estos límites pueden excederse hasta un 50% durante un periodo menor a una hora.

Para los valores de tensión también existen límites de manera individual y de manera global, en este caso no se utiliza el valor eficaz de la componente fundamental sino el valor de la tensión nominal, V_N .

V_N	Distorsión armónica individual	THD - V_N
≤ 69 [kV]	3.0	5.0
69[kV] – 161[kV]	1.5	2.5
> 161 [kV]	1.0	1.5

Tabla 3.7-2 Niveles de distorsión armónica permisibles en la tensión de acuerdo al estándar IEEE 519-1992.¹⁰

De la tabla:

- THD - V_N , es la distorsión armónica total de tensión.

Teniendo esto en cuenta, tanto usuarios como empresa suministradora deben cumplir con los límites establecidos en la norma, ambos realizando estudios, mediciones y acciones para su prevención y corrección.

3.7.2 Especificación CFE L0000-45-2005¹¹

En México, un estándar similar al IEEE 519-1992 es: la especificación CFE L0000-45-2005¹¹, en el cual, al igual que en el anterior mencionado fija límites para la distorsión armónica de corriente y tensión, esta especificación basa sus límites de acuerdo al estándar de IEEE sólo que, en los niveles de tensión nominal para la especificación, utiliza las tensiones existentes en México. A continuación, se muestran dichos límites.

$V_N \leq 69$ [kV]						
I_{cc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0

>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
69[kV] < V_N ≤ 138[kV]						
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	5.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.75	0.7	10.0
V_N > 138[kV]						
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Tabla 3.7-3 Niveles de distorsión armónica permisibles en la corriente de acuerdo a la especificación CFE L0000-45 2005.¹¹

La tabla siguiente difiere con respecto a la del estándar de la IEEE 519-1992, debido a que la especificación considera límites de tensión nominal de conexión diferentes.

V_N	Distorsión armónica individual	THD - V_N
<1[kV]	5.0	8.0
1[kV] – 69[kV]	3.0	5.0
69[kV] -138[kV]	1.5	2.5
> 138[kV]	1.0	1.5

Tabla 3.7-4 Niveles de distorsión armónica permisibles en la tensión de acuerdo a la especificación CFEL0000 -45 2005.¹¹

3.8 Efectos de la distorsión armónica

Como se ha mencionado anteriormente, la distorsión armónica afecta el comportamiento del sistema eléctrico de potencia y a los elementos que los conforman, dichos efectos van desde el calentamiento de los elementos, el mal funcionamiento de ellos hasta su avería, a continuación, se hará mención a elementos cuyo estudio es recurrente en el sistema eléctrico.

3.8.1 En elementos lineales del sistema eléctrico de potencia.

i. Conductores

Debido a la circulación de corrientes armónicas en el conductor, existen dos efectos: el aumento de la resistencia efectiva y el aumento de pérdidas en el conductor. En este caso, el segundo es consecuencia del primero.

Lo anterior se justifica analizando el segundo efecto y por consecuencia el primero será justificado, considerando lo anterior, las pérdidas son cuantificadas mediante la ecuación (3.5):

$$P_{e-c} = \sum_{n=1}^{\infty} R_n I_n^2 \quad (3.5)$$

Donde:

P_{e-c} : pérdidas en el conductor. [W]

R_n : resistencia efectiva que presenta el conductor a I_n . [Ω]

I_n : valor eficaz de la n ésima corriente armónica. [Arms]

Con base a la ecuación (3.5), el incremento de P_{e-c} se debe a la presencia de corrientes armónicas, sin embargo, mientras incrementa el valor de pérdidas también lo hace la resistencia efectiva, esto se observa en la siguiente ecuación:

$$R_n = R_{CD}(1 + 7.5 \times 10^{-7} (nf_1)^2 d^4) \quad (3.6)$$

Donde:

R_{CD} : resistencia del conductor a corriente directa. [Ω]

R_n : resistencia efectiva que presenta el conductor a I_n . [Ω]

f_1 : frecuencia fundamental. [Hz]

n : orden de la armónica o múltiplo

d : diámetro del conductor. [cm]

Como se muestra en la ecuación (3.6), el aumento de la resistencia efectiva aumenta conforme se presente una armónica, cuya frecuencia es consecuentemente mayor. Este aumento de la resistencia se debe a un fenómeno denominado *skin* o *piel*, que explica la tendencia de la corriente alterna a circular por la superficie exterior del conductor. Este fenómeno se hace más notorio para las armónicas de orden alto.⁹

Por lo anterior, podemos concluir que el aumento de la resistencia es el causante del calentamiento del cable y por ende pérdidas en el mismo, a la hora de su dimensionamiento, el calibre del conductor tendrá que corregirse si en el lugar existe distorsión armónica.

ii. Transformadores

Estos elementos presentan distorsión de corriente y de la tensión de alimentación de un transformador, estos producen diversos efectos que no interfieren en operación normal, otros tienden a reducir su vida útil del transformador. A continuación, se mencionan efectos que se presentan cuando existen distorsiones armónicas en él:

a. Incremento del ruido

Generalmente, dentro de la operación de la operación senoidal del transformador produce un zumbido característico así cuando se producen distorsiones en corriente y en tensión originando que el zumbido incremente provocando vibraciones en el transformador y un aumento en el ruido generado. Dicho zumbido, no genera alguna repercusión en la operación del transformador, a su vez dicho zumbido es indicador de la presencia de distorsión armónica.

b. Aumento de pérdidas

Al igual que en los conductores y líneas de transmisión, su efecto principal de las armónicas en los transformadores es al aumento de las pérdidas. Esto se traduce en el aumento de la temperatura del aparato por ende mayor calor, provocando el deterioro del aislamiento y su reducción de la vida útil del transformador.

c. Disminución de la capacidad

Otro efecto de la corriente de carga de los transformadores, al presentarse distorsión armónica, es la disminución de su capacidad debido a que se fija un margen de entrada de corriente armónica en los transformadores lo cual preserva la vida útil del transformador. Esto se realiza disminuyendo el valor eficaz de la corriente de carga.

iii. Banco de capacitores

La presencia de un banco de capacitores en el sistema eléctrico de potencia se hace presente mediante una reactancia la cual es afectada por la frecuencia y como se ha mencionado, la presencia de corrientes armónicas afecta la frecuencia de operación del sistema y por lo tanto, la reactancia capacitiva del banco de capacitores se ve afectada, de tal manera que al aumentar el orden de la frecuencia armónica la reactancia disminuye provocando un camino de baja impedancia permitiendo la circulación de corrientes armónicas dentro del banco de capacitores lo que puede incurrir en una sobrecarga o en el peor de los casos en su destrucción. Otro de los fenómenos que afectan a los bancos de capacitores es la resonancia en paralelo y en serie, dichos fenómenos generan perturbaciones en la tensión del sistema.

3.8.2 En el sistema eléctrico de potencia

La presencia de armónicas en un sistema eléctrico de potencia puede acarrear múltiples problemas, tales como:

- a. Sobrecalentamientos en los conductores especialmente en el neutro de las instalaciones, debido al efecto pelicular que provocan las corrientes armónicas de secuencia cero en el conductor.
- b. Disparos intempestivos de Interruptores Automáticos y Diferenciales.

- c. Disminución del factor de potencia de una instalación y envejecimiento e incluso destrucción de las baterías de condensadores utilizadas para su corrección debido a fenómenos de resonancia y amplificación.
- d. Vibraciones en cuadros eléctricos y acoplamientos en redes de telefonía y de datos.
- e. Calentamientos, degradaciones en los aislamientos, embalamientos y frenados en motores asíncronos.
- f. El mal funcionamiento de equipos de medición.

3.8.3 En las comunicaciones

Actualmente las comunicaciones han tenido un avance sustancioso lo que ha permitido mejorar su calidad de transmisión y recepción de datos, dichas acciones se realizan por medio de diversos elementos que compongan un circuito de comunicaciones.

Estos elementos se ven afectados por los armónicos de diversas maneras, una de las principales afectaciones, es el ruido provocado por los armónicos en los circuitos electrónicos de comunicación provocando un funcionamiento errático, otro efecto que provoca circulación de corriente armónica se debe a la mala práctica de la puesta a tierra de los cables de comunicación que lleven blindaje metálico provocando interferencia en los cables de comunicación ya que uno de los factores que propicia la interferencia es la presencia de diversas frecuencias; fenómeno característico que se presenta al existir armónicos.

3.8.4 En equipo electrónico

Debido a las afectaciones de los armónicos en el sistema eléctrico de potencia, los equipos eléctricos alimentados de este, son afectados por las variaciones de tensión provocando el mal funcionamiento de los equipos electrónicos, esto también se debe al ruido generado por las armónicas que alteran el comportamiento de los dispositivos electrónicos.

CAPÍTULO 4.

FILTROS DE CORRIENTES ARMÓNICAS

4.1 Introducción

Dentro del sistema eléctrico de potencia encontraremos dispositivos capaces de reducir los efectos de un armónico, entre estos dispositivos, se encuentran los filtros. Dichos elementos son usados de manera frecuente, debido a que no solo realizan la acción de suprimir la frecuencia armónica ya que a la par pueden realizar la compensación de potencia reactiva y dependiendo el tipo de efecto y del armónico presente en el sistema eléctrico de potencia, se adaptará algún tipo de configuración y tipo de filtro para la mitigación del armónico y sus efectos.

4.2 Filtros Pasivos

Un filtro pasivo, es un elemento conformado de dispositivos pasivos, dichos elementos no proporcionan tensión o corriente, entre estos elementos encontramos a los capacitores, resistencias e inductores.

Podemos encontrar dos configuraciones típicas de los filtros en el sistema, en serie y en paralelo conocida también como derivación, dicha configuración dependerá del problema a solucionar.

Así mismo, existen diversos diseños, entre los más comunes se encuentran los filtros sintonizados y amortiguados conectados en paralelo con la fuente de armónicas, resultando más robustos y económicos que otras opciones más complejas y avanzadas.

Su diseño puede seguir diversos criterios:

- Gastos de inversión mínimos
- Gastos de funcionamiento mínimos.
- Entrega de energía reactiva del filtro al sistema.
- Confiabilidad, mantenimiento, continuidad, etc

4.2.1 Filtros en derivación

Como se mencionó anteriormente estos filtros también son llamados en paralelo y se refiere a su conexión que se realiza con la fuente del sistema o aun punto de conexión.

La siguiente imagen ilustra dicha conexión:

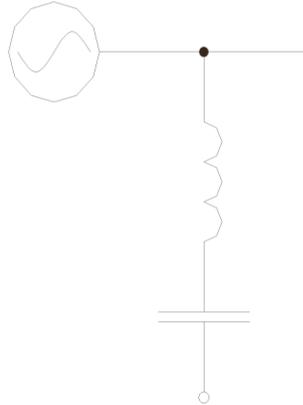


Fig.4.1 Conexión típica en derivación de un filtro.

Dentro de los filtros en derivación, podemos sintonizar o realizar conexiones de los elementos que componen un filtro para lograr cierto tipo de respuesta en el sistema, a continuación, se enlistan algunos ejemplos y se hace una breve descripción de ellos:

a) Filtros de una sintonía

Su función principal es eliminar una armónica específica, de ahí su nombre, sin embargo, estos permiten el paso de cierto porcentaje de armónicas vecinas dentro del espectro de armónicas.

Los filtros de este tipo presentan la siguiente configuración:



Fig.4.2 Conexión típica de un filtro de una sintonía.

Para este filtro la frecuencia de resonancia del filtro coincide con la frecuencia de sintonía, su factor de calidad suele ser mayor debido a que se emplea para eliminar armónicos de bajo orden, así mismo en este filtro la conexión de los elementos se realiza en serie, donde la resistencia presenta con un bajo valor.

b) Filtro de doble sintonía.

Estos se diseñan a partir de dos filtros sintonizados, cumpliendo con las anotaciones anteriores, son utilizados, cuando se requiere instalar dos filtros de una sintonía en un mismo punto.

Los filtros de este tipo presentan la siguiente configuración:

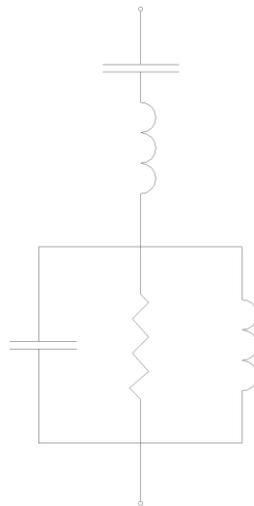


Fig.4.3 Conexión típica de un filtro de doble sintonía.

Al igual que el de una sintonía se considera el factor de calidad dentro de un valor es alto, y se emplea para armónicos de orden bajos, a comparación de una sintonía este filtro a frecuencia fundamental, sus pérdidas de potencia son menores

c) Filtro amortiguado de primer orden

Los filtros amortiguados debido a su configuración se comportan como un filtro pasa altas, el cual, atrapar un gran rango de armónicas, ya que provee un camino de baja impedancia para altas frecuencias debido a las características del capacitor

Los filtros de este tipo presentan la siguiente configuración



Fig.4.4 Conexión típica de un filtro amortiguado de primer orden.

Como este filtro no tiene inductor, la resistencia se elige para limitar la corriente que fluye a través del capacitor. Para poder tener una baja impedancia en altas frecuencias el capacitor comúnmente debe ser grande.

d) Filtro amortiguado de segundo orden

El filtro amortiguado de segundo orden consiste en un capacitor en serie con el paralelo de un inductor y una resistencia. Está dimensionado para que el filtro se comporte como un filtro de primer orden para las frecuencias debajo de la frecuencia de sintonización y como un filtro paso altas de primer orden a frecuencias altas.

Los filtros de este tipo presentan la siguiente configuración:

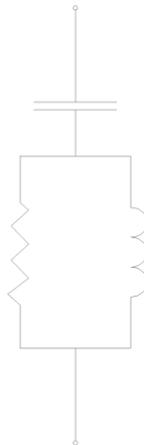


Fig.4.5 Conexión típica de un filtro amortiguado de segundo orden.

Esto es, porque la reactancia inductiva es pequeña a bajas frecuencias y puentea la rama resistiva, a frecuencias grandes la reactancia inductiva aumenta por lo que desvía la corriente a la rama resistiva. Para lograr este comportamiento el capacitor es sintonizado a la frecuencia deseada con el inductor.

e) Filtro amortiguado de tercer orden.

El filtro amortiguado de tercer orden, muestra una gran reactancia capacitiva a la frecuencia fundamental y una baja impedancia; la impedancia del filtro es predominantemente resistiva a altas frecuencias. Se comporta como un filtro de una sintonía cuando está por debajo de la frecuencia de sintonización y similar al filtro de primer orden cuando esta sobre esta.

Los filtros de este tipo presentan la siguiente configuración:

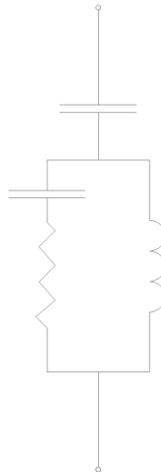


Fig.4.6 Conexión típica de un filtro amortiguado de tercer orden.

En bajas frecuencias la reactancia inductiva es pequeña y puentea la rama RC, en altas frecuencias la reactancia inductiva aumenta y la corriente fluye por la rama compuesta por el capacitor y la resistencia. Los capacitores están sintonizados con el inductor a la misma frecuencia deseada. Como consecuencia, el filtro presenta muy baja impedancia a la frecuencia de sintonización, similar a un filtro de una sintonía.

f) Filtro amortiguado tipo C

El filtro amortiguado tipo C se encuentra entre el filtro de segundo y tercer orden. El circuito LC en paralelo con la resistencia es sintonizado a la frecuencia del sistema y se comporta como un capacitor a frecuencia fundamental.

Los filtros de este tipo presentan la siguiente configuración:

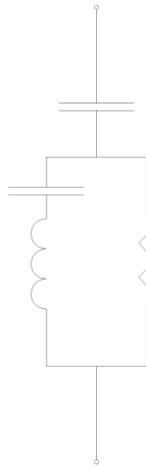


Fig.4.7 Conexión típica de un filtro amortiguado tipo C.

Puede presentarse una corriente muy pequeña circulando por la resistencia y las pérdidas son minimizadas al incrementarse la frecuencia en el inductor; en ese momento comienza a resonar con los capacitores, lo que el filtro se comporta como un filtro de una sintonía, con una resistencia de amortiguación. En altas frecuencias la reactancia inductiva se incrementa y la corriente circulará por la rama resistiva, resultando en una operación parecida al filtro de primer orden⁹.

4.2.2 Filtros en serie

Este filtro, se encuentra conectado en serie con la fuente de alimentación y con la carga encargada de la distorsión de corriente. La configuración básica de los elementos que componen al filtro es en paralelo y dichos elementos son un capacitor y un inductor. A continuación, se ilustra dicha conexión:

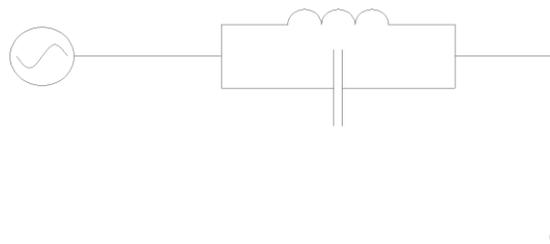


Fig.4.8 Conexión típica en serie de un filtro.

En esta configuración, el filtro presenta una resonancia en paralelo con lo que presenta una alta impedancia a la corriente armónica específica, evitando que la corriente armónica se propague al resto del sistema. Estos filtros también son conocidos como filtros de bloqueo ya que una de sus principales características es atenuar una sola corriente armónica sin embargo su interacción con la impedancia del sistema pudiera provocar que se presente una resonancia serie para alguna otra armónica que produzca la carga o que provenga de la red eléctrica externa⁹.

4.2.3 Filtros pasa bajas

En estos filtros su principal característica se encuentra en limitar el paso de altos valores de corriente armónica permitiendo únicamente el paso de armónicas cuyo valor es menor.

Los filtros de este tipo presentan la siguiente configuración:

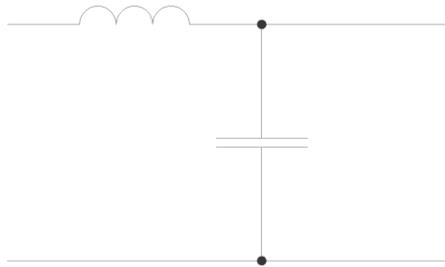


Fig.4.9 Conexión típica de un filtro pasa bajas.

En esta configuración, el componente en serie, presenta una alta impedancia bloqueando el paso de corrientes armónicas indeseadas y la componente en derivación presenta una baja impedancia permitiendo con facilidad la circulación de estas corrientes indeseadas a través del filtro.

CAPÍTULO 5.

ANÁLISIS PARA EL DISEÑO DE UN FILTRO PASIVO DE ARMÓNICAS

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

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

6.3. Consideraciones para el diseño del filtro de armónicas

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

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

- Estudio de la interacción entre el sistema y la carga
- Estudio de flujos de potencia y análisis armónico donde se obtienen los requerimientos de potencia reactiva y magnitudes de corrientes armónicas existentes
- Límites permisibles de corrientes y tensiones armónicas
- Condiciones normales de operación del sistema incluyendo armónicas
- Condiciones normales de operación del filtro de armónicas
- Características y especificaciones del filtro requerido

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

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

La Relación de Corto circuito.

La relación de corto circuito (SCR) es una medida de tamaño de la fuente armónica con respecto a la habilidad del sistema para absorber la corriente armónica. Este es un parámetro importante para la determinación de su efecto en la red, esto se calcula de la de acuerdo a la ecuación (5.1):

$$SCR = \frac{S_{CC}}{S_{carga}} \quad (5.1)$$

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

Las Caídas de Tensión

La variación del nivel de carga o la conmutación de elementos en el sistema, provocará una caída de tensión en los reactores en derivación, mientras que los bancos de capacitores al suministrar potencia reactiva, podrían provocar el aumento de la tensión en casos de baja carga. La magnitud de estas caídas de tensión dependerá de la capacidad del elemento encargado de conmutar, ya sea en potencia reactiva o aparente respecto a la capacidad de corto circuito de la red. Generalmente al conocer la carga y el nivel de corto circuito del sistema en MVA, se podrá calcular las caídas de tensión aún sin saber el valor de las impedancias respectivas a la carga, sin embargo, estos datos se encuentran directamente relacionados, de tal manera que podemos tener un cálculo muy aproximado mediante la siguiente ecuación (5.2):

$$Caída\ de\ tensión = \frac{MVA_{carga}}{MVA_{carga} + MVA_{cc}} * 100 [\%] \quad (5.2)$$

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

Impedancia vs Frecuencia

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

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

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

- Hacer un barrido de de un amplio rango de frecuencias, para poder identificar las frecuencias resonantes que podrían estar cerca de las armónicas generadas por las cargas no lineales.
- Los elementos de la red son: generadores, transformadores, líneas de transmisión, reactores, capacitores, motores etc., los cuales tienen impedancias que cambian con la frecuencia.

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

La impedancia en el punto de interés es la información más importante para el diseño de filtros, siendo el equivalente, la capacidad de corto circuito del sistema industrial a cada frecuencia y como nos muestra la ecuación (5.3):

$$I_h = Y_h V_h \quad (5.3)$$

Donde:

I_n : corriente armónica de orden n . [A]

Y_n : admitancia armónica asociada a I_n . $\left[\frac{1}{\Omega}\right]$

V_n : voltaje armónico asociado a I_n . [V]

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

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

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

Potencia reactiva capacitiva del filtro

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

Límites permisibles de corrientes y tensiones armónicas

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

Límites del sistema

Los límites permisibles de tensiones armónicas en el sistema generalmente se definen para asegurar que el equipo no funcione mal o falle debido a distorsión armónica excesiva.

Capacidad de aguante del equipo

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

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

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

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

5.1.2 Condiciones normales de operación del sistema

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

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

5.1.3 Condiciones normales de operación del filtro

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

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

5.1.4 Condiciones de contingencia del sistema

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

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

5.1.5 Condiciones de contingencia del filtro

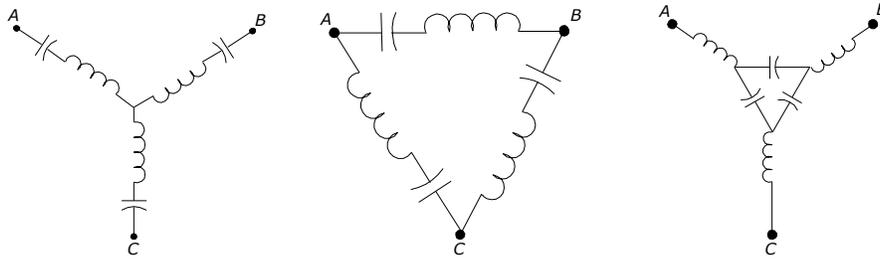
Al evaluar los componentes del filtro de armónicas, se usan los mismos factores que en condiciones normales de operación del filtro, pero con rangos más amplios. Además, cuando se aplican filtros de armónicas múltiples en la misma ubicación, se considera la salida de un filtro para verificar la capacidad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

5.1.6 Ubicación del filtro

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

5.1.7 Configuración del filtro

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



5.2 Filtros de armónicas para sistemas de media y alta tensión

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

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

5.2.1 Consideraciones de sobrecarga armónica

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

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

5.2.2 Especificación de los principales componentes

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

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

Capacitores

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

a) Capacidades de sobrecarga

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

b) Especificación del elemento

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

- La tensión máxima de operación entre fases del sistema.
- Frecuencia fundamental del sistema de potencia.
- El BIL del sistema.
- La potencia reactiva capacitiva efectiva trifásica total (MVAR) a tensión nominal.
- La frecuencia de sintonía del filtro.
- Tipo de instalación (interior, exterior, en tablero).
- Condiciones ambientales (rango de temperatura ambiente, requerimientos de distancia de fuga, contaminación industrial, máxima velocidad del viento, carga por nieve, requisitos sísmicos, mayor altitud que 1800 msnm).
- Capacitancia del banco de capacitores del filtro y tolerancia.
- Picos de tensiones armónicas individuales aplicadas al capacitor o corrientes armónicas individuales a través de los capacitores, incluyendo la fundamental,

durante las diferentes condiciones en las cuales el filtro operará (estado estable y contingencia).

- Picos de tensiones transitorias y dinámicas por operaciones de conmutación (re-encendido del arco en el interruptor durante la desenergización del filtro, energización de transformadores).
- Ciclo de trabajo esperado o capacidad de repetición y duración de las corrientes y tensiones de los dos puntos anteriores.
- Configuración del banco de capacitores del filtro (estrella puesta a tierra, estrella flotante o delta).

c) Tensión nominal

La tensión a frecuencia fundamental en estado estable más las tensiones debidas a las corrientes armónicas a través de los capacitores deberán calcularse mediante la suma aritmética de las tensiones a frecuencia fundamental y armónicas como se muestra en la ecuación (5.4).

$$V_c = \sum_{n=1}^{\infty} X_{c_n} I_n \quad (5.4)$$

Donde:

V_c : voltaje rms nominal del capacitor. [Vrms]

I_n : valor eficaz de la n ésima corriente armónica. [Arms]

X_{c_n} : reactancia capacitiva a la armónica I_n . [V]

n : orden de la armónica.

Si la corriente fundamental a través del capacitor no es especificada, la tensión puede calcularse como la siguiente ecuación (5.5):

Donde:

$$V_c = V_{c_1} + \sum_{n=1}^{\infty} X_{c_n} I_n \quad (5.5)$$

$$V_{c_1} = V_s \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \quad (5.6)$$

V_{c1} : voltaje rms máxima a 60 Hz aplicada al capacitor,
incluyendo la elevación de voltaje por el reactor de sintonía. [Vrms]

V_s : voltaje máximo del sistema aplicada al capacitor,
sin incluir la elevación de voltaje por el reactor de sintonía. [Vrms]

n : orden de la armónica de sintonización del filtro (1.9, 2.9, 3.9, 4.9, ...)

d) Configuración del banco

Para armónicas de secuencia positiva y negativa, cualquiera que sea, estrella puesta a tierra, estrella flotante o delta no afecta el desempeño. Las armónicas de secuencia cero deben ser controladas por un banco configurado en estrella puesta a tierra. La capacitancia de dicho filtro se basa en la potencia reactiva necesaria para mejorar el factor de potencia de la carga como nos muestra la siguiente ecuación (5.7):

$$Q = \frac{V^2}{X_C} [MVAR] \quad (5.7)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} [\Omega] \quad (5.8)$$

Debemos de tomar en cuenta que el banco de capacitores está sometido a voltajes pico los cuales se traducen en grandes esfuerzos dieléctricos, por lo que el voltaje pico a través del capacitor será justamente la suma aritmética de los voltajes pico de la frecuencia fundamental y la sintonizada. Para calcular el voltaje máximo a través del filtro, de fase a tierra se tiene que cumplir la ecuación (5.9):

$$V_{L-N} = \frac{(1.05)V_{L-L}}{\sqrt{3}} [V] \quad (5.9)$$

La corriente absoluta a través del capacitor será como nos indica la ecuación (5.10):

$$I_{c1} = \frac{V_{L-N}}{X_C - X_L} [A] \quad (5.10)$$

Por lo que el voltaje del capacitor a la frecuencia fundamental será como nos dice la ecuación (5.11):

$$V_{c1} = X_{c1} I_{c1} [V] \quad (5.11)$$

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

Por lo que al obtener esa corriente utilizamos la ecuación (5.12) para obtener el voltaje de la armónica sintonizada de la siguiente manera:

$$V_{c_4} = X_{c_4} I_4 [V] \quad (5.12)$$

Por lo tanto, como vemos en la ecuación (5.13), la tensión pico a través del capacitor es:

$$V_{max} = \sqrt{2}V_{c_1} + \sqrt{2}V_{c_n} = \sqrt{2}(V_{c_1} + V_{c_n}) [V] \quad (5.13)$$

De acuerdo con los estándares industriales, los capacitores están diseñados para soportar 120 % del voltaje nominal, por lo que se tendrá que mantener sobre este límite. La selección del filtro consiste en indicar un reactor para que resuene en serie con el banco de capacitores del filtro y que sean equivalentes las inductancias capacitivas como inductivas, en las ecuaciones (5.14) y (5.15).

$$X_c = X_L \quad (5.14)$$

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L \quad (5.15)$$

Reactores

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

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

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

a) Especificación del elemento

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

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

b) Tensión nominal

La tensión nominal en estado estable se calcula como la suma aritmética de la fundamental y las armónicas, su cálculo es similar a los de los capacitores sin embargo se ocupa la reactancia inductiva del reactor, la ecuación (5.16) indica su cálculo:

$$V_R = \sum_{n=1}^{\infty} X_{L_n} I_n \quad (5.16)$$

Donde:

V_R : voltaje rms nominal del reactor. [V_{rms}]

I_n : valor eficaz de la n -ésima corriente armónica. [A_{rms}]

X_{L_n} : reactancia inductiva del reactor a la armónica I_n . [V]

n : orden de la armónica.

c) Inductancia y factor de calidad

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

d) Taps del reactor

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

e) Espectro de corrientes armónicas

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

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

f) Corriente de corto circuito

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

g) Montaje

El punto de conexión del reactor se determina en base a la configuración y aplicación del filtro para aplicaciones de media tensión, el filtro de armónicas generalmente se conecta

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

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

El reactor debe ser capaz de manejar la corriente eficaz total, incluyendo las corrientes armónicas sin que suceda un sobrecalentamiento. Por lo que la corriente eficaz del reactor es obtenida mediante la ecuación (5.17):

$$I_L = \sqrt{(I_{L1})^2 + (I_{LN})^2} \text{ [A]} \quad (5.17)$$

Resistencias

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

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

a) Especificación del elemento

Las especificaciones para la resistencia del filtro deben incluir:

- Tensión máxima de operación del sistema entre fases.
- Frecuencia fundamental del sistema.
- BIL del sistema.
- Tipo de instalación (interior, exterior, dentro de un tablero).
- Condiciones ambientales (rango de temperatura ambiente, distancia de fuga, contaminación industrial, velocidad máxima del viento, carga por nieve, requerimientos sísmicos, altitud mayor a 1800 msnm).

- Resistencia y su tolerancia.
- Corriente nominal fundamental y RMS.
- Variación de la resistencia máxima permitida con la temperatura (si la variación de la resistencia con la temperatura es crítica).
- Magnitud y duración de la corriente de corto circuito máxima a través de la resistencia.
- Magnitud de las corrientes armónicas individuales a través de la resistencia, incluyendo la fundamental, durante diferentes condiciones de operación del filtro (estado estable y contingencias).
- Picos de tensiones transitorias y dinámicas por operaciones de conmutación (reencendido del arco en el interruptor durante la desenergización y energización de transformadores).
- Ciclo de trabajo esperado o repetición y duración de tensiones y corrientes de los dos puntos anteriores.
- Energía nominal del resistor (máxima capacidad de energía, opcional solo para cargas fluctuantes).
- BIL mínimo requerido a través de la resistencia y el BIL mínimos requeridos para las terminales de alta y baja tensión a tierra de la resistencia.
- Dimensiones preestablecidas y arreglo del montaje.

b) Tensión nominal

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

c) Espectro de corrientes armónicas

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

d) Corriente de corto circuito

Los requerimientos de corto circuito máximo para la resistencia son similares a los requerimientos presentados para el reactor del filtro. Sin embargo, estos filtros de sintonización tienen una resistencia que, aunque suele tener valores muy pequeños, este tiene gran importancia en el diseño de los filtros, lo que se le conoce como calidad del filtro (Q) este es un factor que nos indica la cantidad de pérdidas en el filtro.

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

- La frecuencia del sistema no se encuentra siempre a 60 Hz ya que el sistema tiene un comportamiento dinámico.

- Las tolerancias de fabricación de los componentes dan como resultado, valores de reactancia distintos.
- La fusión de fusibles da como resultado la pérdida de unidades capacitoras por lo que hay un aumento en la reactancia capacitiva.
- Cambio de impedancia en el sistema con el que se planificó el estudio.

Para poder calcular las pérdidas en el filtro están dadas por la sig. ecuación (5.18):

$$P = R * \left(\frac{Q}{V_S}\right)^2 = RI^2 [W]$$

Interruptor

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

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

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

- Tensión máxima de operación del sistema entre fases.
- Puesta a tierra del banco de capacitores del filtro de armónicas (no puesto a tierra, puesto a tierra, puesto a tierra a través de una impedancia).
- La puesta a tierra del sistema (efectivamente puesto a tierra, puesto a tierra a través de una impedancia o flotante).
- Frecuencia fundamental del sistema.
- BIL del sistema.
- Tipo de instalación (interior, exterior, dentro de un tablero).
- Condiciones ambientales (rango de temperatura ambiente, distancia de fuga, contaminación industrial, velocidad máxima del viento, carga por nieve, requerimientos sísmicos, altitud mayor a 1800 msnm).
- Máxima corriente de corto circuito simétrica, asimétrica, momentánea y de interrupción.
- La magnitud y ciclo de trabajo o la capacidad de repetición y duración de las corrientes armónicas individuales a través del interruptor, incluyendo la fundamental, durante diferentes condiciones de operación del filtro.
- BIL del interruptor.
- Ciclo de trabajo de operación del interruptor (número y frecuencia).

- Trabajo de conmutación del filtro de armónicas o banco de capacitores.
- Frecuencia natural del reactor de sintonía del filtro de armónicas. Esta frecuencia natural afecta la relación máxima de la tensión de recuperación a través del interruptor para una falla en el filtro de armónicas.

Conductores

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

Cuchillas de puesta a tierra y bloqueos

Para servicio y mantenimiento del equipo, se incluyen cuchillas trifásicas de puesta a tierra cuando se usan capacitores en media y alta tensión. Además, se incluyen bloqueos o permisivos, las cuales se coordinan con la posición del interruptor principal y temporizadores. Las cuchillas de puesta a tierra sólo cerrarán cuando el interruptor esté abierto y el banco de capacitores descargado (cinco minutos después de la apertura del interruptor).

Apartarrayos

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

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

a) Especificación del elemento

- Tensión máxima de operación del sistema fase a fase.
- La puesta a tierra del sistema (efectivamente puesto a tierra, puesto a tierra a través de una impedancia o flotante).

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

Selección del apartarrayos

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

La tensión pico aplicada y el calentamiento por armónicas debe considerarse en la selección de las capacidades de los apartarrayos localizados en el filtro, en donde la distorsión de tensión puede ser sustancial. La tensión pico máxima esperada es igual a (ecuación 5.19):

$$V_p = \sqrt{2} \sum_h V(h) \quad (5.19)$$

Para evitar picos de la onda de tensión lo suficientemente altos, por arriba del pico del MCOV, que causen operación y excesivo calentamiento, la capacidad del apartarrayos deberá seleccionarse de tal forma que cumpla con la ecuación (5.20):

$$MCOV \geq \sum_h V(h) \quad (5.20)$$

El calentamiento del apartarrayos debido a armónicas es proporcional al orden de la armónica y al cuadrado de la tensión de cada armónica, incluyendo la fundamental. Siguiendo la ecuación (5.21) y para que este calentamiento no exceda el calentamiento del mismo apartarrayos aplicado solo a frecuencia nominal, el MCOV del apartarrayos deberá ser seleccionado de la siguiente manera:

$$MCOV \geq \sqrt{\sum_h (hV(h))^2} \quad (5.21)$$

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 conmutación y 20% por descargas atmosféricas entre el nivel de protección del apartarrayos y el nivel de aguante del equipo. Los métodos de cálculo de los márgenes de protección están contenidos en la norma IEEE Std.C62.22-1997.

5.2.3 Control de conmutación para el filtro de armónicas

Los controles de conmutación típicos para filtros de armónicas son similares a los controles descritos en la norma IEEE Std.1036-1992 para instalaciones de capacitores estándar. A diferencia de los capacitores, en aplicaciones para filtros de armónicas, las corrientes de inrush y outrush son tomadas en cuenta, aunque son típicamente bajas debido a la presencia del reactor del filtro.

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

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

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

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

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

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

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

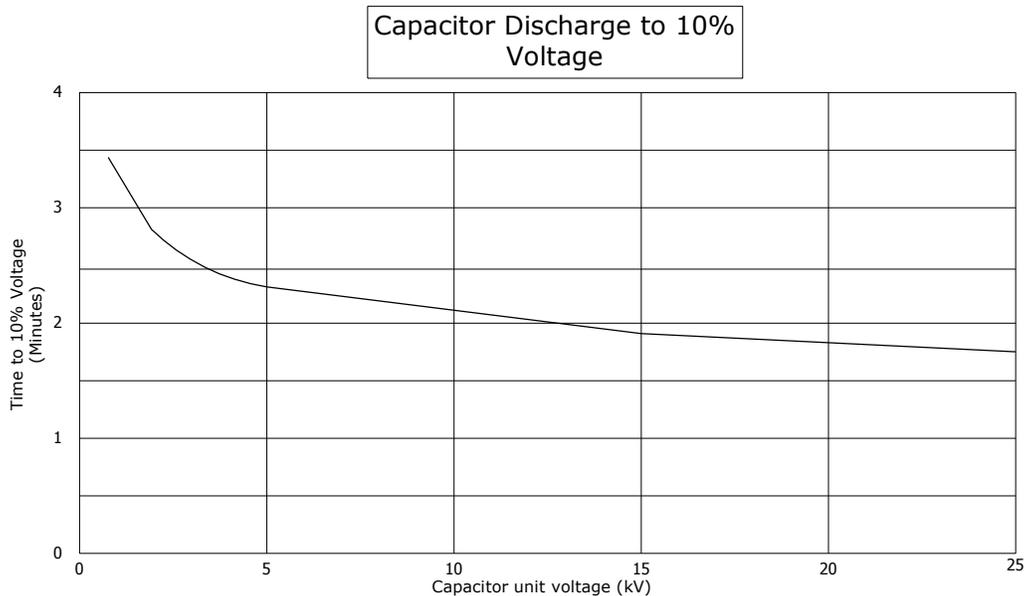


Fig.5.1 Tiempo de descarga a 10% de la tensión nominal para unidades capacitadoras de media tensión teniendo 50 volts en 5 minutos.

5.2.4 Protección

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

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

5.2.5 Diseño del filtro de armónicas

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

importante. La medición de armónicas en el sitio es el medio más preciso para conocer ésta información, si las cargas están instaladas de lo contrario, el fabricante del equipo no lineal deberá suministrar la generación de corrientes armónicas características, por último, se debe establecer la ubicación del equipo y restricciones de operación antes de iniciar el diseño.

I. Determinación de la capacidad del filtro en kVAR

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

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

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

II. Selección inicial de la sintonía del filtro

Basada en la generación de armónicas,⁶ se hace una estimación inicial de la sintonía del filtro. La sintonía normalmente se designa para reducir la distorsión de corriente y tensión armónica. Para cumplir con este objetivo, el filtro de armónicas típicamente será sintonizado a la frecuencia menor de las armónicas más significativas.⁶ Por ejemplo, si los niveles de corrientes armónicas más altos encontrados fueron para la 5^a y 7^a armónica, un solo filtro sintonizado cercano a la 5^a armónica puede ser suficiente para controlar la distorsión.

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

Por otra parte, la interacción del filtro con la impedancia del sistema resultará en una resonancia paralelo a una frecuencia apenas menor que la frecuencia de sintonía. Si un filtro de armónicas es diseñado exactamente a una frecuencia armónica, una variación en los valores de impedancia del equipo a los considerados en el diseño, podría resintonizar

el filtro y ubicar la frecuencia de resonancia paralelo muy cercana a la frecuencia armónica. Entonces, en lugar de baja impedancia, la combinación de la impedancia del sistema y el filtro se vuelve resonante a la frecuencia armónica sintonizada, los niveles de distorsión se harán inaceptables y la amplificación de tensiones podría generar daños severos.

El desplazamiento en la resonancia puede deberse frecuentemente a fallas en la unidad capacitadora del filtro, tolerancia de los componentes y variaciones en la configuración del sistema resulta ventajoso sintonizar el filtro en un rango de aproximadamente 1 a 10% debajo de la frecuencia deseada. Esta sintonía suministrará suficiente filtrado armónico, pero también permitirá la desintonización del filtro, sin embargo, para algunas instalaciones con filtros de armónicas múltiples sintonizados a diferentes frecuencias, sintonizar los filtros de armónicas individuales debajo de la frecuencia armónica no resulta tan favorable. Se debe considerar el funcionamiento del filtro a través de un espectro de frecuencias completo en la ubicación del filtro bajo condiciones normales y de contingencia.

La reactancia del capacitor del filtro es determinada por los kVAR del filtro. La reactancia inductiva se selecciona para crear una resonancia en serie con el capacitor del filtro a la frecuencia de sintonía y suministrar de esta forma una trayectoria de baja impedancia al neutro para las armónicas en el sistema. La reactancia inductiva y capacitiva, para un filtro sintonizado a la “n” armónica a la frecuencia del sistema son iguales a las siguientes ecuaciones (5.22, 5.23 y 5.24)⁶:

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (5.22)$$

$$X_C = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) X_{eff} \quad (5.23)$$

$$X_{eff} = \frac{X_{\varphi-\varphi S^2}}{Q_{eff}} \quad (5.24)$$

Donde:

X_L : reactancia inductiva del filtro a frecuencia fundamental. [Ω]

X_C : reactancia capacitiva del filtro a frecuencia fundamental. [Ω]

X_{eff} : reactancia efectiva del filtro a frecuencia fundamental. [Ω]

Q_{eff} : potencia reactiva efectiva del filtro. [MVA]

$V_{\varphi-\varphi S}$: Voltaje nominal de sistema de fase a fase. [V]

n : orden del armónico de sintonización del filtro.

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

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

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

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

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

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

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

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

IV. Determinación de la capacidad de los componentes

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

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

5.3. Estudio de flujos de potencia y análisis armónico:

Con el programa easypower se realizó el modelado del sistema eléctrico del Parque Eólico (PE) Dominica I para el estudio de flujos de potencia y análisis armónico.

5.3.1 Antecedentes Filtro para Parque Eólico Dominica, ubicado en el poblado de Charcas, San Luis Potosí.

El Parque eólico (PE) Dominica I y II genera energía eléctrica (100 MW en la primera fase y 200 MW para la segunda) y la envía a la Comisión Federal de Electricidad mediante una línea de transmisión de 115 KV de 39.5 Km que llega a la subestación Charcas Potencia donde se tienen dos bancos de transformación que elevan la tensión a 230 KV para enviar la energía eléctrica a la red de transmisión del interconectado nacional de CFE., Área Occidental, Región Bajío, Zona Matehuala.

Este estudio tiene como principal objetivo determinar que filtro se debe insertar para suministrar la potencia reactiva requerida por el PE y este pueda transmitir su potencia generada al sistema de transmisión de Comisión Federal de Electricidad (CFE) a factores de potencia de ± 0.95 y cumplir con los requerimientos de calidad de la energía establecida en el código de red de CFE. Se aclara que se realizan los estudios de flujos de potencia y análisis armónico considerando la información proporcionada por el cliente verificando su efectividad en todo momento y la filosofía de operación del PE. En los estudios de flujos de potencia y análisis armónico se considera que los aerogeneradores suministran o absorben potencia reactiva hasta ± 600 KVAR, la compensación de potencia reactiva generada por los circuitos colectores y la línea de transmisión, además de la proporcionada por los filtros de 11 MVAR y absorción de potencia reactiva de los reactores trifásicos (inductivos) se utilizan para cumplir con lo establecido en el Código de red.

5.3.1.1 Consideraciones importantes

5.3.1.1.1 Configuración del sistema

El Parque Eólico Dominica está integrado por:

- Un total de 50 aerogeneradores de la primera etapa y 54 aerogeneradores de la segunda etapa que operan en 0.69 kV.
- Son de 2040 kW y mediante transformadores de 2350 kVA se enlazan a los circuitos colectores.
- El parque se compone de 16 circuitos colectores en 34.5 kV considerando las dos etapas:
 - Posteriormente, se eleva la tensión a 115 kV mediante un transformador de 100 / 133 /148.96 MVA.
 - De la subestación de 115 KV se conecta mediante una línea de transmisión de 115 kV con la subestación Charcas, 115 kV que es la Interconexión con la red de transmisión de la CFE.

La contribución de cortocircuito en el punto de interconexión se muestra en la figura siguiente:

Subestación	Falla Trifásica	Falla Monofásica
Charcas Potencia 115 kV	1000 MVA	1129 MVA

Tabla 5.3-1 Contribución de Cortocircuito en el Punto de Interconexión en 115 kV.

Conforme a lo solicitado por el cliente:

- Se consideró que la red de transmisión es una fuente que solamente proporciona voltaje a frecuencia fundamental, es decir, es libre de armónicos.

5.3.1.1.2 Aerogeneradores

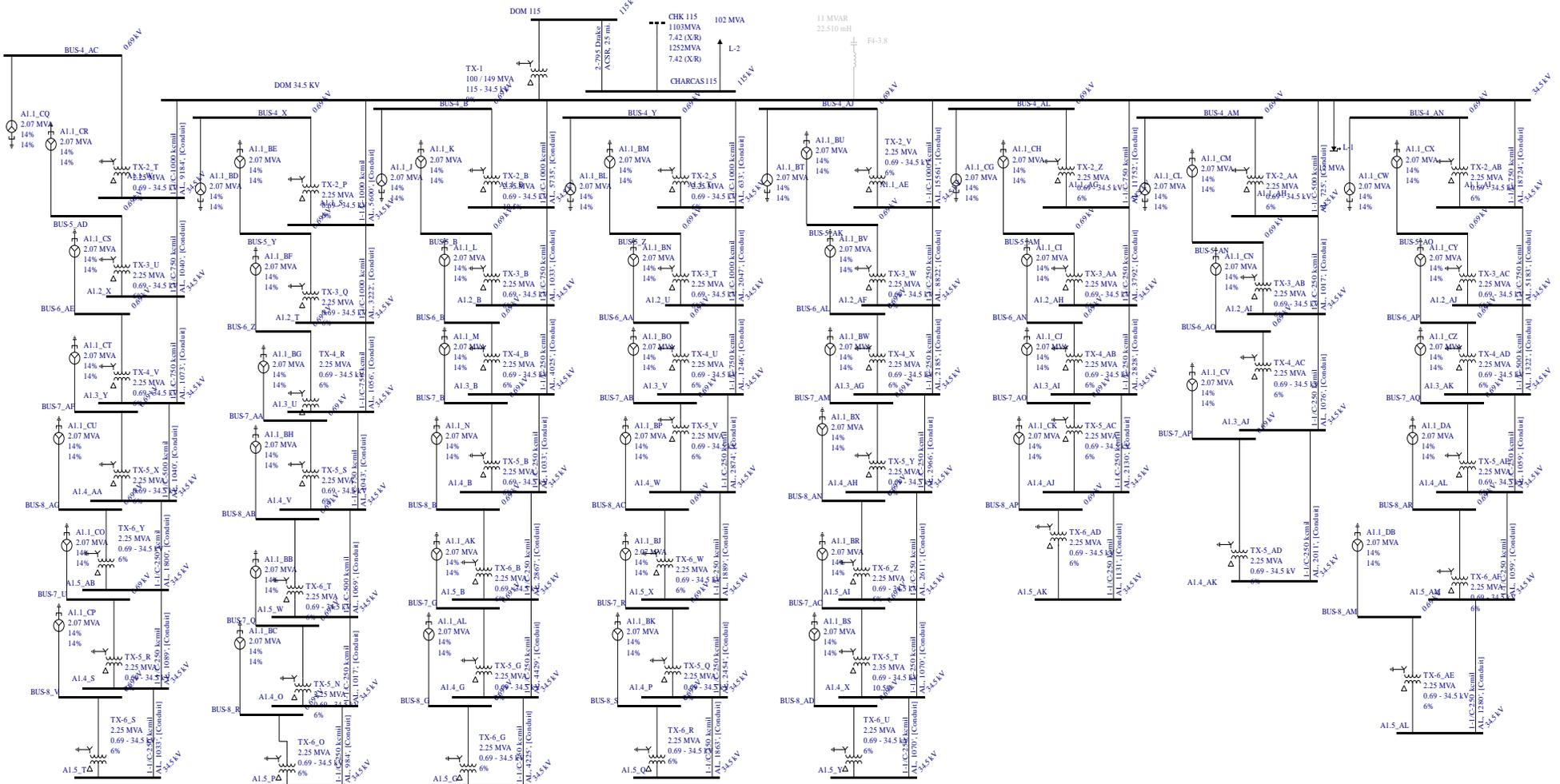
Datos de los aerogeneradores, los cuales se muestran en la tabla 3.2-1:

Voltaje (kV)	0.69	Potencia (MW)	2.04
Cos (φ)	0.95	Frecuencia (Hz)	60
Eficiencia	96.7	No. Polos	4
Corriente en vacío (A)	374	Corriente Nominal (A)	1520
Conexión del Estator	Delta /Estrella	Conexión del Rotor	Estrella

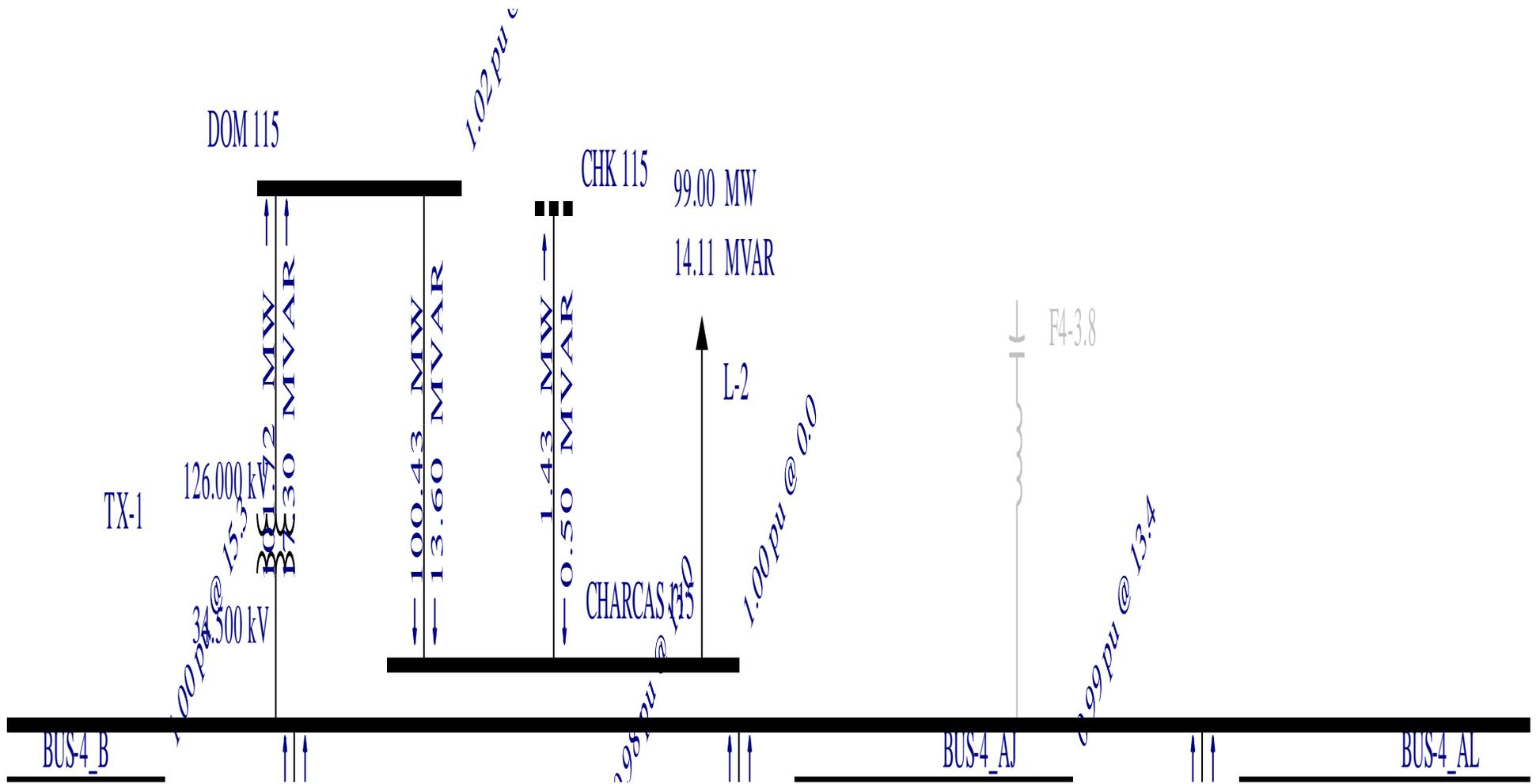
Tabla 5.3-2 Datos de los aerogeneradores modelados.

Para fines de las simulaciones, se especificó un valor de potencia activa y un factor de potencia. Asimismo, se consideraron en las simulaciones los espectros armónicos que los generadores aportarían para las diferentes condiciones de operación, conforme a la información proporcionada.

5.3.2.- Diagrama unifilar del sistema eléctrico del PE Dominica I.

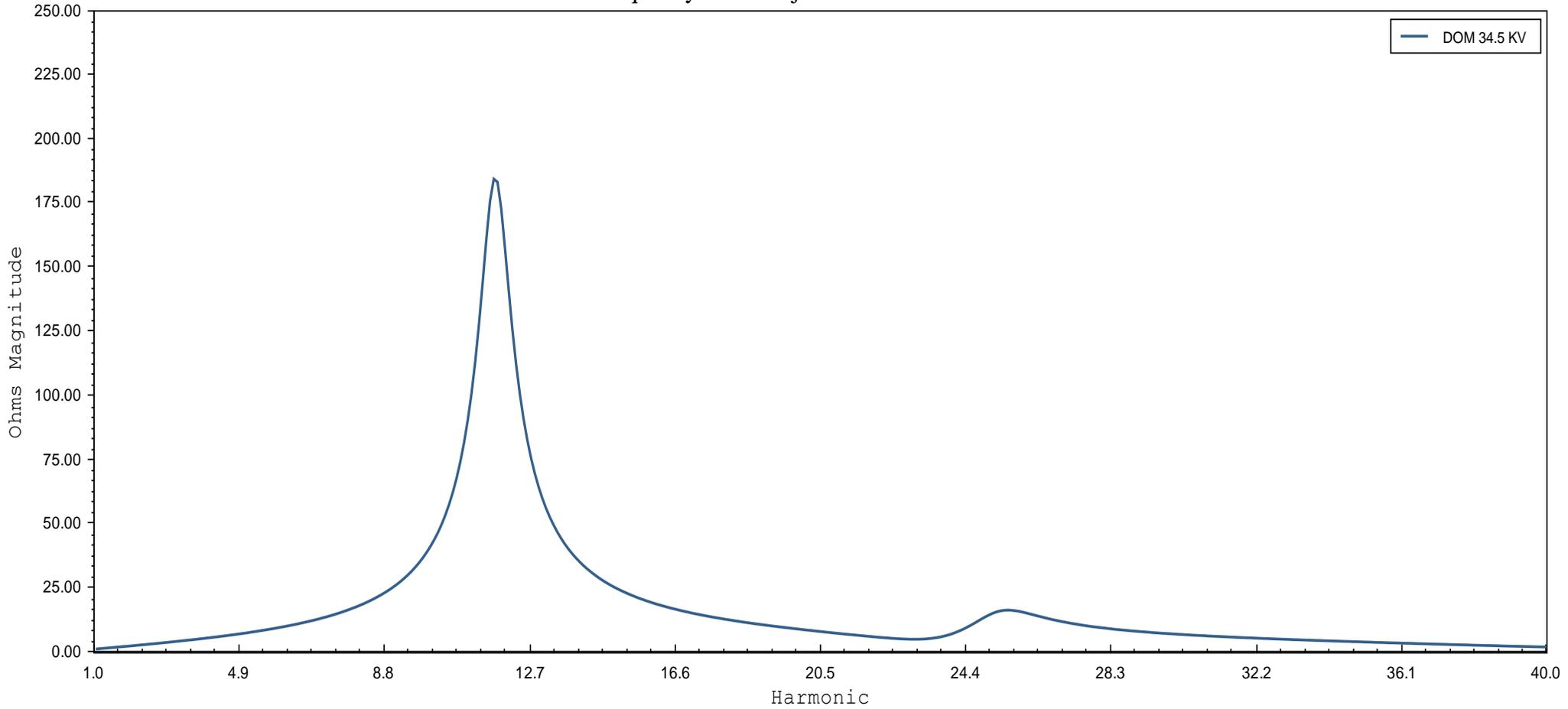


FLUJOS DE POTENCIA SIN FILTRO DE 4ª ARMÓNICA

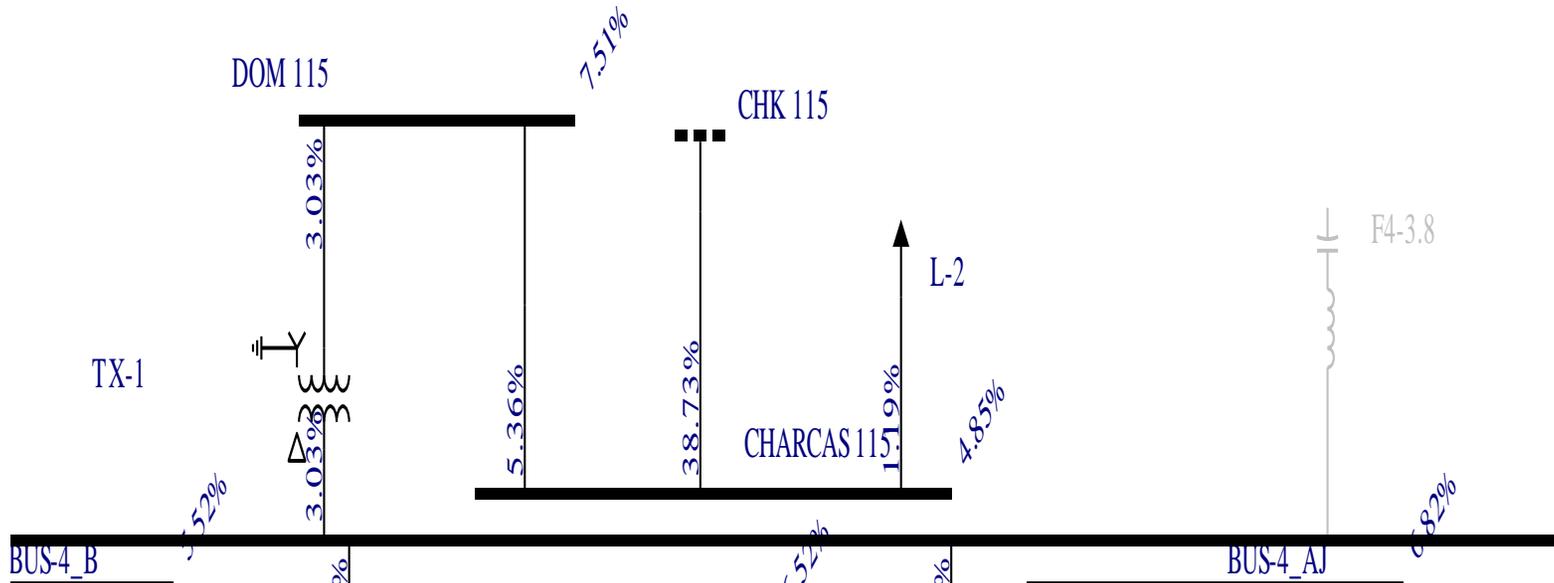


IMPEDANCIA CONTRA FRECUENCIA EN BUS DOM 34.5 KV, SIN FILTRO DE 4ª ARMÓNICA.

Frequency Scan - Injection on DOM 34.5 KV

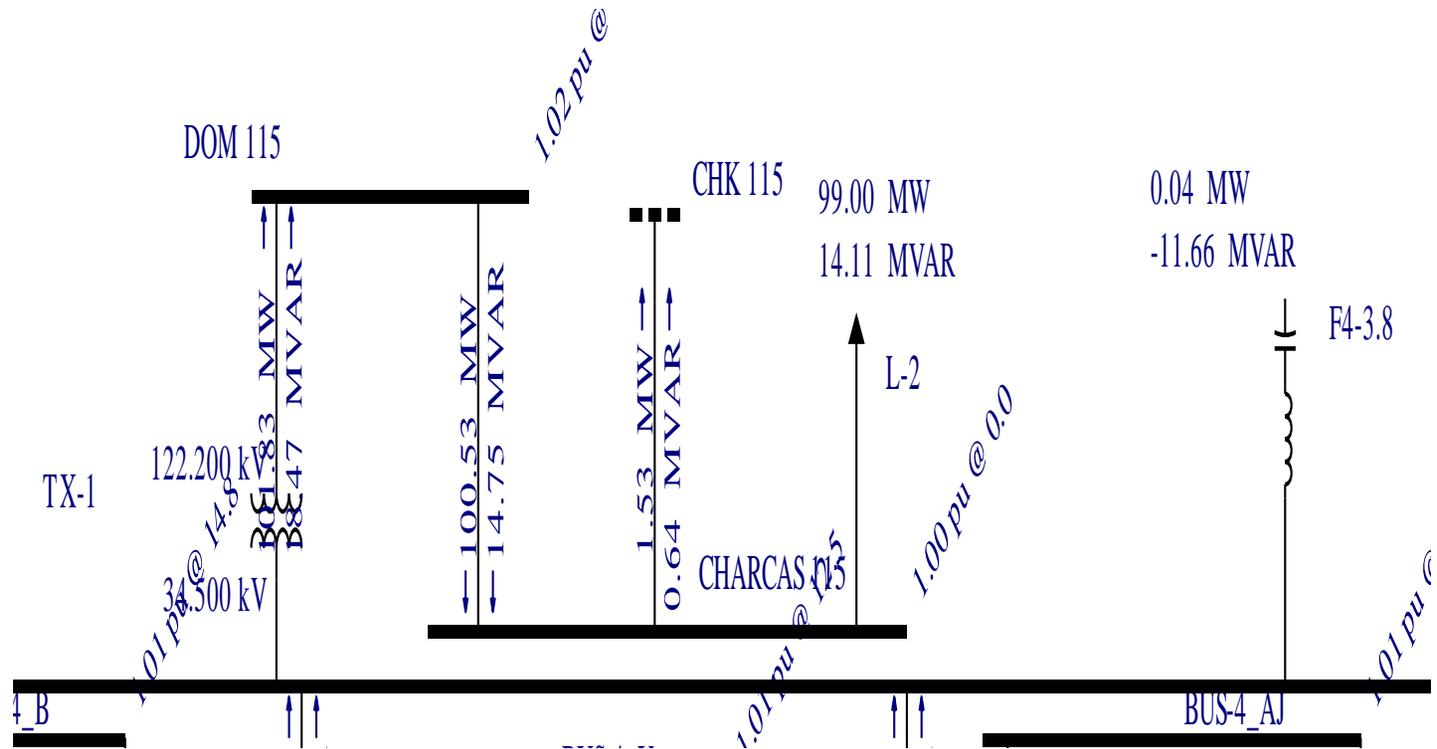


DISTORSIONES DE CORRIENTE Y VOLTAJE SIN FILTRO DE 4ª ARMÓNICA.



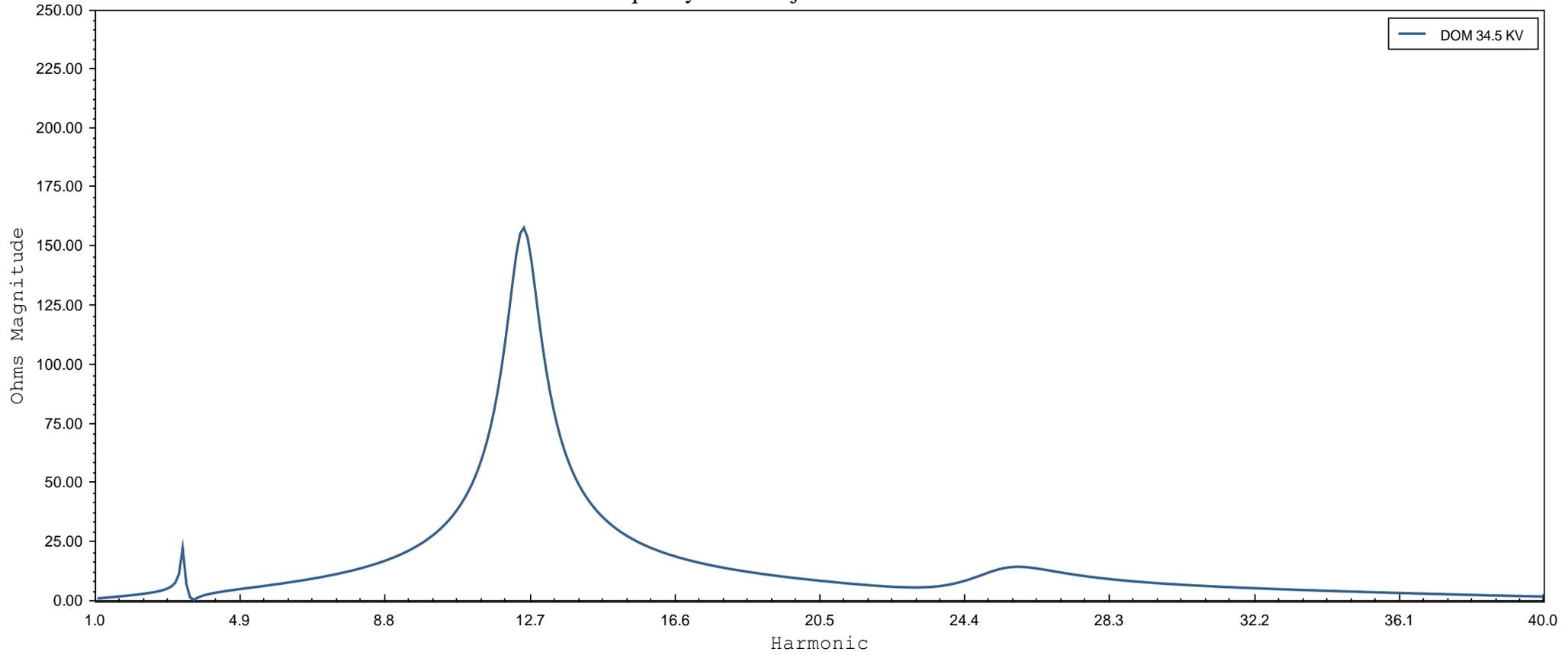
Como observamos se presentan altas distorsiones de corriente y voltaje (NO SE CUMPLE CON LOS REQUERIMIENTOS DE CFE).

FLUJOS DE POTENCIA CONSIDERANDO EL FILTRO DE 4ª ARMÓNICA DE 11 MVAR.

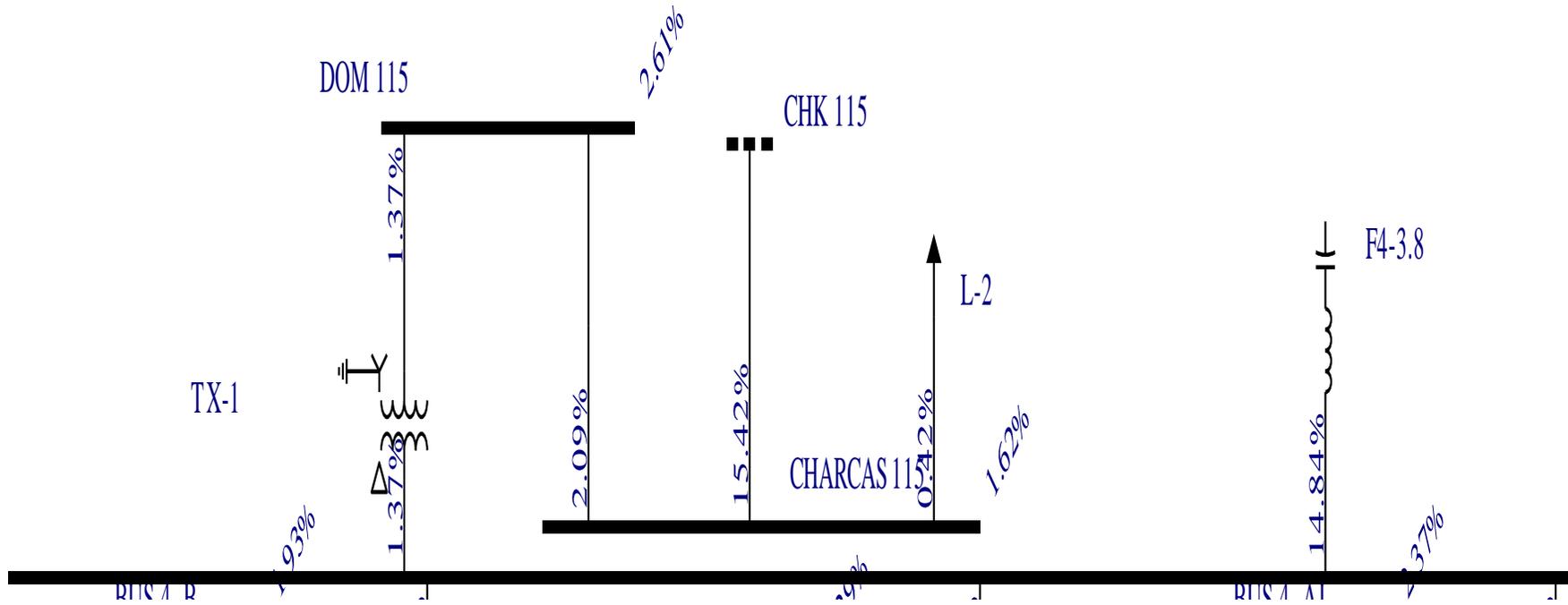


IMPEDANCIA CONTRA FRECUENCIA EN BUS DOM 34.5 KV, CON FILTRO DE 4ª ARMÓNICA.

Frequency Scan - Injection on DOM 34.5 KV



DISTORSIONES DE CORRIENTE Y VOLTAJE CON FILTRO DE 4ª ARMÓNICA.



Se presentan altas distorsiones de corriente y voltaje dentro de los límites permitidos por la norma CFE L0000 45, con lo que se concluye que es necesario el filtro de 4ª armónica para la correcta operación del PE.

CAPÍTULO 6

Dimensionamiento y especificación del filtro de corrientes armónicas.

6.1 Dimensionamiento del filtro de 4ª armónica de 11 [MVAR] en 34.5 [kV], sintonizado a 3.9 PU del parque eólico.

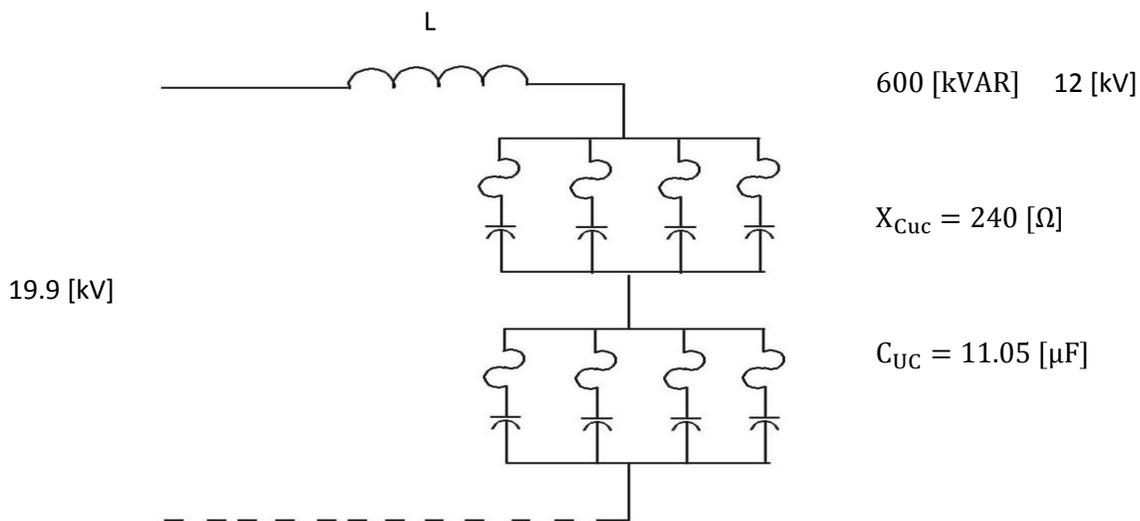
Con base al requerimiento de un filtro de 4ª armónica de 11 [MVAR] a una tensión de 34.5 KV, determinado por el estudio de flujos de potencia y análisis armónico que se realizó, se dimensionaron y especificaron los componentes de dicho filtro como se indica a continuación.

El filtro está compuesto por un banco de capacitores trifásico conectado en estrella flotante formado cada fase por dos grupos serie con 4 unidades capacitadoras de 600 KVAR-12 KV cada uno y un reactor de filtro de 20.62 mH (7.66 ohms).

6.2 Componentes del filtro 4ª armónica de 11 [MVAR] en 34.5 [kV].

Conforme a la norma establecemos que la tensión nominal del banco de capacitores, debe ser sobredimensionado en voltaje y potencia debido al reactor en serie, la tensión aumenta hasta en un 7 % con respecto al bus al que está conectado.

Las Unidades Capacitoras (U.C.) que forman el Banco de Capacitores trifásico del filtro de 11 MVAR-34.5 kV para un Parque Eólico, son de 600 KVAR-12 KV.



De los estudios de flujos de potencia se considera la clase de voltaje en el bus de 34.5 KV (38 KV) y la corriente máxima fundamental y RMS del filtro, de donde se obtiene el voltaje máximo de operación del capacitor y su potencia. Con la corriente máxima fundamental y RMS del filtro se determina la capacidad y diferencia de potencial del reactor.

Mientras que la capacidad total del banco es dividida entre el número de capacitores que forman el banco de capacitores:

$$KVAR_{U.C} = \frac{11 (MVAR)}{24} = 458.33 [kVAR]$$

$$KV_{U.C} = \frac{34.5 (KV)}{2\sqrt{3}} = 9.95 [kV]$$

Cada unidad capacitadora tendrá una potencia reactiva de 458.33 [kVAR] y una tensión nominal de 9.95 [kV]

Se seleccionaron unidades capacitadoras es de 600 kVAR a una tensión nominal de 12 [kV]

Unidad capacitadora

Calculamos la tensión nominal del banco, debido a que la tensión en él es mucho mayor que la tensión del bus al que se encuentra conectada.

$$V_{max} = (34.5)(1.1) = 37.95 [kV]$$

$$V_{max} = 37.95 \left(\frac{3.9^2}{3.9^2 - 1} \right) = 40.62 [kV]$$

Tensión

$$V_{UC} = \frac{V_n}{\sqrt{3}} = \frac{40.62}{\sqrt{3}} = 23.45 [kV]$$

Reactancia capacitiva nominal de la unidad capacitadora:

$$X_{Cuc} = \frac{kV^2}{MVAR} = 240[\Omega]$$

$$X_{Cuc} = 240 [\Omega]$$

Capacitancia nominal

$$C_{UC} = \frac{1}{\omega X_{UC}} = \frac{1}{2\pi(60)(240 [\Omega])}$$

$$C_{UC} = 11.052 [\mu F]$$

Corriente nominal de la unidad capacitadora a voltaje nominal:

$$I_N = \frac{V_{UC}}{X_{UC}} = \frac{9.95[KV]}{240 [\Omega]}$$

$$I_N = 41.45 [A]$$

Banco de capacitores

Reactancia capacitiva nominal por fase

$$X_C = \left(\frac{X_{UC}}{2}\right)$$

$$X_C = 120[\Omega]$$

Capacitancia nominal por fase

$$C_F = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2\pi(60)(120[\Omega])}$$

$$C_F = 22.10 [\mu F]$$

Capacitancia real por fase (tolerancia de fabricación +3% de capacitancia)

$$C_{real} = 1.03 * C_F$$

$$C_{real} = 22.76 [\mu F]$$

Reactancia Capacitiva real por fase

$$XC_R = \frac{1}{\omega C_R} = \frac{1}{2\pi(60)(22.76[\mu F])}$$

$$X_{CR} = 116.505 [\Omega]$$

6.2.1 Sintonización del filtro

Como se trata de un filtro de 4ª armónica, el filtro se sintonizará a 3.9 pu.

$$X_L = X_C$$

$$\omega N L = \frac{1}{\omega N C}$$

De la ecuación anterior obtenemos la inductancia, L, donde C es la capacitancia real por fase.

$$L = \frac{1}{\omega^2 N^2 C} = \frac{1}{[2\pi(60)]^2 (3.9^2) (22.76 [\mu F])}$$

$$L = 20.32 \text{ [mH]}$$

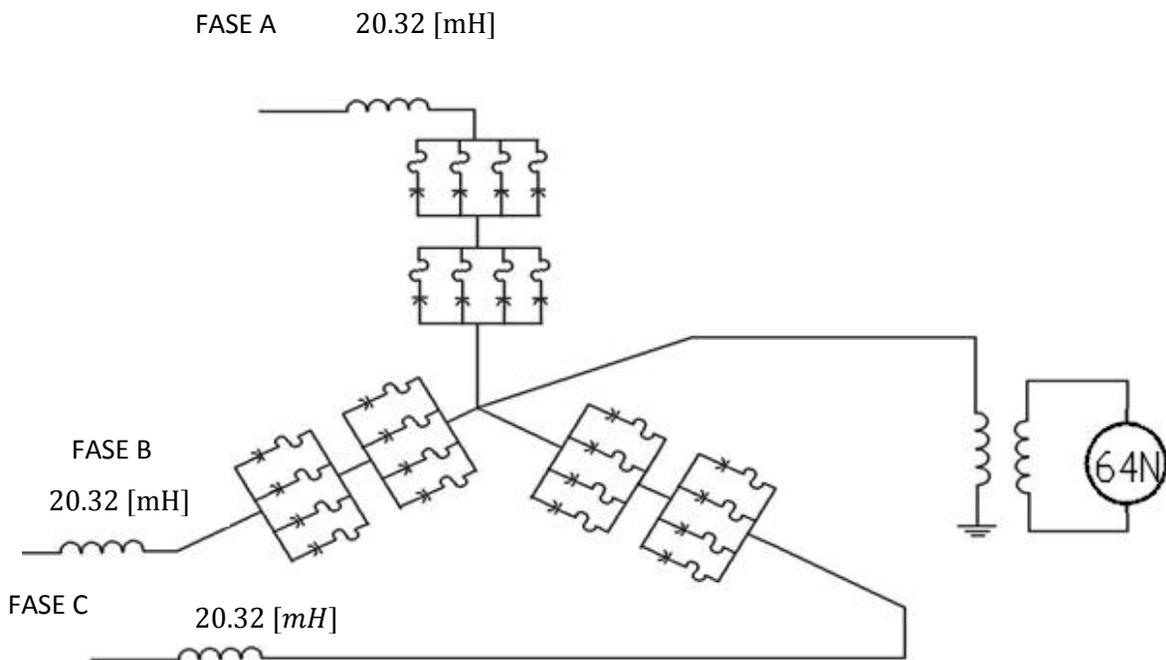
$$X_L = \omega L = 2\pi(60)(20.32 \text{ [mH]}) = 7.66 \text{ [\Omega]}$$

$$X_L = 7.66 \text{ [\Omega]}$$

Filtro de 4ª armónica de 11 MVAR-34.5 KV formado por:

Banco de capacitores trifásico, conectado en estrella flotante, formada cada fase por dos grupos serie con 4 unidades en paralelo de 600 kvar-12 kv C/U, con una capacidad de 11 [MVAR], en 34.5 [kV].

Reactor por fase de 7.66 ohms, $I_n = 183 \text{ A}$



6.2.2 Corriente de operación del filtro

$$I_F = \frac{V_N}{X_L - X_C} = \frac{\frac{34.5 \text{ [kV]}}{\sqrt{3}}}{7.66 \text{ [\Omega]} - 116.5 \text{ [\Omega]}} = 183.01 \text{ [A]}$$

$$I_F = 183.01 \text{ [A]}$$

6.2.3 Calidad del filtro

El rango de calidad del filtro se encuentra entre:

$$20 \leq Q \leq 50$$

Para nuestro caso, Q la definimos con valor de 30. La calidad del filtro se define como:

$$Q = \frac{X_{L_{3.9}}}{R}$$

Donde:

$$Q = \frac{X_{L_{3.9}}}{R}$$

$$X_{L_{3.9}} = 3.9 * X_{L_{11}}[\Omega] = 3.9 * 7.66[\Omega] = 29.87[\Omega]$$

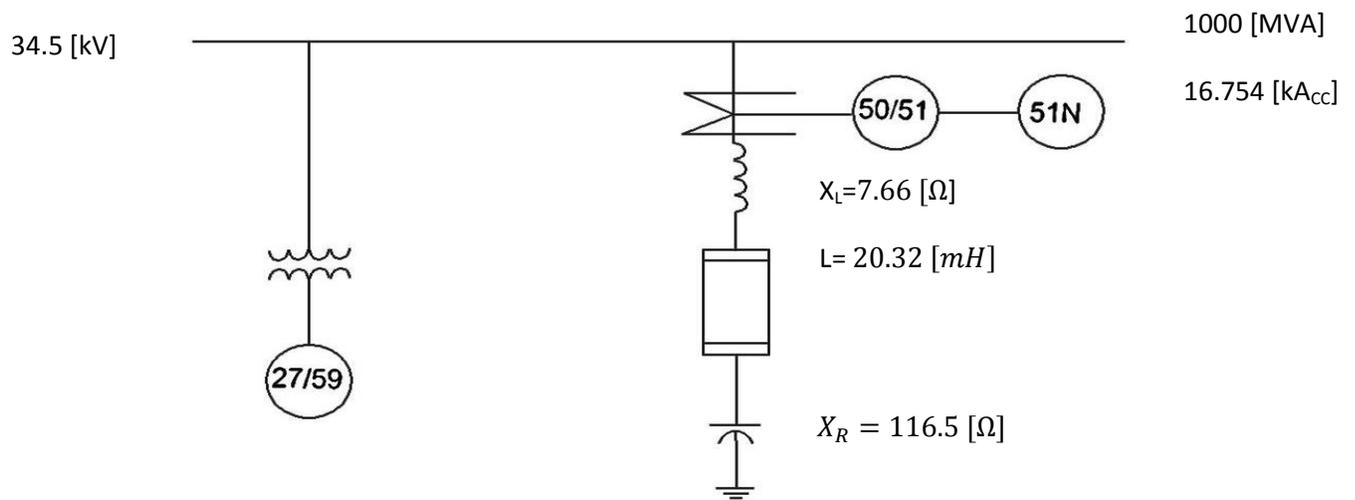
$$R = \frac{X_{L_{3.9}}}{Q} = \frac{29.87}{30} = 0.9958 \text{ [\Omega]}$$

6.2.4 Protección del filtro

Considerando una sobretensión del 10% en el banco de capacitores, en condiciones normales de operación, se obtiene lo siguiente:

$$V_S = (34.5)(1.1) = 37.95 \text{ [kV]}$$

$$V_S = V_C = V_{U.C} = \frac{37.95 \text{ [kV]}}{\sqrt{3}} * \left(\frac{3.9^2}{3.9^2 - 1} \right) = 23.45 \text{ [kV]}$$



Esquema de protección del filtro de 4ª armónica

Memoria de cálculo de las protecciones del filtro de corrientes armónicas de 11 MVAR-34.5 KV.

Ajuste del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso (51)

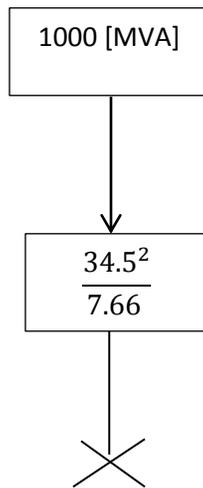
$$I_{pickup} = 1.1I_{op} = 1.1(183.01) = 201.311 [A]$$

$$I_{pickup} = 201.311[A]$$

$$RTC = \frac{300}{5} [A]$$

$$TAP = \frac{201.311}{60} = 3.35[A]$$

Dial = 0.1, Característica de tiempo inverso

Ajuste del relevador de sobrecorriente instantáneo (50)

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

La capacidad de corto circuito en el parque eólico es de 1000 MVAcc-34.5 KV.

$$MVA_{CC} = \frac{(155.38)(1000)}{1000 + 155.38} = 134.48[\text{MVA}]$$

$$MVA_{CC} = 134.48 [\text{MVA}]$$

$$I_{CC} = \frac{134.48 \times 10^3}{\sqrt{3}(34.5)} = 2250.49 [\text{A}]$$

$$I_{CC} = 2250.49 [\text{A}]$$

La corriente de INRUSH del capacitor normalmente en operación, no alcanza su valor máximo calculado; generalmente tiende al 90% de dicho valor, por lo que:

$$I_{\text{INRUSH}} = \sqrt{2} \sqrt{(2250.49)(201.311)}(0.9) = 856.7 \text{ [A]}$$

$$I_{\text{AJUSTE}} = \frac{(1.25)(856.7)}{60} = 17.84 \text{ [A]}$$

$$I_{\text{AJUSTE}} = 17.84 \text{ [A]}$$

Ajuste del relevador 51-N

Para este caso, se considera el 15% de la corriente de operación del filtro.

$$I_{\text{pickup}} = 0.15I_{\text{op}} = (0.15)(183.01) = 27.45 \text{ [A]}$$

$$I_{\text{pickup}} = 27.45 \text{ [A]}$$

$$\text{TAP} = \frac{27.45}{60} = 0.458 \text{ [A]}$$

$$\text{TAP} \approx 0.5 \text{ [A]}$$

Dial = 0.1, Característica de tiempo inverso

Ajuste del relevador 64-N

➤ Alarma

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

$$V_{\text{NG}} = \frac{V_{\text{LGF}}}{[3s(P - F)] + 2F}$$

Dónde:

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

Para una Unidad Capacitora fallada se obtiene:

$$V_{NG1} = \frac{\frac{34500}{\sqrt{3}} (1)}{[3(2)(4 - 1)] + 2(1)}$$

$$V_{NG1} = 995.92 \text{ [V]}$$

➤ Disparo

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

$$V_{NG2} = \frac{\frac{34500}{\sqrt{3}} (2)}{[3(2)(4 - 2)] + 2(2)}$$

$$V_{NG2} = 2489.82 \text{ [V]}$$

➤ Desbalance severo

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

$$V_{Nsevero} = \frac{\frac{34500}{\sqrt{3}}}{3(2) - 1}$$

$$V_{Nsevero} = 3983.72 \text{ [V]}$$

Con base a lo anterior se determina la relación de transformación:

$$RTP = 36000/120[V]$$

$$RTP = 300[V]$$

Y ajustando al 80% los valores de tensión obtenidos, en el neutro, se obtiene:

- Voltajes primarios:

$$V_{alarma} = 0.8(995.92) = 796.736[V]$$

$$V_{disparo} = 0.8(2489.82) = 1991.86[V]$$

$$V_{severo} = 0.8(3983.72) = 3186.98[V]$$

- Ajustes del relevador (voltajes secundarios):

$$V_{alarma} = \frac{796.736}{300} = 2.655[V]$$

$$V_{alarma} = \frac{1991.86}{300} = 6.64[V]$$

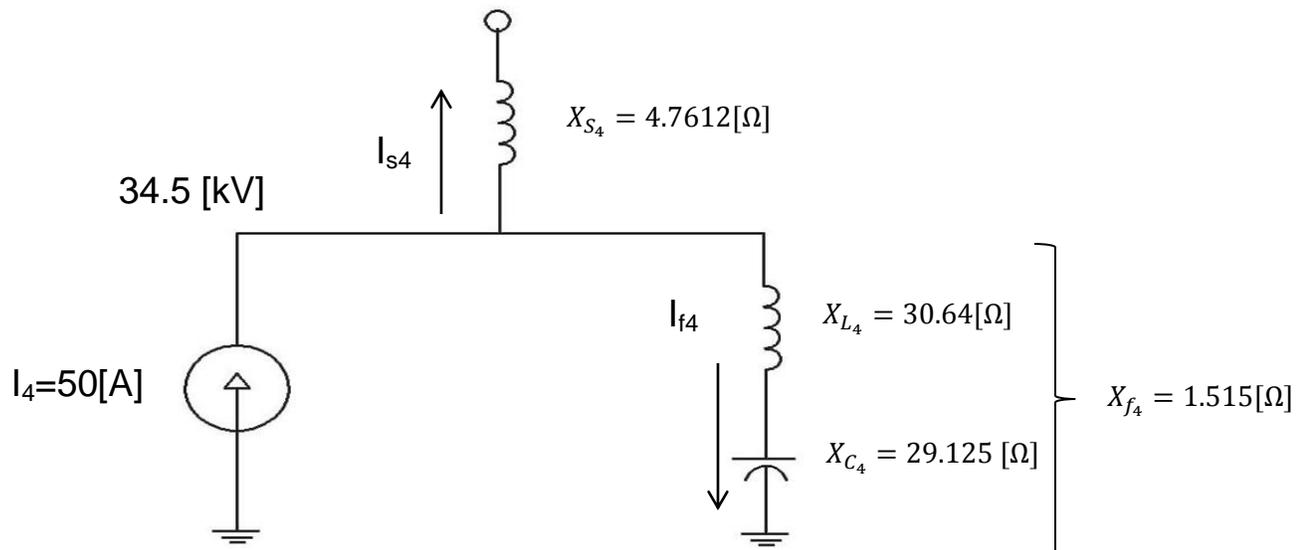
$$V_{\text{alarma}} = \frac{3186.98}{300} = 10.62[\text{V}]$$

AJUSTES DEL RELEVADOR 64-N	V _{PRIMARIO} [V]	V _{SECUNDARIO} [V]	TIMER [S]
Alarma	796.736	2.655	5
Disparo	1991.86	6.64	5
Desbalance severo	3186.98	10.62	0.3

Los valores de tiempo son considerados según la necesidad de protección del banco de capacitores.

6.2.5 Análisis armónico para la corriente de 4º orden

Con filtro



Reactancia del sistema a la frecuencia fundamental

$$X_{S_1} = \frac{34.5^2}{1000} = 1.1903 \text{ } [\Omega]$$

$$X_{S_1} = 1.1903 \text{ } [\Omega]$$

Reactancia del sistema debida a la 4ª armónica

$$X_{S_4} = 4X_{S_1} = 4(1.1903) = 4.7612[\Omega]$$

$$X_{S_4} = 4.7612[\Omega]$$

Reactancia del reactor debida a la 4ª armónica

$$X_{L_4} = 4X_{L_1} = 4(7.66) = 30.64[\Omega]$$

$$X_{L_4} = 30.64[\Omega]$$

Reactancia del banco de capacitores debida a la 4ª armónica

$$X_{C_4} = \frac{X_{C_1}}{4} = \frac{116.5}{4} = 29.125 \text{ } [\Omega]$$

$$X_{C_4} = 29.125 \text{ } [\Omega]$$

Reactancia del filtro debida a la 4ª armónica

$$X_{f_4} = X_{L_4} - X_{C_4} = 30.64 - 29.125 = 1.515 \text{ } [\Omega]$$

$$X_{f_4} = 1.515$$

Corriente en el filtro

$$I_{f_4} = \frac{X_{S_4} I_4}{X_{S_4} + X_{f_4}} = \frac{(4.7612)(50)}{4.7612 + 1.515} = 37.93 \text{ } [A]$$

$$I_{f_4} = 37.93 \text{ } [A]$$

Corriente de 4ª armónica hacia el sistema

$$I_{S_4} = I_4 - I_{f_4} = 50 - 37.93 = 12.07 \text{ } [A]$$

$$I_{S_4} = 12.07 \text{ } [A]$$

Voltaje de 4º orden en el bus de 34.5 KV.

$$V_4 = I_{S_4} X_{S_4} = (12.07)(4.7612) = 57.468 \text{ } [V]$$

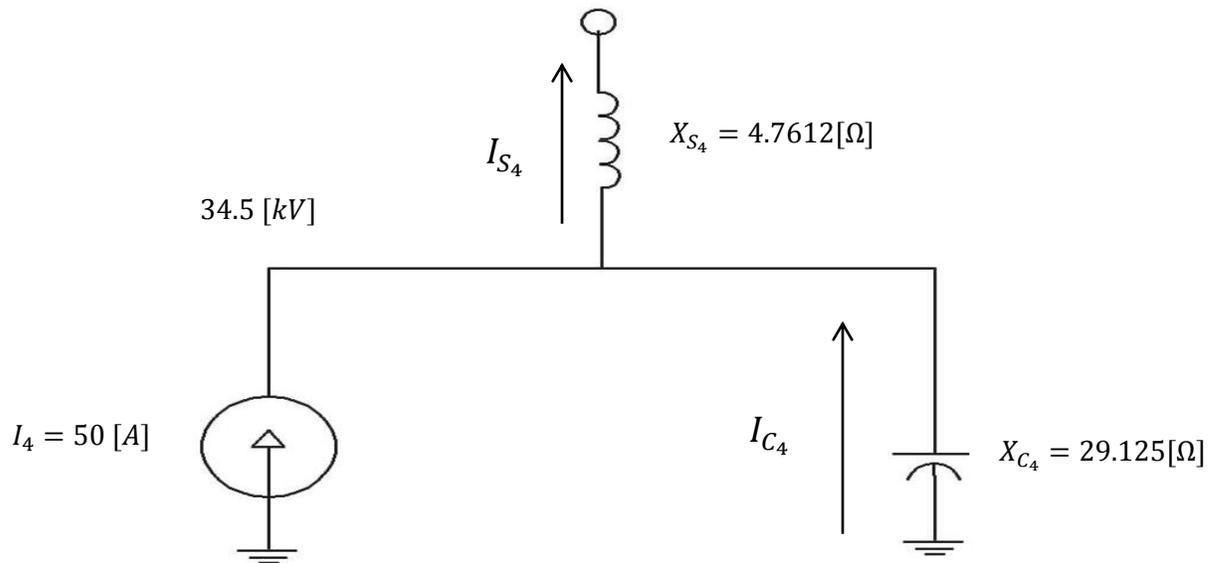
$$V_4 = 57.468 \text{ } [V]$$

Distorsión armónica individual de tensión de 4ª armónica en bus de 34.5 KV:

$$D_{HV_4} = \frac{V_4}{V_N} \times 100 = \frac{57.468}{\frac{34500}{\sqrt{3}}} \times 100 = 0.288$$

$$D_{HV_4} = 0.288\%$$

Sistema eléctrico considerando sólo banco de capacitores (Sin filtro)



Corriente en el capacitor

$$I_{C_4} = \frac{X_{S_4} I_4}{X_{S_4} + X_{C_4}} = \frac{(4.7612)(50)}{4.7612 - 29.125} = -9.771 \text{ [A]}$$

$$I_{C_4} = -9.771 \text{ [A]}$$

Corriente de 4ª hacia el sistema

$$I_{S_4} = I_4 - I_{C_4} = 50 - (-9.771) = 59.771[\text{A}]$$

$$I_{S_4} = 59.771[\text{A}]$$

Voltaje de 4ª armónica en el bus de 34.5 KV:

$$V_4 = I_{S_4} X_{S_4} = (59.771)(4.7612) = 284.58[\text{V}]$$

$$V_4 = 284.58[\text{V}]$$

Distorsión armónica individual de voltaje de 4ª armónica:

$$\text{DHV}_4 = \frac{V_4}{V_N} \times 100 = \frac{284.58}{\frac{34500}{\sqrt{3}}} \times 100 = 1.429 \%$$

$$\text{DHV}_4 = 1.429 \%$$

6.2.6 Resonancia serie-paralelo del filtro con el sistema de potencia:

Frecuencia de resonancia serie

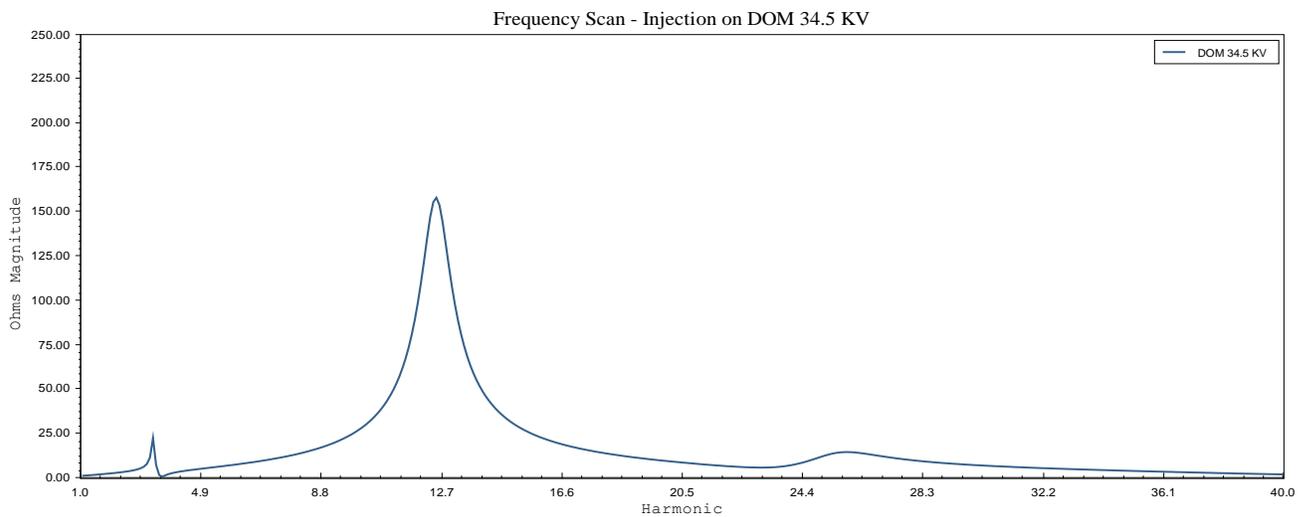
$$f_{rs} = \sqrt{\frac{X_{C_1}}{X_{L_1}}} = \sqrt{\frac{116.5}{7.66}} = 3.899[\text{PU}]$$

$$F_{RS} = 3.899[\text{PU}]$$

Frecuencia de resonancia paralelo

$$f_{rp} = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{S1} + X_{L1}}} = \sqrt{\frac{116.5}{1.1903 + 7.66}} = 3.628[\text{PU}]$$

$$f_{rp} = 3.628[\text{PU}]$$



Gráfica de magnitud de reactancia contra frecuencia

6.2.7 Aplicación de la especificación CFE L0000-45-2005

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

- ✓ Para un nivel de tensión de 34.5 [kV], se tiene que el límite de distorsión armónica individual de tensión, HDv=5%. (Ver anexo A)

El filtro de 4ª armónica diseñado tiene un HDv=0.288%, lo cual nos ubica dentro de los rangos permisibles de distorsión armónica.

A diferencia del filtro, el banco de capacitores, utilizado únicamente para compensación reactiva, presenta un HDv=1.5708 %. Dicho valor está dentro del rango permitido, lo cual se puede decir que no tendremos altas corrientes armónicas en nuestro parque eólico. Lo cual podemos decir que nuestro diseño y dimensionamiento del filtro es correcto.

6.2.8 Especificación de los componentes

Información Técnica	
Unidades Capacitoras (U.C.) que forman el banco de capacitores de 11 [MVAR] en 34.5 [kV], de un Parque Eólico	
Potencia nominal	600 [kVAR]
Tensión nominal	12 [kV]
Corriente nominal	50 [A]
Capacitancia nominal	11.05 [μ F]
Frecuencia nominal	60 [Hz]
Límite mínimo de capacitancia	-0%
Límite máxima de capacitancia	+10 %
Tipo de dieléctrico	All film
Cantidad de boquillas	2
Color de boquillas	Gris
BIL de boquillas	110 [kV]
Capacidad de fusibles	60 [A], Tipo "K"
Temperatura ambiente de operación mín/máx	-10 / +55 [°C] ó -10/D
Especificación	CFE V8000-53-2002

Información Técnica	
Bancos de capacitores de 11 [MVAR] en 34.5 [kV], formado por 2 grupos serie con 4 unidades capacitadoras de 600 [kVAR], en 12 [kV] cada uno.	
Tipo	Derivación
Tensión entre fases	34.5 [kV]
Potencia nominal	11 [MVAR]
BIL	200 [kV]
Frecuencia	60 [Hz]
Número de fases	3
Conexión	Estrella Flotante
Reactancia capacitiva nominal por fase	120 [Ω]
Capacitancia nominal por fase	12.034 [μ F]
Número de grupos serie por fases	2
Número de unidades capacitadoras por grupo serie	4
Número de unidades capacitadoras por fase	8
Protección individual de unidad capacitadora	Fusibles Externos
Operación temperatura ambiente	-10 [°C] a +55 [°C] ó -10/D

Información Técnica	
Reactores del filtro de 4ª armónica para banco de capacitores de 11 [MVAR] en 34.5 [kV].	
Número de reactores por fase	1
Reactancia inductiva	7.66 [Ω]
Inductancia nominal	20.32 [mH]
Corriente nominal 60 [Hz]	202 [A]
Corriente RMS: $\sqrt{I_{60\text{ Hz}}^2 \pm \sum I_{ARM}^2}$	220 [A]
Corriente térmica	3.5 [kA], 1 [s]
Pico mecánico	8.75 [kA]
Altitud	1860 [msnm]
Norma	IEC 289-1988
Uso exterior	NEMA 3
Enfriamiento	Aire natural
Elevación de temperatura	80 [°C]
Clase de aislamiento	B
Tensión de impulso	200 [kV]
Tensión de sistema	34.5 [kV]
Tensión de diseño	38 [kV]
Potencia reactiva nominal	371 [kVAR]
Caída de tensión	1685 [V]
Frecuencia de sintonía	234 [Hz]
Q a 234 [Hz]	30
Nota: Se requieren 3 reactores monofásicos.	

CONCLUSIONES

Esta tesis tuvo como objetivo principal demostrar que en la planeación de la operación de los parques eólicos (PE) es necesario realizar estudios de flujos de potencia y análisis armónico; este tipo de estudios tiene como principal objetivo determinar que filtros se deben insertar para filtrar los armónicos presentes en el PE y este pueda transmitir su potencia generada al sistema de transmisión de Comisión Federal de Electricidad (CFE) a factores de potencia de ± 0.95 a tensiones de 0.9, 1.0 y 1.05 PU, y cumplir con los requerimientos de calidad de la energía establecida en el código de red de CFE. Determinado lo anterior se dimensionó y especificó sólo uno de los filtros de corrientes armónicas de 11 MVAR-34.5 KV del parque eólico.

Es conveniente tener en cuenta que los parques eólicos operan a diferentes capacidades de generación de potencia eléctrica (según disponibilidad del aire) con diferentes espectros de generación de corrientes armónicas, siendo las mayores distorsiones en generación mínima hasta tener una mínima generación de corrientes armónicas a su capacidad plena. Es importante mencionar que con el espectro armónico de generación de corrientes armónicas de los aerogeneradores se toman en cuenta corrientes armónicas e interarmónicas enviadas por el fabricante de los aerogeneradores.

De los estudios se demuestra que sin el filtro de corrientes armónicas de 4^o orden las distorsiones de corrientes y voltaje están fuera de los límites permitidos por la Norma CFE L000045 y el Código de Red. La aplicación del filtro de 4^a armónica cumple con los límites permitidos por la norma, lo que hace percatarnos que el filtro implementado fue eficaz y que nuestros cálculos descritos en el capítulo 6to fue exitoso.

En cuanto a relación costo-beneficio de implementar un filtro para corrientes armónicas; los filtros pasivos son los más económicos y sencillos de utilizar en la industria para filtrar armónicos, y al tener una eficiencia energética en el sistema eléctrico estaremos utilizando la mayor cantidad de energía efectiva, ya que incrementamos nuestro factor de potencia; por lo que nuestra generación eléctrica sería bastante eficiente y nuestro ahorro energético y monetario sería muy significativo.

Sí, tal vez el costo del filtro podría ser caro al momento de adquirirlo e instalarlo, pero en un corto tiempo se recuperaría la inversión dada, ya que nuestra generación eléctrica sería bastante eficiente y no estaríamos desperdiciando energía eléctrica; por otra parte se incrementaría la vida útil de los equipos, tal sería el caso de los conductores, ya que con la presencia de armónicos los conductores ocasiona un calentamiento y por ende pérdidas en él.

En los sistemas industriales, comerciales y de empresas suministradoras se deben realizar los estudios de flujos de potencia, corto-circuito y análisis armónico para tener conocimiento si se necesita un filtro o filtros en los sistemas eléctricos para que sean más eficientes en su operación.

Finalmente se logró aprender, analizar, comprender e implementar exitosamente los filtros armónicos que son capaces de ayudar a las redes eléctricas que tengan presente alguna distorsión armónica en ellos; con lo que se estudia en este trabajo de investigación se tiene una solución para lograr reducir distorsiones armónicas presentes en la red.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Viqueira, J, *Redes Eléctricas*, Tomo I, UNAM, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México, 2004.
- [2] Raúll, J. *Diseño de Subestaciones Eléctricas*, 2da. ed., UNAM, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México, 2000.
- [3] Enríquez, G., *Elementos de Centrales Eléctricas II*, Preedición, Limusa, Ciudad de México, 1995.
- [4] Espinosa, R., *Sistemas de Distribución*, Limusa, Ciudad de México, 1990.
- [5] Enríquez, G., *El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica*, 2da. ed., Limusa, Ciudad de México, 1999.
- [6] Dugan, R., McGranagh M., Santoso S., Beaty H., *Electrical Power Systems Quality*, 2da. ed., Mc Graw Hill, (s/c), 1996.
- [7] Burke, J., *Power Distribution Engineering: Fundamentals and applications*, Marcel Dekker Inc., Nueva York, 1994.
- [8] Hibbard J.F. y Lowenstein M. "Meeting IEEE 519-1992 Harmonic limits. Technical papers, Trans-coil, Inc." [en línea]. 1995. Disponible en: <http://www.transcoil.com/meetieee.pdf>
- [9] Barcó, S., Guerrero, R., Martínez, I., *Calidad de la energía, factor de potencia y filtrado de armónicas*, Mc Graw Hill, México, (s/año).
- [10] IEEE Std. 519-1992, *Recommended practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System* (ANSI).
- [11] CFE L0000-45-2005, *Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica*.
- [12] Acha, E., Madrigal, M., *Power Systems Harmonics*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2001.
- [13] Alstom, *Protective Relay Application Guide*, 3er. ed., Alstom, Manchester, 1987. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/208386839/Protective-Relay-Application-Guide-Prag-Gec-Alstom>.
- [14] Arrillaga, J., Watson, N., *Power System Harmonics*, 2da. Ed., John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2003.
- [15] Bayliss, C., Hardy, B., *Transmission and Distribution Electrical Engineering*, 2da. ed., Newnes, Oxford, 1999.
- [16] Blackburn, L., *Protective Relaying: principles and applications*, Marcel Dekker Inc., Nueva York, 1987.
- [17] Brown, R., *Electric Power Distribution Reliability*, Marcel Dekker Inc., Nueva York, 2002.

- [18] Chapman, S., *Máquinas Eléctricas*, 4ta. ed., Ciudad de México, Mc Graw Hill, 2005.
- [19] Das, J., *Power System Analysis: Short circuit load flow and harmonics*, Marcel Dekker Inc., Nueva York, 2002.
- [20] Dewan, S., Straughen, A., *Power Semiconductor Circuits*, John Wiley & Sons, Chinchester, 1975.
- [21] Elmore, W., *Protective Relaying Theory and Applications*, Marcel Dekker Inc., Nueva York, 2004.
- [22] Hayt, Kemmerly y Durbin, *Análisis de Circuitos en Ingeniería*, 6ta. ed., Ciudad de México, Mc Graw Hill, 2003, pp. 835.
- [23] Johnson, D., Hilburn, J. y Johnson, J. *Análisis básicos de Circuitos Eléctricos*, 4ta. ed., Ciudad de México, Prentice Hall Hispanoamericana, S. A., 1991.
- [24] Lai, L., *Power System Restructuring and Deregulation*, John Wiley & Sons, Chinchester, 2001.
- [25] Mason, R., *The Art and Science of Protective Relays*, John Wiley & Sons, New York, 1956.
- [26] Natarajan, R., *Power System Capacitors*, Taylor & Francis Group, Boca Ratón, 2005.
- [27] Sankaran, C., *Power Quality*, CRC Press, Cabo Ratón, 2002.
- [28] Viqueira, J., *Redes Eléctricas*, Tomo II, UNAM, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México, 2004.
- [29] NRF-041-CFE-2005, *Esquemas normalizados de protecciones para líneas de transmisión*.
- [30] CFE V6700-62-200, *Tableros de protección, control y medición para subestaciones Eléctricas*
- [31] CFE V8000-53-2002, *Banco de Capacitores de 69 a 161 kV para Subestaciones*.
- [32] IEEE Std. 141-1993, *Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants* (ANSI).
- [33] G.W. Chang, S.Y. Chu & H.L. Wang. *A new method of passive filter planning for controlling voltage distortion in a power system*, IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 3, Estados Unidos, 2003.
- [34] Manual regulatorio de requerimientos técnicos para la interconexión de centrales eléctricas al Sistema Eléctrico Nacional, Código de Red Mexicano, 08/04/2016.