



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“MITIGACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE FILTRADO HÍBRIDO ACTIVO-PASIVO”

TESIS

Que para obtener el Grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Presenta:
ING. OMAR CRUZ HERNÁNDEZ

Director de Tesis:
DR. J. AURELIO MEDINA RIOS

Doctor en Ingeniería Eléctrica
Co-Director de Tesis:
DR. LUIS ARTHUR CLEARY BALDERAS

Doctor en Ingeniería Eléctrica



Morelia, Mich.

AGOSTO-2015

Índice

Índice	ii
Lista de Abreviaturas y Símbolos	iv
Lista de Figuras	vi
Lista de Tablas	viii
Agradecimientos	ix
Resumen	x
Abstract	xi
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 <i>Introducción</i>	1
1.2 <i>Estado del Arte</i>	3
1.3 <i>Justificación</i>	6
1.4 <i>Objetivos</i>	7
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	7
1.4.2 <i>Objetivos Particulares</i>	7
1.5 <i>Metología</i>	8
1.6 <i>Descripción de Capítulos</i>	9
Capítulo 2 Métodos de Filtrado para la Mitigación de Armónicos	10
2.1 <i>Introducción</i>	10
2.2 <i>Recomendaciones de la IEEE</i>	11
2.3 <i>Clasificación de los Filtros de Potencia</i>	12
2.3.1 <i>Filtros Pasivos de Potencia</i>	13
2.3.2 <i>Métodos de Filtrado Pasivo</i>	18
2.3.2.1 <i>Filtro pasivo conexión paralelo</i>	19
2.3.2.2 <i>Filtro pasivo conexión serie</i>	20
2.3.3 <i>Filtros Activos de Potencia</i>	21
2.3.4 <i>Métodos de filtrado activo</i>	22
2.3.4.1 <i>Filtro activo conexión paralelo</i>	24
2.3.4.2 <i>Filtro activo conexión serie</i>	26
2.3 <i>Conclusiones</i>	27

Capítulo 3 Métodos de Filtrado Activo-Pasivo	29
3.1 <i>Introducción</i>	29
3.2 <i>Filtro activo en paralelo con el filtro pasivo y en serie con la red</i>	31
3.3 <i>Filtro activo en serie con el filtro pasivo y estos en paralelo con la red</i>	32
3.4 <i>Filtro activo en paralelo con el filtro pasivo y en paralelo con la red</i>	33
3.5 <i>Descripción del Filtro Activo Utilizado</i>	34
3.6 <i>Técnica de Control Utilizada para el Filtro Activo</i>	37
3.6.1 <i>Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea.....</i>	38
3.6.2 <i>Desarrollo de la Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea</i>	38
3.7 <i>Técnica de Modulación Delta utilizada en el filtro activo</i>	45
3.8 <i>Conclusiones.....</i>	46
Capítulo 4 Análisis, Diseño y Simulación del Filtro Híbrido Propuesto	48
4.1 <i>Introducción</i>	48
4.2 <i>Análisis y diseño del filtro pasivo.....</i>	49
4.2.1 <i>Cálculo del filtro pasivo</i>	50
4.3 <i>Análisis y Diseño del Filtro Activo.....</i>	50
4.3.1 <i>Cálculo de las corrientes de referencia.....</i>	51
4.3.2 <i>Técnica de Modulación Delta o Control por Histéresis.....</i>	54
4.3.3 <i>Funcionamiento del Inversor Trifásico</i>	55
4.3.4 <i>Circuitos Snubber</i>	56
4.4 <i>Simulación de la Red Eléctrica Propuesta</i>	57
4.5 <i>Simulación del Filtro Híbrido Propuesto.....</i>	60
4.6 <i>Conclusiones.....</i>	65
Capítulo 5 Conclusiones Generales y Trabajos Futuros	66
5.1 <i>Conclusiones Generales</i>	66
5.2 <i>Trabajos Futuros</i>	68
Referencias	69

Lista de Abreviaturas y Símbolos

<i>Corriente Alterna</i>	<i>CA</i>
<i>Corriente Directa</i>	<i>CD</i>
<i>Hertz</i>	<i>Hz</i>
<i>Modulación de Ancho de Pulsos</i>	<i>PWM</i>
<i>Henrys</i>	<i>H</i>
<i>Faradios</i>	<i>F</i>
<i>Frecuencia de Resonancia</i>	f_0
<i>Inductancia</i>	<i>L</i>
<i>Capacitancia</i>	<i>C</i>
<i>Factor de Calidad</i>	Q_f
<i>Reactancia</i>	<i>X</i>
<i>Reactancia Inductiva</i>	X_L
<i>Reactancia Capacitiva</i>	X_C
<i>Resistencia</i>	<i>R</i>
<i>Impedancia</i>	<i>Z</i>
<i>Frecuencia</i>	<i>f</i>
<i>Frecuencia Angular</i>	ω
<i>Variable de Amónicos</i>	<i>h</i>
<i>Reactancia Inductiva a la Frecuencia Armónica</i>	X_{Lh}
<i>Reactancia Capacitiva a la Frecuencia Armónica</i>	X_{Ch}
<i>Frecuencia Angular Inductiva</i>	ω_L
<i>Frecuencia Angular Capacitiva</i>	ω_C
<i>Impedancia del Filtro</i>	Z_f
<i>Frecuencia Angular de Resonancia</i>	ω_0
<i>Valor eficaz</i>	<i>rms</i>
<i>Punto de Acoplamiento Común</i>	<i>PCC</i>
<i>Procesador Digital de Señales</i>	<i>DSP</i>

<i>Prefijo kilo</i>	<i>k</i>
<i>Volt</i>	<i>V</i>
<i>Amperes</i>	<i>A</i>
<i>Volt-Amperes</i>	<i>VA</i>
<i>Volts-Amperes reactivos</i>	<i>VA_r</i>
<i>Watts</i>	<i>W</i>
<i>Transformada Rápida de Fourier</i>	<i>FFT</i>
<i>Transformada Discreta de Fourier</i>	<i>DFT</i>
<i>Filtro Pasivo de Potencia</i>	<i>FPP</i>
<i>Unified Power Flow Controller</i>	<i>UPFC</i>
<i>Unified Power Quality Conditioner</i>	<i>UPQC</i>
<i>Sistemas de Transporte de Energía Eléctrica (Flexible AC Transmission System)</i>	<i>FACTS</i>
<i>Potencia Reactiva Instantánea</i>	<i>IPR</i>
<i>Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea</i>	<i>TPRI</i>
<i>Teoría Generalizada de la Potencia Instantánea</i>	<i>TGPI</i>
<i>Variadores de velocidad (adjustable speed drives)</i>	<i>ASDs</i>
<i>Rectificador Controlado de Silicio (Siliconcontrolled rectifier)</i>	<i>SCRs</i>
<i>Interferencia de frecuencia de radio (radio frequency interference)</i>	<i>RFI</i>
<i>Interferencia electro-magnética (electro-magnetic interference)</i>	<i>EMI</i>
<i>Acondicionadores Activos de Potencia (Active Power Line Conditioners)</i>	<i>APLCs</i>
<i>Transistor Bipolar de Puerta Aislada (Insulated Gate Bipolar Transistor)</i>	<i>IGBTs</i>
<i>Tiristor GTO (Gate Turn-off thyristor)</i>	<i>GTOs</i>

Lista de Figuras

<i>Figura 2.1 Estructura de los filtros pasivos, a) 1er orden, b) 2do orden, c) 3er orden y d) Tipo C.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.2 Respuesta en frecuencia de un filtro pasivo de potencia.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.3 Configuraciones del Filtrado Pasivos a) paralelo, b) serie, c) serie-paralelo, d) paralelo-serie.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.4 Filtros pasivos de multiples frecuencias de resonancia en paralelo.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.5 Filtros pasivos de multiples frecuencias de resonancia en serie.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.6 Convertidor a) De corriente, b)De voltaje, c) De voltaje con control de corriente.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.7 Estructura del convertidor trifasico a) Con convertidor de neutro, b) Con control de equilibrio de voltaje.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.8 Filtro Activo paralelo con fuente de corriente.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.9 Filtro Activo paralelo con fuente de voltaje.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.10 Filtro Activo serie.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.1 Filtro Híbrido monofásico con reparto de acción filtrante a) paralelo, b)serie. ..</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.2 Filtro Activo conectado en paralelo con el filtro pasivo y en serie con la red..</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.3 Filtro Activo en serie con el filtro pasivo y estos conectados en paralelo con la red.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.4 Filtro Activo en paralelo con el filtro Pasivo y estos en paralelo con la red....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.5 Representación espacial de la potencia imaginaria instantánea.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.6 Esquema para cálculo de corrientes de referencia.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.7 Técnica de modulación delta.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.1 Diagrama del Filtro Pasivo de Sintonía Única.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.2 Diagrama de Filtro activo de corriente utilizado.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.3 Diagrama en Simulink® de Matlab® para cálculo de corrientes de referencia.....</i>	<i>53</i>

<i>Figura 4.4 Diagrama de Técnica de modulación delta.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.5 Inversor Trifásico utilizado</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.6 Sistema Eléctrico sin filtros conectados</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.7 Simulación del Sistema Eléctrico sin Filtros. Voltaje en el PCC</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.8 Simulaciones del Sistema Eléctrico sin Filtros. Corriente de línea.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.9 Contenido armónico de i_s</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.10 Contenido armónico de v_{PCC}.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.11 Diagrama de Filtro Híbrido utilizado.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.12 Señales de Voltaje del sistema a) Punto D después del PCC, b) Punto A antes del PCC.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.13 Señal de voltaje de la fase a a) Punto D después del PCC, b) Punto A antes del PCC.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4.14 Señales de corrientes de línea del sistema a) Punto D, corriente de la carga, b) Punto B, corriente hacia la red.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4.15 Señal de corriente de línea de la fase a. a) Punto D, corriente de la carga, b) Punto A, corriente hacia la red.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.16 Corrientes de filtrado inyectadas a la red, a) Fase a, b) Fase b y c) Fase c... 63</i>	
<i>Figura 4.17 a) Corriente de línea de la fase a, b) corriente inyectada hacia la fase a</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4.18 Corriente a) absorbida por el filtro pasivo, b) generada por el filtro activo, c) inyectada por el filtro híbrido.....</i>	<i>64</i>

Lista de Tablas

<i>Tabla 2.1 Límites para armónicos en el PCC en voltajes de 120 V a 69 kV.</i>	12
<i>Tabla 2.2 Métodos de filtrado activo.</i>	24
<i>Tabla 3.1 Métdos de filtrado hibrido.</i>	30
<i>Tabla 4.1 Parámetros del Filtro pasivo.</i>	50
<i>Tabla 4.2 Parámetros del sistema Eléctrico simulado.</i>	58
<i>Tabla 4.3 Mediciones de Voltaje (THD).</i>	61
<i>Tabla 4.4 Mediciones de corriente (THD).</i>	62

Agradecimientos

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos.

A mi amada esposa quién ha sido el impulso durante el tiempo que me ha acompañado, que con su apoyo constante y su amor incondicional ha sido mi amiga, mi compañera y mi fuente de inspiración.

A mi madre por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi padre por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre en mí y mis hermanos, por su fortaleza mostrada para salir adelante a pesar de las adversidades y por su amor.

A mis hermanos, quienes en su momento me brindaron su apoyo y me alentaron a seguir adelante con esta etapa de mi vida.

Al Dr. J. Aurelio Medina Ríos por permitirme participar en el proyecto de investigación desarrollado y su paciencia mostrada durante la realización de esta tesis.

Al Dr. Luis Arthur Cleary Balderas por el apoyo, orientación y experiencia que me brindó día con día para culminar esta investigación.

A mis amigos quienes me han apoyaron durante todo este proceso de formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigos.

A la mesa sinodal quienes leyeron y aprobaron esta tesis.

Resumen

Los filtros de potencia cumplen la función de evitar la circulación de las corrientes de armónicos por el sistema, así mismo también reducen la distorsión del voltaje. Estos filtros pueden ser pasivos (compuestos por arreglos de impedancias), activos (basados en electrónica de potencia) o híbridos que son el resultado de una combinación entre filtros pasivos y activos. En esta tesis se formulan y analizan los filtros anteriores, con particular referencia hacia filtrado híbrido activo-pasivo, donde por medio de simulaciones se muestra la efectividad y confiabilidad en la implementación de un sistema de filtrado híbrido para la eliminación de armónicos. Una segunda mejora que se proporciona en esta tesis consiste en concentrar en la parte pasiva del filtro la eliminación de armónicos de orden específico, en este caso la componente de quinto y séptimo armónico con lo cual se tienen menores exigencias para la parte activa del filtro de potencia lo cual resulta en un decremento en su tamaño y costo.

Palabras clave: *Armónico, Distorsión armónica, Elementos de conmutación, Elementos pasivo, Elementos semiconductores, Filtro híbrido, mitigación de armónicos.*

Abstract

Harmonic filters meet the function of avoiding the propagation of harmonic currents in the power network, as well as reducing voltage distortion levels. Filters may be passive (made build from impedance arrangements), active (based on power electronics) or hybrid, resulting from the combination of passive and active filters. In this thesis, the above filters are formulated and analyzed, particular reference is given to active-passive hybrid filtering. Reliability and effectiveness on the implementation of a hybrid filter for harmonic mitigation is shown through simulation analysis.

A particular arrangement with a specific control scheme is presented which allows the need of a transformer between the active and passive parts of the filter; commonly found in filtering arrangements.

A second improvement proposed in this thesis is to concentrate in the passive part of the filter the mitigation of harmonics of fifth and seventh order, which in turn lead to less power requirements for the operation active part of the filter, and as a consequence, on a decrease in size and cost of the hybrid filter.

Capítulo 1 Introducción

1.1 Introducción

Los sistemas eléctricos son diseñados para operar a una frecuencia fundamental. En cualquier caso, ciertos tipos de cargas producen corrientes y/o voltajes con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Estas frecuencias mayores son una forma de contaminación eléctrica conocida como armónicos. Es por eso que un texto publicado por Steinmetz en 1916 [Dugan, 1999], presta mucha atención al estudio de los armónicos en los sistemas trifásicos de potencia. La principal preocupación eran las corrientes del tercer armónico causado por la saturación del hierro en transformadores y máquinas eléctricas, motivo por el cual Steinmetz fue la primera persona en proponer las conexiones delta para bloquear las corrientes de tercera armónica [Dugan, 1999].

Después del importante descubrimiento de Steinmetz, se obtuvieron importantes mejoras en el diseño de transformadores y máquinas eléctricas con lo cual los problemas de armónicos fueron resueltos hasta 1930 y 1940. Después con la llegada de la electrificación y telefonía rural, los circuitos de potencia y telefonía fueron ubicados en los derechos de vía comunes. Transformadores y rectificadores en sistemas de potencia produjeron corrientes de armónicos que se acoplaban inductivamente en circuitos de telefonía de cable abierto y producían interferencias telefónicas audibles. Estos problemas fueron resueltos gradualmente por medio del filtrado y la minimización de las corrientes magnetizantes de los núcleos de los transformadores. Los problemas aislados de interferencia telefónica aún ocurren, pero estos problemas son poco frecuentes debido a que los circuitos de cable abierto telefónicos han sido remplazados por pares trenzados, fibra óptica y cables enterrados, entre otros.

Hoy en día, las fuentes generadoras de armónicos más comunes son las cargas electrónicas de potencia, como son: variadores de velocidad (*ASDs adjustable speed drives*) y elementos de conmutación. Las cargas electrónicas usan diodos, SCRs (silicon controlled rectifier),

transistores de potencia, y otros interruptores para cortar la forma de onda o convertir la corriente alterna (CA) a corriente directa (CD). En el caso de los variadores de velocidad, la CD es después convertida en CA de frecuencia variable para controlar la velocidad de los motores. Ejemplos del uso de variadores de velocidad son los enfriadores y bombas.

El uso de los modernos dispositivos electrónicos de potencia ha crecido enormemente en diferentes aplicaciones que requieren desde aparatos domésticos hasta el equipo industrial. Mientras que estas cargas no lineales proveen de beneficios al usuario en cuanto a eficacia y procesos de control, éstas también distorsionan las formas de onda de los voltajes y/o las corrientes de la red eléctrica. Cuando la distorsión armónica de voltaje y/o corriente excede ciertos límites, la operación de diverso tipo de componentes del sistema se ve afectada resultando en un desempeño inadecuado en la operación de éstos, causando daños o reducción en su vida útil, entre otros efectos adversos [Arrillaga *et al.*, 2001]. Los niveles de distorsión armónica en alimentadores de distribución se elevan a medida de que las cargas electrónicas continúan proliferando.

A pesar de que el fenómeno de distorsión armónica de voltaje y/o corriente en sistemas eléctricos se ha reportado desde hace ya varios años [Gyugyi y Strycula, 1976], [Mohan, 1977], es hasta hace relativamente poco tiempo que en varias naciones se reconoce, analiza y estudia de manera formal. Como resultado de las investigaciones realizadas, a la fecha se cuenta con técnicas digitales adecuadas y eficientes para la predicción y detección (monitoreo) de la forma de onda de voltaje y/o corriente en sistemas de potencia. Por otra parte, varios países tienen ya establecidos estándares para la limitación de niveles armónicos en la red eléctrica.

A diferencia de los fenómenos transitorios como descargas atmosféricas que duran apenas unos microsegundos, o caída de voltaje que duran milisegundos o unos cuantos ciclos, los armónicos son de estado estable, fenómenos periódicos que producen distorsión de la forma de onda. Estas formas de onda periódicas de magnitud se describen en términos del armónico, cuyas magnitudes y ángulos de fase son calculados mediante el uso de Series de Fourier.

El análisis de Fourier permite descomponer una forma de onda periódica distorsionada en series que contienen sus componentes de CD, frecuencia fundamental (60 Hertz), segundo armónico (120 Hz), tercer armónico (180 Hz), y así sucesivamente en múltiplos de la frecuencia fundamental. Los armónicos individuales se suman para reproducir la forma de onda original. Los armónicos no deben de ser confundidos con interferencia de frecuencias de radio (*RFI, radio frequency interference*) o interferencia electro-magnética (EMI, *electro-magnetic interference*).

Ordinariamente la componente de CD no se presenta en sistemas de potencia debido a que la mayoría de las cargas no producen CD y porque los transformadores bloquean el flujo de la misma. Los armónicos de orden par son generalmente de magnitud despreciable en comparación a los armónicos de orden impar debido a que la mayoría de las cargas electrónicas tienen la propiedad de *simetría de media onda* las cuales no tienen armónicos pares.

La corriente consumida por las cargas electrónicas puede ser libre de distorsión (perfectamente senoidal), pero el costo de hacer esto es significativo y es materia de debate entre los fabricantes de equipo eléctrico y las compañías suministradoras del servicio en sus actividades relacionadas con estándares [Dugan, 1999].

1.2 Estado del Arte

En los últimos años se han estado haciendo considerables esfuerzos para reducir la distorsión armónica en los sistemas eléctricos. Se han establecido normas y recomendaciones para su control y se encuentran disponibles instrumentos para su medición. El área de análisis de armónicos también ha experimentado avances significativos; se han desarrollado modelos más apropiados de los equipos, métodos de simulación y procedimientos de análisis para realizar estudios de armónicos. Es decir la tecnología ha respondido a las necesidades que han ido presentando a lo largo de la historia y dando soluciones a los problemas que se han ido planteando.

En lo referente a la Ingeniería Eléctrica; la generalización en el uso de la CA (en la que el descubrimiento del transformador fue el elemento clave), ha propiciado la producción a gran escala de energía eléctrica ligada a su transporte y distribución. A partir de que la potencia eléctrica puede ser generada en lugares alejados de los centros de mayor consumo y transportada a los puntos donde la requieren los usuarios, se hace necesaria la mejora en la eficiencia del sistema. Esto es, que los distintos perfiles de consumo afecten lo menos posible la calidad del suministro de la energía eléctrica para facilitar su transporte y consumo.

En este sentido, las empresas de transporte y distribución de energía eléctrica tuvieron que afrontar históricamente el problema que suponía el aumento de la demanda reactiva que circula por las líneas. La potencia reactiva limita la capacidad de transporte de energía útil y ocasiona un aumento de las pérdidas, disminuyendo, por tanto, la eficiencia de la red. La medida adoptada por las compañías eléctricas, con el fin de optimizar la utilización de sus infraestructuras de red, fue penalizar en la facturación a los clientes cuyas instalaciones tuvieran un factor de potencia bajo. Por este motivo, en el diseño de redes eléctricas industriales, siempre se ha contemplado la necesidad de incorporar elementos para la compensación de la potencia reactiva.

Las compañías suministradoras de energía eléctrica también han analizado la problemática de la propagación de armónicos, llegando a afirmar que son el mayor problema de la calidad de la energía eléctrica [Grady, 2000].

Los armónicos generados a partir de las cargas no lineales: como los convertidores y variadores de velocidad, así como otras cargas desbalanceadas en redes de distribución han deteriorado la calidad de energía en sistemas de transmisión y de distribución [Akagi *et al.*, 1986].

Los principios de compensación para los Acondicionadores Activos de Potencia (Active Power Line Conditioners, APLCs) fueron propuestos en 1970. Desde entonces se han

realizado una gran cantidad de trabajos en torno a filtros activos y sus aplicaciones. En un principio no fueron de mucha importancia hasta que los avances de la electrónica de potencia lo permitieron, siendo en los 90 cuando se desarrollaron dispositivos de conmutación rápida, como el transistor bipolar de puerta aislada (*Insulated Gate Bipolar Transistor*, IGBTs) ó *Gate Turn-Off Thyristor* (GTOs), entre otros. Con ellos es posible construir inversores de potencia, que mediante técnicas de modulación por ancho de pulsos (PWM), permiten reconstruir de forma adecuada la forma de onda del voltaje o corriente deseada, según el esquema del acondicionador y la estrategia de control elegida.

En [Erlicki y Eigeles, 1968] se presentaron algunas ideas que permitían entender la “compensación de distorsión de potencia”, que se desconocía hasta esa fecha. Se determinó que “una resistencia no lineal se comporta como un generador de energía reactiva, aunque no tenga elementos almacenadores de energía”, y presentó la primera aproximación a los filtros activos de potencia. Los esquemas básicos para la conexión de un filtro son la conexión en serie y la conexión en paralelo.

En la conexión paralelo, el filtro funciona como una fuente controlada de corriente y suministra la corriente de compensación que cancela los componentes armónicos de la carga. En la configuración serie lo hace como una fuente controlada de voltaje que compensa los armónicos de voltaje introducidos por la carga. Los filtros en paralelo son más usuales y compensan cargas que generan armónicos de voltaje, como rectificadores controlados con una carga fuertemente inductiva o rectificadores PWM con una gran inductancia en el lado de CD, utilizados en algunas aplicaciones de control de máquinas eléctricas. Los filtros serie, se conectan en serie con la carga a través de un transformador de acoplamiento y son aplicados en la compensación de armónicos generados por las cargas no lineales: como lo son rectificadores de diodos con un gran condensador en el lado de CD.

En las últimas décadas se han desarrollado distintas topologías para el circuito inversor del filtro, con diferentes dispositivos electrónicos de estado sólido, así como distintas estrategias de control [Akagi *et al.*, 1986], [Chen, 1996]. Por otra parte, en cuanto a su

estructura, se pueden dividir en tres categorías: de dos hilos (monofásicos) [Gyugyi y Strycula, 1976], [Torrey *et al.*, 1995], de tres hilos (trifásicos sin neutro accesible), [Hayafume *et al.*, 1984], [Saetieo *et al.*, 1995] y de cuatro hilos (trifásicos con neutro accesible). Estas configuraciones corresponden a las distintas configuraciones que presentan las cargas no lineales en los sistemas de potencia.

1.3 Justificación

Los sistemas de potencia son diseñados para trabajar a frecuencias nominales, sin embargo, ciertos tipos de elementos y cargas conectados al sistema producen armónicas de voltaje y/o corriente. Con el incremento de cargas no lineales y por ende de armónicas inyectadas al sistema eléctrico, la distorsión de la forma de onda se convierte en un problema importante a considerar y resolver. De entre las posibles soluciones a este problema: como la conexión delta del transformador y el uso del el filtro pasivo, recientemente el filtro activo ha cobrado mucho interés y a la fecha se han desarrollado varios métodos para determinar las corrientes de filtrado de referencia.

La mayoría de estos métodos incluyen transformaciones o cambios entre marcos de referencia, pero más importante aún, es que no todos obtienen un buen desempeño en el cálculo de las corrientes de referencia cuando ciertas condiciones están presentes en el voltaje, por lo que es necesario analizar la técnica correcta que permita el cálculo eficiente de las corrientes de referencia bajo cualquier condición que se pueda presentar en el voltaje.

También existen métodos que evitan la transformación entre marcos de referencia para la determinación de las corrientes de referencia, como la Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) o la Transformada discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés), sin embargo estos métodos presentan la desventaja de que requiere de mayor recurso computacional y son lentos de respuesta, puesto que la señal de control se origina después haber hecho el análisis de la señal.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

El objetivo principal de esta tesis es analizar y desarrollar un filtro híbrido activo-pasivo para la mitigación de distorsión armónica en redes eléctricas no lineales. Proponer un procedimiento general para el cálculo de parámetros de un filtro pasivo, el diseño más adecuado del filtro activo, así como proponer el arreglo necesario para la obtención del filtro híbrido que permita eliminar las corrientes de distorsión armónicas que son inyectadas a la red por medio de elementos conmutados.

1.4.2 Objetivos particulares

- Desarrollar una metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicos en sistemas eléctricos con cargas no lineales.
- Describir a los armónicos en los sistemas eléctricos, los elementos y equipos que los generan, así como los efectos que producen.
- Aplicar el método de drenado o absorción de armónicos por medio del Filtro Pasivo de Potencia (FPP).
- Aplicar el método de inyección de Corrientes por medio de un Filtro Activo de Potencia (FAP) para la eliminación de armónicos de la red.

1.5 Metodología

La investigación reportada en esta tesis está basada en la realización de las siguientes actividades:

- Revisión del estado del arte asociado con la representación y análisis sobre diferentes tipos de Filtros de Armónicos.
- Revisión del estado del arte, referente a los métodos de filtrado de las corrientes de armónicos en sistemas eléctricos de potencia.
- Hacer un estudio en el sistema de filtrado tradicional mediante dispositivos pasivos (resistencia, inductores, capacitores) aplicado a sistemas trifásicos para la mitigación de corrientes armónicas, mencionar sus ventajas y desventajas para el filtrado en sistemas de potencia.
- Hacer una revisión de los principales métodos de filtrado activo e investigar las ventajas con respecto al método pasivo. Revisar las topologías en filtros activos de potencia.
- Abordar el diseño y desarrollo de un filtro híbrido activo-pasivo que englobe las ventajas de cada método de filtrado de las corrientes de armónicos.
- Analizar la aplicación de un filtro híbrido en paralelo para aplicaciones en sistemas eléctricos de potencia con cargas no lineales
- Realizar la implementación del filtro híbrido activo-pasivo de forma Digital haciendo uso de Simulink® de Matlab®.

1.6 Descripción de Capítulos

Capítulo II.- En este capítulo se describen los métodos de filtrado pasivo y activo respectivamente, se mencionan los elementos que conforman a cada uno de ellos, sus ventajas y desventajas individuales, así como las ventajas y desventajas que nos brinda un filtro pasivo respecto a un filtro activo.

Capítulo III.- Como extensión del Capítulo II, se exponen las configuraciones híbridas, de donde se obtiene la configuración propuesta en esta tesis. Se analiza el proceso de diseño de un esquema de filtro híbrido controlado por corriente, sin necesitar de transformadores reductores para tal fin.

Se muestra también el desarrollo del método de compensación usado, así como se presenta la Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea (TPRI) y se muestra el proceso desarrollado para la obtención de las corrientes de referencia para el caso del FAP.

Capítulo IV.- En este capítulo se obtiene de manera analítica cada una de las partes que componen al filtro híbrido. Para el caso del filtro pasivo se realiza el cálculo de cada una de las partes que lo componen, en tanto que para el caso del filtro activo se describen a detalle cada uno de las cuatro etapas necesarias para la generación de las corrientes a inyectar a la red para compensar armónicos.

Se muestran los resultados obtenidos de la simulación del sistema híbrido activo-pasivo propuesto, donde se valida el funcionamiento, desempeño y funcionalidad del filtro.

Capítulo V.- Se realizan las conclusiones generales a que se ha llegado con los resultados de la investigación de esta tesis y se proponen investigaciones futuras a realizar a partir de lo reportado.

Capítulo 2 Métodos de Filtrado para la Mitigación de Armónicos

2.1 Introducción

La creciente complejidad de los sistemas eléctricos ha requerido, por necesidad, de la incorporación y presencia cada vez mayor de cargas no lineales de distinto tipo, tales como convertidores de potencia, dispositivos diversos de electrónica de potencia, hornos eléctricos a nivel industrial, electrónicos (televisores, computadoras, etc.) a nivel de consumidor, entre otras, ha contribuido, en mayor o menor grado a degradar la forma de onda originalmente senoidal suministrada por las compañías generadoras y suministradoras de energía eléctrica. Se encuentran documentados distintos fenómenos adversos de calidad de la energía, entre los cuales se identifican los armónicos, interarmónicos, perturbaciones temporales de voltaje, entre otros [Arrillaga y Watson, 2003]. Esta tesis se avoca en particular a la consideración de la presencia y mitigación de armónicos en redes eléctricas. En la literatura abierta se describen fenómenos adversos producidos por la distorsión de la forma de onda debidos a la presencia de armónicos, tales como calentamiento en devanados de máquinas eléctricas, pérdidas adicionales de transmisión, torques pulsantes en máquinas rotatorias, entre otros [Arrillaga y Watson, 2003].

Varios países han establecido límites de magnitudes individuales de armónicos y de distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés, que permitan operar al sistema de manera segura. De manera general, se cuenta con la norma del IEEE [IEEE 519-1992], que se ha tomado como referencia por varios países en ausencia de una norma propia; su incumplimiento es penalizado. Se entiende, que cuando estos límites son rebasados, es indispensable aplicar la estrategia o técnica necesaria para reducir o mitigar los valores individuales de magnitud de armónico y/o THD a valores seguros para la operación de la red eléctrica. Esta tesis se centra en el campo de mitigación de armónicos, al cual se contribuye con la propuesta de un filtro híbrido activo-pasivo, descrito en el Capítulo 3. Es

conveniente hacer una breve reseña de los métodos para la eliminación de armónicos previamente desarrollados.

Los métodos más sencillos están basados en filtros pasivos LC en paralelo con la fuente y sintonizados al armónico o armónicos a mitigar [Arrillaga y Watson, 2003], [Wang *et al.*, 2001]. Si bien, su ventaja principal es su simplicidad, los filtros pasivos presentan varias desventajas importantes, tales como sus dimensiones, que pueden ser considerables, compensación fija, deterioro de sus características con el paso del tiempo y por ende pérdida de sintonía, así como de posible resonancia con el sistema de transmisión.

Una alternativa interesante a los problemas y desventajas asociados con la operación de filtros pasivos, consiste en la instalación de filtro activos de potencia (FAP, por sus siglas en inglés); de mayor capacidad de filtrado y de estructura considerablemente más compacta. Un FAP realiza la función dual de mitigación de armónicos y corrección de factor de potencia. En esencia, su estructura está constituida por un inversor o convertidor controlado y un bloque de control para obtener las señales deseadas de referencia. En la actualidad la conexión paralelo del FAP con la red [Peng, 1998] ha encontrado una amplia aceptación y utilización, debido a su versatilidad para implementar distintos tipos de control tales como control delta y modulación por ancho de pulso, entre otros.

El FAP es visto por la red como una impedancia variable, del valor necesario que permita la cancelación adecuada de armónicos. No está basado en una estructura rígida y se puede aplicar en formas de onda complejas, de difícil representación analítica.

2.2 Recomendaciones de la IEEE

La automatización de procesos industriales ha impulsado la incorporación de cargas no lineales, que inyectan armónicos de corriente a la red, distorsionando su forma de onda [Kuzou *et al.*, 2008]. Al interactuar con la impedancia del sistema, ésta distorsiona el voltaje y provoca problemas en los equipos asociados al sistema. Para establecer

responsabilidades entre Consumidor y Distribuidor, se ha creado la norma [IEEE 519-1992], la cual limita los armónicos permitidos, tal como se muestra en la Tabla 2.1

Tabla 2.1.- Límites para armónicos en el PCC en voltajes de 120 V a 69 kV.

Máxima corriente del armónico en porcentaje de la frecuencia fundamental						
Orden del armónico (impares)						
I_{SC}/I_L	< 11	11 <= h <= 17	17 <= h <= 23	23 <= h <= 35	35 <= h	TDD
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 - 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50 - 100	10	4.5	4	1.5	0.74	12
100 -1000	12	5.5	5	2	1	15
1000 <	15	6	6	2.5	1.4	20

TDD = “Total Demand Distortion”, distorsión total de la demanda. Se refiere a la distorsión total de la corriente, y es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las corrientes armónicas, en porcentaje de la máxima corriente de carga.

I_{SC} es la corriente de cortocircuito en el PCC.

I_L es la corriente de carga a la frecuencia fundamental en el PCC.

La [IEEE 519-1992] trata principalmente de armónicos introducidos por cargas no lineales, con la finalidad de que los problemas de calidad puedan ser prevenidos. Su cumplimiento está siendo solicitado cada día más debido al crecimiento de las cargas no lineales y elementos de conmutación conectados a la red.

2.3 Clasificación de los Filtros de Potencia

Existen diferentes formas de clasificar los filtros de potencia. La clasificación de estos, toma en cuenta la existencia de elementos pasivos y activos [Chen *et al.*, 1996]; es decir:

- Filtros Pasivos de Potencia.
- Filtros Activos de Potencia.

2.3.1 Filtros Pasivos de Potencia

Los filtros pasivos de potencia son filtros en los que sólo se incluyen elementos pasivos (bobinas, condensadores y resistencias). El filtro pasivo más popular consiste en un circuito LC serie sintonizado a una determinada frecuencia de resonancia. Este filtro se conecta en paralelo con la red y absorbe armónicos a dicha frecuencia de resonancia.

Los filtros pasivos son los más comúnmente usados en la industria. La Figura 2.1, muestra su clasificación como:

- Filtros sintonizados.
- Filtros pasa altas o pasa banda.

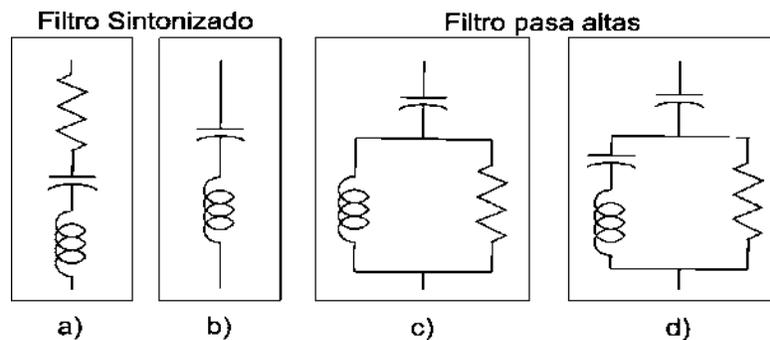


Figura 2.1.- Estructura de los filtros pasivos, a) 1er orden, b) 2do orden, c) 3er orden y d) Tipo C.

El filtro pasivo es más común en aplicaciones industriales ya que presenta muy baja impedancia al cambio de frecuencia, a través de dicho filtro es drenada toda la corriente de la frecuencia particular que se desea eliminar. De esta manera, el diseño del filtro pasivo debe tomar en cuenta el crecimiento esperado de las fuentes generadoras de armónicos o de la reconfiguración de la carga, porque de otra manera puede ser expuesto a sobrecarga, que

a su vez puede rápidamente desarrollar un sobrecalentamiento extremo interno y daño térmico. Es por esto que el diseño de un filtro pasivo requiere de un previo análisis, en donde se debe de tener un conocimiento preciso de la carga y del sistema de potencia.

Los filtros pasivos siempre proveen compensación reactiva la cual está determinada por la capacidad y el voltaje requeridos en el banco de capacitores. En la implementación pueden ser diseñados para un doble objetivo, el de filtrado y compensación del factor de potencia al nivel deseado. Si se utiliza más de un filtro (por ejemplo, ramales sintonizados al 5° y 7° armónico) es importante considerar que todos les proveerán un cierto grado de compensación reactiva.

Este filtro es una combinación de inductancias y capacitancias. En realidad, en la ausencia de un resistor diseñado físicamente, habrá siempre una resistencia serie, la cual es la resistencia intrínseca del capacitor serie, utilizada algunas veces para evitar sobrecalentamiento del filtro. Todas las corrientes de armónicos cuya frecuencia coincide con la del filtro encontrarán un camino de baja impedancia a través del filtro.

La frecuencia resonante de este filtro puede ser expresada mediante la siguiente expresión:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.1)$$

Dónde:

f_0 = frecuencia de resonancia en Hertz (Hz).

L = inductancia del filtro en Henrys (H).

C = capacitancia del filtro en Faradios (F).

El factor de calidad Q_f del filtro es la relación entre la reactancia inductiva (X_L) o capacitiva (X_C) bajo resonancia y la resistencia. Los valores típicos de Q_f fluctúan entre 15

y 80 para filtros que son usados en la industria. Se utiliza la siguiente relación para calcular el factor de calidad:

$$Q_f = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} \quad (2.2)$$

Los filtros de bajo voltaje (480 a 600 V) usan núcleos de hierro con espacio de aire que tienen elevadas pérdidas pero están asociados a bajos valores de Q_f . Los filtros en medio voltaje (4,16 a 13,8 kV) tienen valores de Q_f en el rango superior a los anteriores.

La relación $\frac{X}{R}$ de sistemas de bajo voltaje está en el rango de 3 a 7. Estos sistemas no presentan un pico elevado de resonancia paralela en la característica impedancia-frecuencia (Z-f). Aunque los filtros de bajo voltaje tienen pérdidas elevadas, también proveen gran atenuación a cualquier oscilación presente en el sistema.

En los criterios de diseño para construir un filtro se consideran los siguientes factores: bajo mantenimiento, economía, y fiabilidad. El diseño de un filtro simple es lo que se busca en la mayoría de los casos.

Los pasos para diseñar un filtro armónico usando las relaciones básicas que permitan una operación confiable pueden ser sintetizados como sigue:

1. Calcular la capacitancia necesaria para mejorar el factor de potencia y eliminar cualquier penalización por la compañía del suministro eléctrico. La compensación del factor de potencia es generalmente aplicada para elevar el factor de potencia alrededor del 0,95 o mayor.
2. Elegir un reactor para cambiar el capacitor serie a la frecuencia del armónico deseado. Por ejemplo, en un convertidor de 6 pulsos, esto podría comenzar en el quinto armónico y podría involucrar bajas frecuencias en la aplicación de un horno de arco.

-
3. Calcular el voltaje pico en terminales del capacitor y la corriente rms del reactor.
 4. Elegir componentes comerciales para el filtro y verificar el desempeño del filtro para asegurar que los componentes del capacitor operan entre los límites recomendados por la norma [IEEE-519-1992]. Esto podría requerir de un número de iteraciones hasta que se logre la reducción deseada de los niveles armónicos sea lograda.

Los filtros pasivos transmiten una corriente que puede ser expresada como una fracción de la corriente de la carga a la frecuencia fundamental. Por su costo, son más caros que los reactores serie usados para proveer alguna atenuación de armónicos, pero ellos tienen la ventaja de proveer potencia reactiva a la frecuencia fundamental. Para propósitos prácticos, son substancialmente usados en la industria.

La impedancia del filtro debe ser más pequeña que la presentada por el sistema al cambio de frecuencia. En sistemas de bajo voltaje en el cual la relación $\frac{X}{R}$ es pequeña, un filtro individual será suficiente para proveer la atenuación necesaria. Algunas veces se incluye una componente resistiva serie para el control de la corriente máxima permitida a través del filtro. Esto tendrá un impacto sobre el factor de calidad del filtro como es descrito por la Ecuación (2.2).

El estudio de la respuesta de los filtros sintonizados proporciona los siguientes aspectos relevantes:

1. Los filtros sintonizados actúan como un camino de baja impedancia, absorbiendo efectivamente las corrientes de armónicos para la cual fueron sintonizados. Es importante estar consciente que estos filtros pueden tomar corrientes de frecuencias vecinas, por lo tanto, será importante evaluar el impacto de esas corrientes adicionales en los parámetros operacionales del filtro.

2. Para un consumo de potencia comercial o industrial hay un pronunciado incremento de la impedancia en frecuencias menores a la frecuencia de sintonización en los filtros serie LC de frecuencia cambiante, según se muestra en la Figura 2.2. Esto resulta de una condición de resonancia paralela entre el capacitor del filtro y la inductancia de la fuente.

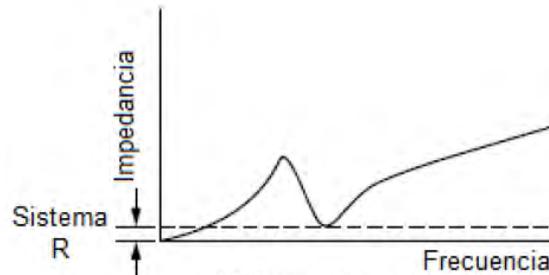


Figura 2.2.- Respuesta en frecuencia de un Filtro Pasivo de Potencia.

La impedancia de la rama del filtro está dada por:

$$Z = R + j \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right] \quad (2.3)$$

Donde R, L, C son la resistencia, inductancia y capacitancia de los elementos del filtro, respectivamente y ω es la frecuencia angular del sistema de potencia.

La condición de resonancia serie es excitada cuando la parte imaginaria de la impedancia es igual a cero, donde sólo la componente de la impedancia es la resistencia. La frecuencia a la cual el filtro es sintonizado es entonces definida por el valor de ω que hace que la reactancia inductiva y capacitiva se cancele una a otra en la Ecuación (2.3). Esta frecuencia está dada por la Ecuación (2.1). Si hacemos h la relación entre la armónica y la frecuencia fundamental del sistema, la reactancia inductiva y capacitiva a la frecuencia armónica puede ser expresada como:

$$X_{Lh} = h\omega_L \quad (2.4)$$

$$X_{Ch} = \frac{1}{h\omega_c} \quad (2.5)$$

Expresado de una manera diferente, considerando una resistencia cero, la condición para la impedancia en la Ecuación (2.3) es igual a cero en la frecuencia sintonizada requerida:

$$X_{Lh} = X_{Ch} \quad (2.6)$$

Sustituyendo la Ecuación (2.4) y la Ecuación (2.5) en la Ecuación (2.6) y resolviendo para h, obtenemos:

$$h^2 = \frac{X_C}{X_L} \quad \text{ó} \quad h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.7)$$

2.3.2 Métodos de Filtrado pasivo

El método de filtrado pasivo se realiza mediante arreglos LC en serie o paralelo que permiten mitigar los armónicos producidos por cargas no lineales. Generalmente los filtros pasivos se sintonizan a armónicos de bajo orden, pero de mayor magnitud, por ejemplo, 5° y 7° armónico. En la Figura 2.3 se muestran los arreglos paralelo y serie de filtrado pasivo.

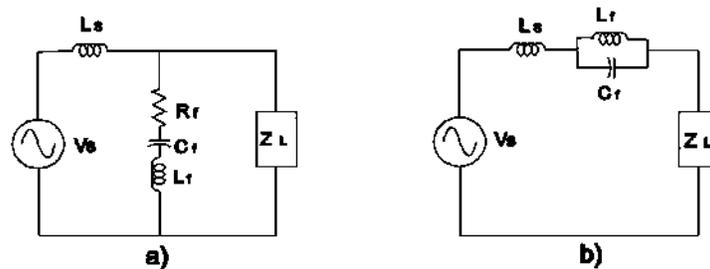


Figura 2.3.- Configuraciones del Filtrado Pasivos a) paralelo, b) serie.

2.3.2.1 Filtro pasivo conexión paralelo

La Figura 2.3 a) muestra la conexión en paralelo con la carga no lineal; puede estar formado por varias ramas en paralelo, dependiendo de los armónicos a eliminar, tal como se muestra en la Figura 2.4. Conceptualmente, el filtro presenta una trayectoria de baja impedancia que permite el drenado de armónicos producidos por la carga.

Es importante mencionar, que además de realizar la función de cancelación de armónicos de corriente y/o voltaje, el filtro pasivo puede cumplir la función de compensación de potencia reactiva. Evita que la carga absorba mayores picos de corriente y armónicos, ya que con su aplicación el valor de la impedancia de la red disminuye [Grady y Santoso, 2001].

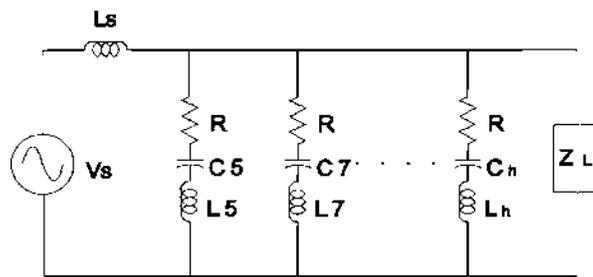


Figura 2.4 Filtro Pasivo paralelo de múltiples frecuencias de resonancia.

La impedancia de este filtro se puede expresar como [Candela, 2009]:

$$Z_f = j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.8)$$

Esta impedancia tiene valor cero para la frecuencia de resonancia ω_0 .

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad ; \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.9)$$

En la Ecuación (2.8), se ha despreciado la resistencia serie de la bobina, que es el valor real de la impedancia del filtro a la frecuencia de resonancia [Candela, 2009].

2.3.2.2 Filtros pasivos en conexión serie

La configuración del filtro pasivo serie se ilustra en la Figura 2.3 b). Consta de un elemento inductivo y uno capacitivo conectados en paralelo, en serie con la carga no lineal.

Al momento de realizar la instalación del filtro pasivo serie, se suma la impedancia del filtro con la red, lo cual representa una elevada impedancia a los armónicos generados por las cargas no lineales, con lo cual limita la circulación de los armónicos hacia el sistema.

De manera similar al filtro pasivo paralelo, en el filtro pasivo serie puede estar formado por varias ramas, dependiendo de los armónicos a mitigar, según se muestra en la Figura 2.5. Esta estrategia evita de manera efectiva la propagación de armónicos hacia el sistema. En la práctica, la implementación de filtros pasivos serie no es muy común, ya que estos distorsionan la forma de onda de voltaje en el lado de la carga. Esta desventaja limita la conexión del filtro pasivo serie cuando existen cargas generadoras de armónicos, así como sensibles a la distorsión de voltaje [Candela, 2009].

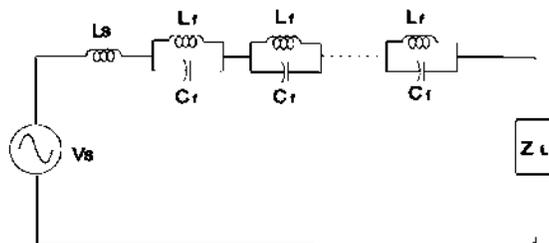


Figura 2.5 Filtro Pasivo paralelo de múltiples frecuencias de resonancia.

Para el caso de los sistemas monofásicos, se realiza una conexión diferente del filtro pasivo serie, ya que este filtro pasivo se instala en el elemento neutro, para mitigar el tercer armónico en redes de bajo voltaje [Jaakkola, 2001], con lo cual se consigue que el elemento neutro eleve su impedancia y así bloquee del armónico. Sin embargo, esta solución

presenta la desventaja que genera tercer armónico de voltaje entre fase y neutro [Candela, 2009].

2.3.3 Filtros Activos de Potencia

Las bases conceptuales sobre el filtrado activo de armónicos datan de la década de 1970 [Gyugyi y Strycula, 1976]. L. Gyugyi y E. C. Strycula en 1976 son los primeros en llamar filtros activos a aquellos dispositivos capaces de comportarse como una fuente de voltaje o corriente controlable. Posteriormente en [Mohan *et al.*, 1977] utilizan nuevamente el término de filtro activo para aquellos dispositivos capaces de superar las limitaciones que presentan los filtros pasivos y con característica de poder eliminar los armónicos de corriente generados por las cargas no lineales.

Para mitigar la distorsión armónica de la red eléctrica se puede utilizar un sistema más eficiente que los filtros pasivos, un sistema muy efectivo utilizado cada vez más en la actualidad es el filtro activo de potencia (FAP), el mismo que en los últimos años ha tenido un gran desarrollo.

El filtro activo de mayor uso es el formado por una fuente de corriente en paralelo con la red, la cual absorbe todas las perturbaciones de corriente que se tengan en el punto de acoplamiento común (PCC).

En las últimas décadas se han desarrollado diversas topologías de los filtros activos, [Singh y Haddad, 1999], [Fang *et al.*, 2001], impulsadas por el gran avance que ha desarrollado la electrónica de potencia en lo que son los convertidores estáticos y también por la inserción de nuevos semiconductores de potencia, con una mayor calidad de soporte de corriente y voltaje. Con el conocimiento de las diversas técnicas de control, también se tiene un tiempo de conmutación muy reducido y que al momento de su implementación es acompañado por el gran desarrollo que se tiene en los sistemas digitales como lo es el procesador digital de señales (DSP).

Con estos nuevos dispositivos se ha logrado eliminar la complicada implementación de convertidores con tiristores, lo implicaba la instalación de elementos de conmutación forzada, los cuales operaban a unos cientos de Herz (Hz), muy por debajo de los elementos de conmutación con los que se cuenta en la actualidad.

Estos sistemas semiconductores o de conmutación rápida con los que cuentan los filtros activos son robustos y confiables, ya que por medio del circuito control, permite el accionamiento o disparo del dispositivo de potencia desde señales lógicas de control con aislamiento galvánico, a otros circuitos, como: circuitos de protección térmica, frente a sobrecargas y frente a corto circuito.

Una posible clasificación de los FAP, según su topología y modo de inserción en la red eléctrica, es la siguiente [Román, 1995]:

- Conexión paralelo o shunt.
- Conexión serie.

2.3.4 Métodos de Filtrado Activo

Los filtros activos son utilizados para la compensación de armónicos y potencia reactiva, así como también para el control de voltaje. Los filtros Activos utilizan convertidores estáticos, los cuales son utilizados en modo inversor y operando en los cuatro cuadrantes, con lo se puede tener un intercambio de potencia con la red. Un filtro activo de potencia se conecta en paralelo con la carga actuando como una fuente de corriente controlada o en serie actuando como una fuente de voltaje.

El correcto diseño y control de los filtros activos de potencia, permite obtener importantes mejoras sistemas de filtrado que utilizan inversores de baja potencia basados en topologías convencionales.

En [Román, 2006], se muestra que los filtros activos pueden ser implementados tanto para sistemas monofásicos así como para sistemas trifásicos, con o sin neutro; el convertidor estático puede actuar como fuente de corriente o de voltaje.

En la Figura 2.6 se muestran las conexiones trifásicas sin neutro más comunes de convertidores.

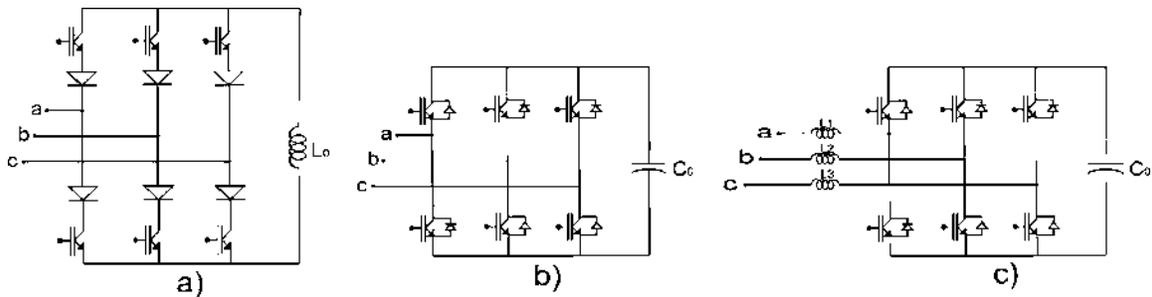


Figura 2.5.- Convertidor a) De corriente, b) De voltaje, c) De voltaje con control de corriente.

En el caso de redes con neutro se consideran dos alternativas [Román, 2006]:

- a) Hacer uso de un convertidor más, el cual consiste en un cuarto semipunto, conectado en paralelo con los tres propios del inversor trifásico.
- b) Utilizar un convertidor trifásico con la inserción del conductor de neutro en el punto medio del sistema de almacenamiento de CD (generalmente de tipo capacitivo), con control del equilibrio de voltaje o corrientes de ese punto medio.

En la Figura 2.7 se ilustra lo anterior.

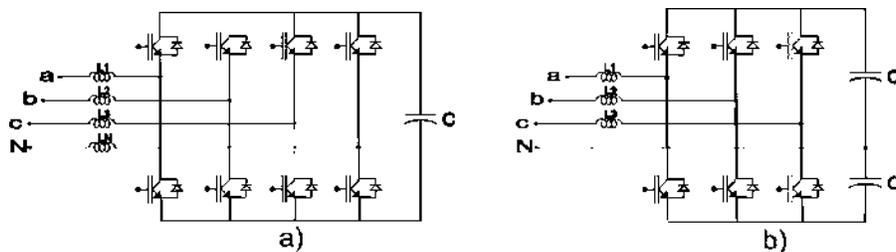
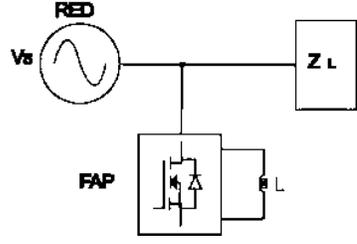
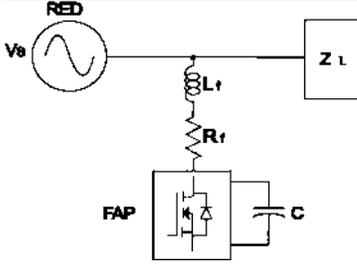
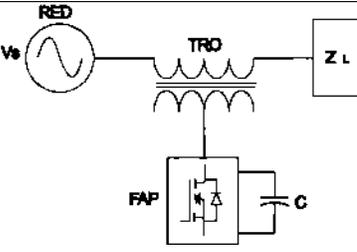


Figura 2.7.- Estructura del convertidor trifásico a) Con convertidor de neutro, b) Con control de equilibrio de voltaje en CD.

Los sistemas basados en el uso de convertidores para el elemento neutro son fáciles de manipular y brindan una buena respuesta de su operación, aunque también se cuenta con la desventaja que implican un mayor costo, por los elementos adicionales a instalar. En la Tabla 2.2 se presentan los diferentes métodos de filtrado activo.

Tabla 2.2.- Métodos de filtrado activo.

Tipo de Filtro	Conexión	Topología
Activo con fuente de Corriente	Paralelo	
Activo con fuente de Voltaje	Paralelo	
Activo con Fuente de Voltaje	Serie	

2.3.4.1 Filtro activos conexión paralelo

La topología más utilizada en la implementación de los filtros activos de potencia es la conexión en paralelo con el sistema y la carga. Esto permite compensar armónicos, potencia reactiva, factor de potencia, balance de fases (para el caso que se cuente con un

sistema desbalanceado). Esta compensación se realiza en el PCC, que es donde se conectará el filtro activo potencia con el sistema.

En la Figura 2.8 se muestra la estructura del convertidor tipo corriente, en donde el convertidor funcionará como una fuente de corriente controlable.

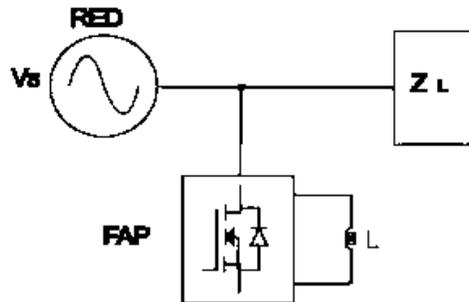


Figura 2.8.- Filtro Activo paralelo con fuente de corriente.

La potencia en watts (W) requerida por el convertidor es teóricamente cero, aunque en su operación práctica, se tiene la potencia asociada a las pérdidas en los semiconductores y otros elementos no ideales.

El sistema de control del convertidor, monitorea la corriente en la carga, determina su contenido de armónico y envía las señales de mando a los semiconductores para inyectar las corrientes armónicas con la fase necesaria para lograr su cancelación.

El esquema más comúnmente empleado se basa en un convertidor de voltaje, que trabaja en modo de control por corriente. En este arreglo, mostrado en la Figura 2.9, la energía se almacena en un capacitor situado en el lado de CD del convertidor.

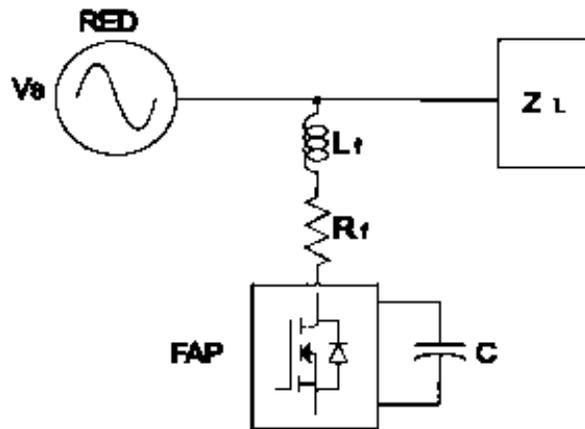


Figura 2.9.- Filtro Activo paralelo con fuente de voltaje.

En este arreglo, la mitigación de armónicos también se basa en la inyección identificada de corriente en paralelo y en contrafase con los armónicos presentes en la carga.

Esta última variante del FAP paralelo es la que será considerada en esta tesis como topología de referencia para los casos de estudio considerados.

2.3.4.2 Filtro activo en conexión serie

La Figura 2.10 muestra el filtro activo en conexión serie, conectado en serie entre la red y la carga. La red eléctrica se comporta como una impedancia variable, teóricamente cero a frecuencia fundamental e infinita para las demás frecuencias armónicas.

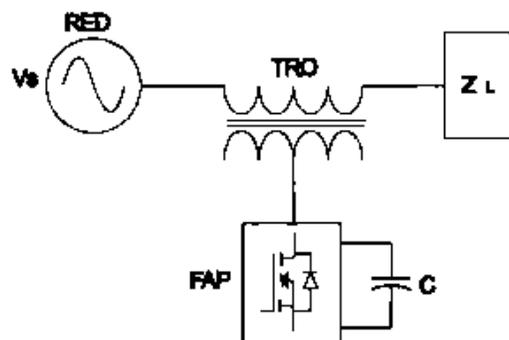


Figura 2.10.- Filtro activo serie.

El convertidor actúa como fuente de voltaje, de valor tal que permita obtener la impedancia deseada al contenido de armónicos de la carga. Obsérvese el intercambio de posiciones entre el filtro activo y la carga para las conexiones en serie y paralelo, así como su operación en modo de fuente de voltaje y fuente de corriente, respectivamente.

Esta topología no es muy común; se acompaña normalmente de un sistema de filtrado pasivo complementario.

2.4 Conclusiones

En el presente capítulo se ha hecho una descripción de los filtros pasivos, resaltando sus ventajas e inconvenientes. Se han presentado también los filtros activos, los cuales son teóricamente perfectos para eliminar armónicos, además de tener otras prestaciones.

Los filtros pasivos, a pesar de su bajo costo y aparente sencillez, pueden presentar muchos problemas al instalarse en la red eléctrica. Sus inconvenientes más importantes son las posibles resonancias con otros elementos de la red y que el grado de filtrado depende de la impedancia de dicha red.

La ubicación de los filtros pasivos se hace en función a la distribución de las cargas generadoras de armónicos. Para la selección de filtros pasivos se requiere conocer el armónico a atenuar o en su caso, saber de la función que se desea desempeñe dicho filtro, como puede ser: compensación de reactivos, filtrado de armónicos o regulación de voltaje.

En una red eléctrica el caso más común es la utilización de filtros pasivos paralelos, los cuales tienen un comportamiento capacitivo para frecuencias por debajo de la frecuencia de sintonía, un comportamiento resistivo para esa frecuencia y un comportamiento inductivo para frecuencias superiores. Observando que para la frecuencia fundamental tendría un comportamiento capacitivo, el filtro pasivo paralelo resulta muy útil para la compensación de reactivos.

Los filtros pasivos pueden ser diseñados para la compensación de sistemas de gran potencia, permitiendo una instalación sencilla y resultando más robustos y económicos que otras aplicaciones más avanzadas. Sin embargo, esto da lugar a que una vez instalados, resulte imposible modificar sus parámetros de sintonía viéndose su capacidad de filtrado severamente afectada por la impedancia de la red.

Los filtros pasivos no permiten seleccionar el armónico que se desee atenuar en un momento determinado de operación, lo que puede llevar a la destrucción del mismo, como consecuencia de una sobrecarga originada por una inyección adicional de armónicos por parte de otras cargas.

Dentro de los diferentes sistemas anteriormente mencionados, se ofrecen diversas características de compensación, que en cada uno de estos casos es diferente para cada uno de los sistemas. Básicamente, la elección de uno de estos sistemas estará condicionado por las características de voltaje y de potencia de la red así como de la carga no lineal.

Los filtros activos paralelo se destinan principalmente para la compensación de cargas no lineales conectadas a redes eléctricas de bajo voltaje y potencias medias. Se destina principalmente a la compensación de la distorsión armónica de la corriente de línea, y pueden proporcionar una compensación parcial de energía reactiva.

Los módulos de control utilizados en los filtros activos de potencia tienen la misión de generar las señales de referencia que serán utilizadas por los módulos de potencia con el fin de que el sistema pueda realizar la compensación de armónicos. Se trata principalmente, de muestrear el estado actual del sistema de alimentación, y en función de este resultado, generar las señales pertinentes destinadas para la compensación, mediante la comparación de las señales adquiridas con señales calculadas de referencia. Estos sistemas deberán de presentar el menor tiempo de respuesta y error posibles. Diferentes algoritmos utilizados en las estrategias de compensación son más convenientes que otros (siempre en función del objetivo de compensación del sistema).

Capítulo 3 Métodos de Filtrado Activo-Pasivo

3.1 Introducción

Los filtros híbridos son una combinación de filtros pasivos y activos. Esta combinación persigue mejorar las prestaciones de filtrado de los elementos pasivos y minimizar la potencia del elemento activo. Existen múltiples topologías de filtros híbridos, por lo que en este Capítulo sólo se presentan las más representativas.

Los filtros híbridos paralelo son adecuados para cargas en fuente de corriente, mientras que los filtros híbridos serie son adecuados para cargas en fuente de voltaje.

En la Fig. 3.1 se muestran dos tipos de filtros híbridos complementarios. El filtro de la Figura 3.1 a) está formado por elementos pasivos y activos en paralelo, que como se mencionó anteriormente es apto para cargas en fuente de corriente. El filtro de la Figura 3.1 b) posee también elementos pasivos y activos en serie y es adecuado para cargas en fuente de voltaje. El filtro de la Figura 3.1 a) está formado por un filtro activo paralelo, trabajando en fuente de corriente y un filtro pasivo. Este reparto está justificado por la dinámica que experimenta el filtro activo con el cual se pretende maximizar su compensación con la implementación de un filtro pasivo paralelo, aprovechando su alta frecuencia de conmutación. El filtro pasivo paralelo es adecuado y compacto para filtrar cualquier armónico al que se le sintonice, aunque es recomendable sintonizarlo a armónicos con magnitudes pronunciadas; por ejemplo el 5° y 7° armónicos de corriente comúnmente generados por cargas no lineales, tales como rectificadores. El reparto de funciones entre el filtro activo y pasivo de la Figura 3.1 a) tiene por objeto optimizar el comportamiento del conjunto. Además, el sistema de control del filtro activo se puede encargar de atenuar las resonancias indeseables que se pudieran dar entre el filtro pasivo y la inductancia de red. En la Figura 3.1 b) se pueden hacer consideraciones similares en lo referente al reparto de las funciones de filtrado entre la parte pasiva y la activa.

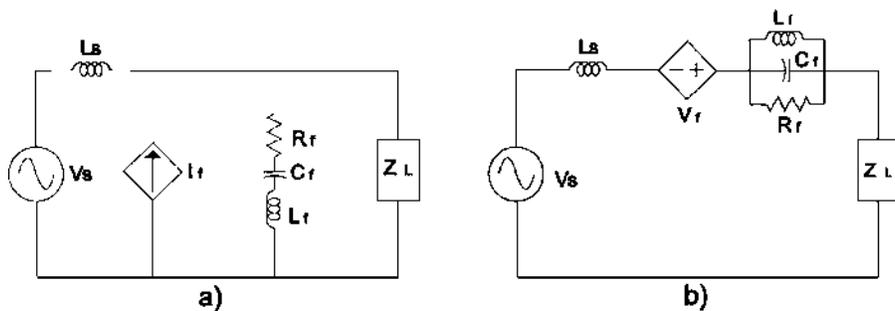


Figura 3.1.- Filtro Híbrido monofásico con reparto de acción filtrante a) paralelo, b) serie.

En los filtros híbridos que se describen a continuación, el elemento activo y el pasivo desarrollan una tarea conjunta. La falla de cualquiera de las dos partes impedirá la acción de filtrado o disminuirá en mucho el desempeño del filtro.

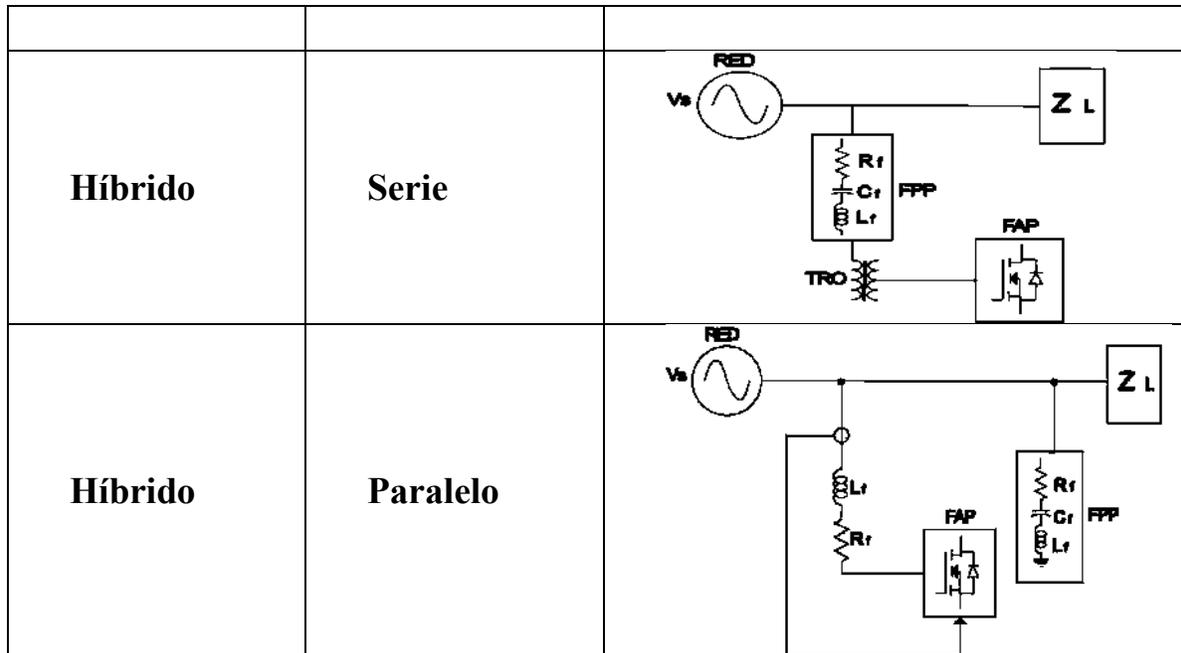
Se han propuesto diversas topologías [Peng y Lai, 1996], sin embargo las más comunes son:

- a) Filtro activo en paralelo con el filtro pasivo y en serie con la línea.
- b) Filtro activo en serie con el filtro pasivo y estos en paralelo con la línea.
- c) Filtro activo en paralelo con filtro pasivo y en paralelo con la línea.

En la Tabla 3.1 se presentan los diferentes métodos de filtrado híbrido.

Tabla 3.1.- Métodos de filtrado híbrido.

Tipo de Filtro	Conexión	Topología
Híbrido	Serie-paralelo	



3.2 Filtro Activo en paralelo con el Filtro Pasivo y en serie con la Red

En la Figura 3.2 se presenta dicha topología híbrida, donde el filtro activo se conecta en serie con la línea y el filtro pasivo en paralelo. El donde el filtro activo se comporta como una impedancia variable situada entre la línea y la carga.

El filtro activo se instala en serie con la red, lo cual resulta en un bloqueo al paso de armónicos hacia ella, por lo tanto de manera forzada los armónicos generados por la carga no lineal necesariamente circularán por el filtro pasivo. De este modo el voltaje en el lado de línea del filtro activo serie es teóricamente el correspondiente v_s a la frecuencia fundamental.

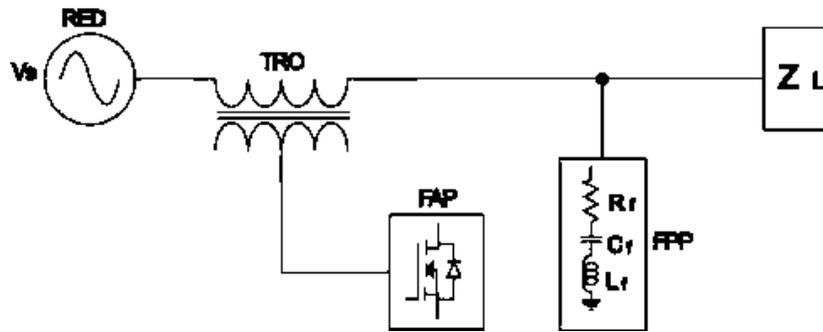


Figura 3.2.- Filtro Activo conectado en paralelo con el filtro pasivo y en serie con la red.

El filtro activo se encuentra conectado en serie con la línea a través de un transformador acoplador. El secundario de este transformador se dimensiona para la totalidad de la corriente nominal de la carga, aunque el voltaje que debe soportar es debido a las componentes de armónicos, mientras que es nulo para la componente fundamental.

La ventaja obtenida con la implementación de esta topología es que la cancelación de la mayor magnitud de los armónicos es realizada por parte del filtro pasivo, con lo que el filtro activo se dimensiona para una potencia de tan sólo el 2 - 5% de la potencia de la carga, lo cual resulta en menos gasto que en la implementación de un filtro activo puro, que realice por si solo la cancelación de los armónicos generados por la carga no lineal.

3.3 Filtro activo en serie con el filtro pasivo y estos en paralelo con la red

Este es un método similar al anterior, donde la sección correspondiente al filtro activo está situada en serie con el filtro pasivo. El filtro activo está conectado en serie con el filtro pasivo a través de un transformador tal como se muestra en la Figura 3.3.

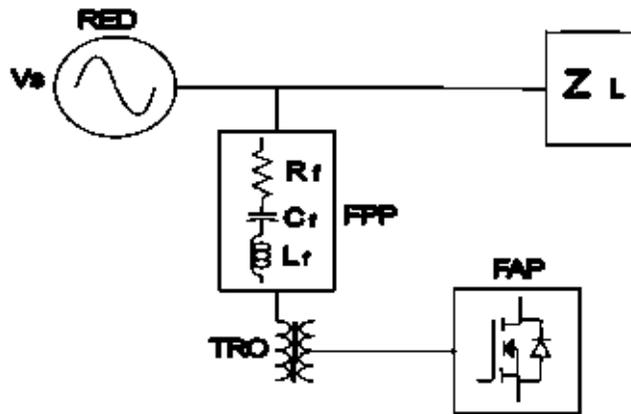


Figura 3.3.- Filtro activo en serie con el filtro pasivo y estos conectados en paralelo con la red.

La operación del filtro activo es análoga a la de una fuente de voltaje variable, de magnitud teóricamente cero a frecuencia fundamental e igual al de las componentes armónicas de voltaje en la carga a frecuencias armónicas. En el punto de conexión de la sección pasiva del filtro el voltaje medido es aquel a frecuencia fundamental. Una ventaja importante de esta configuración es que la sección de filtro activo debe soportar únicamente las corrientes armónicas que circulan por el filtro pasivo y no la de carga.

3.4 Filtro activo en paralelo con el filtro pasivo y en paralelo con la red

El sistema principal de filtrado de corrientes de armónicos es pasivo, sintonizado a los armónicos de menor orden y de mayor contenido. En paralelo con el filtro pasivo hay un filtro activo de corriente y/o voltaje encargado de eliminar los armónicos a frecuencias más elevadas, tal como el modelo mostrado en la Figura 3.4, el cual será motivo de análisis en esta tesis.

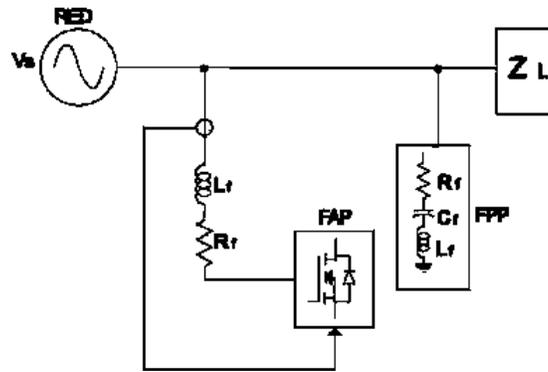


Figura 3.4.- Filtro Activo en paralelo con el filtro Pasivo y estos en paralelo con la red.

En esta tesis, se muestra que mediante el diseño adecuado de un esquema de control para el filtro activo, es posible utilizar la topología mostrada en la Figura 3.4 como propuesta. Con la importante mejora de eliminar el transformador entre la parte activa y la parte pasiva del grupo híbrido; lo cual repercute en una reducción considerable en dimensiones físicas y costos.

Existen otros tipos de conexión resultante de la combinación entre el filtro activo y pasivo, los cuales presentan características de operación óptimas para determinados sistemas con contenidos armónicos Sin embargo, los más comúnmente utilizados son los mencionados previamente.

3.5 Descripción del Filtro Activo de Potencia Utilizado

Los armónicos son creados por diversos fenómenos físicos tales como transformadores, hornos de arco, rectificadores. En la actualidad, debido a la proliferación de los convertidores estáticos conectados directamente a la red eléctrica, estos representan las principales fuentes de armónicos, fundamentalmente de corriente.

Los armónicos de corriente generan a su vez armónicos de voltaje, aunque circulen por impedancias lineales, debido a las caídas de voltaje que se producen en ellas al circular corrientes no senoidales. De hecho, si se soluciona el problema de la presencia de armónicos de corriente mediante su cancelación, se soluciona prácticamente el problema de

la distorsión de la forma de onda de voltaje, puesto que está en su origen es perfectamente senoidal. Los armónicos de corriente son generados por las cargas no lineales conectadas a la red eléctrica y ellas a su vez ocasionan distorsión en la forma de onda de voltaje.

Al conectar un filtro activo en paralelo con la red eléctrica este inyecta las corrientes necesarias para cancelar los armónicos generados por la carga no lineal alimentada. En esta investigación, se propone como topología de estudio, la conexión en paralelo de un filtro híbrido activo-pasivo, en el cual se ha eliminado el transformador para unir las partes pasivas y activas del mismo.

En esta investigación, se analiza el efecto de la mitigación de armónicos específicamente en un sistema convertidor AC/DC. Su esquema de control le permite realizar de manera efectiva la eliminación de armónicos, lográndose mejor eficiencia y efectividad en su desempeño.

El principio de funcionamiento de un sistema de filtros activos se basa en medir el contenido armónico de la red y a partir de este registro realiza la acción correctiva, que de manera efectiva permita entregar en el PCC una onda de corriente o voltaje que sumada a la onda distorsionada finalmente resulte en una forma de onda sin distorsiones, logrando así un doble efecto, a saber: Primero permitiendo que la carga no lineal continúe su funcionamiento normal demandando de la red las señales de voltaje y corriente cuyas formas de onda presentan altos contenidos armónicos, seguido por el efecto de evitar que estas formas de onda distorsionadas sean propagadas hacia el resto del sistema, el correcto funcionamiento del filtro activo-pasivo permitirá que en la red eléctrica se tengan formas de onda con contenidos armónicos prácticamente nulos.

Es necesario contar con un sistema adicional, con la función de controlar la operación de la parte activa del sistema de filtrado. En este capítulo se describe también la teoría utilizada y el esquema de control utilizando en el sistema de filtrado híbrido tratado en esta tesis.

Los métodos de control de los filtros activos de potencia van encaminados a la obtención de procedimientos de compensación, utilizando estrategias de cálculo basadas en el dominio

de la frecuencia o en el dominio del tiempo [Casaravilla, 2002]. Estos métodos de control pretenden obtener señales aptas para la adecuada operación de los semiconductores de potencia, que forman parte de los convertidores estáticos, con el propósito de crear los voltajes o corrientes de compensación.

En la determinación de señales de referencia de corriente o voltaje se considera la definición de los algoritmos, cálculos o estrategias necesarios para la discriminación entre la potencia activa y la potencia englobada con el término de *potencia no activa* o su equivalente en valores de voltaje o corriente.

Finalmente, las señales de referencia de voltajes o corriente deberán ser transformadas en los correspondientes voltajes o corrientes de compensación, generados mediante los convertidores estáticos insertados en alguna de las topologías de filtrado híbrido que se han descrito anteriormente.

El control de estos convertidores para que realicen las acciones de control determinadas no es objetivo de esta tesis, aunque es frecuente utilizar las siguientes técnicas:

- *Técnica de Modulación Delta o Control por Histéresis*
- *Modulación PWM*
- *Space Vector Modulation*

En el *Control por Histéresis*, los órdenes de mando de conmutación a los semiconductores se obtienen por medio de una comparación, mediante una banda de histéresis, entre el valor calculado y el valor real. Lo cual implica que la frecuencia de conmutación será variable, aunque el tiempo de respuesta es muy rápido. Algunos programas de simulación como el utilizado en esta investigación incluyen bloques ya prediseñados para su aplicación. Por esta razón el método de modulación por ancho de pulso será el usado para obtener las señales de control que finalmente activarán los mosfets que forman parte del inversor.

El método de *Modulación PWM* consiste en la comparación entre la señal calculada y una onda triangular de frecuencia y amplitud fijas, o su equivalente conceptual en el caso del control digital. Las señales lógicas de la comparación son utilizadas para controlar los semiconductores del convertidor. Es un método de respuesta rápida y de implementación relativamente sencilla.

En cuanto al sistema denominado *Space Vector Modulation*, este es un método en el que se hace uso de la teoría de los vectores espaciales, y en donde la posición del vector espacial de la magnitud a controlar está situada en un espacio complejo dividido en seis sectores.

La posición del vector, en un momento determinado, se fija por la combinación obtenida mediante conmutación de los vectores adyacentes, según sea el sector en que se encuentre el vector representativo de la magnitud a controlar. Es un método propio de sistemas trifásicos, con mayores exigencias computacionales.

3.6 Técnica de Control Utilizada en el Filtro Activo de Potencia

Las técnicas de control utilizadas en FAP son un esquema de cálculos basados en teorías, que resultan en la obtención de las señales, las cuales son indispensables para realizar la compensación de armónicos y/o de potencia reactiva por parte de los inversores que forman parte fundamental de dichos filtros.

Estas técnicas de control se dividen en dos grandes grupos de acuerdo al marco de referencia utilizado: técnicas en el dominio del tiempo y técnicas en el dominio de la frecuencia. Las técnicas en el dominio de la frecuencia se basan en el análisis de Fourier y no son de aplicabilidad extendida debido a su elevado esfuerzo computacional asociado; caen fuera del propósito de estudio de esta investigación.

Las técnicas en el dominio del tiempo se basan en el concepto de potencia reactiva instantánea que se describe a continuación.

3.6.1 Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea

El concepto de potencia en sistemas trifásicos o monofásicos ha sido estudiado en distintos marcos de referencia: *dominio del tiempo* y *dominio de la frecuencia*. Se han establecido definiciones de potencia basada en el valor medio del producto del voltaje y corriente, o potencias aparentes como el producto de valores eficaces.

Dada la naturaleza de los voltajes y corrientes en las redes eléctricas y la presencia de cargas no lineales de variación rápida y aleatoria, se considera que los métodos de medida de potencia no pueden estar basados en cálculos de valores medios o valores medios cuadráticos, si se pretende compensar los efectos nocivos debidos a la presencia de tales cargas.

En 1983 Akagi, Kanazawa y Nabae [Akagi *et al.*, 1983], introdujeron la Teoría de Potencia Reactiva Instantánea (TPRI) para redes trifásicas, basada en el concepto de valor instantáneo, para formas de onda de voltaje y corriente arbitrarias, incluyendo estados transitorios.

Esta es una de las teorías de uso y aplicación más extensa, no solo a nivel teórico sino también en aplicaciones prácticas. Se puede considerar como la primera que ha sido realmente implementada con éxito mediante métodos basados en la utilización de convertidores estáticos, constituyendo lo que se conoce como FAP.

3.6.2 Desarrollo de la Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea

Esta teoría fue desarrollada inicialmente para sistemas trifásicos sin neutro, haciendo uso de los vectores espaciales instantáneos para definir el sistema trifásico en un sistema de dos ejes ortogonales, denominados α - β , que definen completamente el sistema trifásico [Debenbrock, 1962], [Willems, 1992]. La primera componente se obtiene a partir del concepto de potencia activa instantánea, mientras que la segunda componente se calcula como el complemento de la anterior componente para obtener la corriente total.

El sistema trifásico convencional de voltajes y corrientes variantes en el tiempo, está referido a un sistema de tres ejes a , b y c , fijos en el plano y desfasados entre sí $2\pi/3$. Este sistema trifásico es transformado como se mencionó anteriormente a un sistema de ejes bifásico α - β mediante la siguiente transformación, denominada transformada de Clarke [Longatt, 2004], [Plata y Tacca, 2003];

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

La potencia instantánea se define como la suma del producto de los valores instantáneos de voltajes y corriente de cada fase, es decir:

$$p = \sum_1^n v_n(t) * i_n(t) \quad (3.3)$$

Está claro que el nuevo sistema de ejes α - β que define al sistema trifásico debe garantizar la igualdad del valor de la *potencia instantánea*, independientemente del sistema de ejes de referencia elegido, y por lo tanto se debe cumplir que:

$$p = v_a * i_a + v_b * i_b + v_c * i_c \quad (3.4)$$

En [Akagi *et al.*, 1983], se definió el concepto de vector espacial, en donde se define la *potencia imaginaria instantánea* como el producto vectorial de voltaje y corrientes, de acuerdo a la expresión:

$$q = v_{\alpha} \times i_{\beta} + v_{\beta} \times i_{\alpha} \quad (3.5)$$

Este vector está situado en un eje perpendicular al plano α - β y consta de dos sumandos, que son el producto vectorial del voltaje según un eje por la corriente del otro eje. En una representación gráfica estos productos son vectores cuya dirección es perpendicular al plano formado por los ejes α - β y de sentido contrario, tal como se muestra en la Figura 3.5.

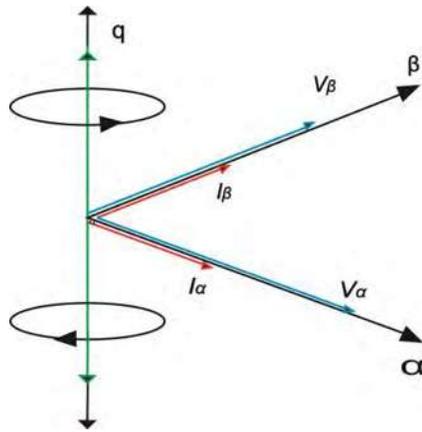


Figura 3.5.- Representación espacial de la potencia imaginaria instantánea.

La potencia p se expresa en watts (W) y es el producto de voltajes y corrientes pertenecientes a los mismos ejes, mientras que la potencia q no se puede ser expresada en W ni en VA, puesto que es el producto de voltajes y corrientes situados en ejes perpendiculares distintos. Es por esto por lo que a esta última potencia se le denomina *potencia imaginaria instantánea*.

El conjunto de las dos ecuaciones anteriores puede expresarse del siguiente modo:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Con lo que el valor de las corrientes pueden determinarse como:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} * \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Estas corrientes instantáneas, según los ejes α - β , se pueden expresar divididas a su vez en dos componentes:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha P} \\ i_{\beta P} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Donde la definición de cada componente se indica a continuación:

Corriente activa instantánea en el eje α :

$$i_{\alpha P} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} * p \quad (3.9)$$

Corriente reactiva instantánea en el eje α :

$$i_{\alpha q} = \frac{-v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} * q \quad (3.10)$$

Corriente activa instantánea en el eje β :

$$i_{\beta P} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} * p \quad (3.11)$$

Corriente reactiva instantánea en el eje β :

$$i_{\beta q} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} * q \quad (3.12)$$

La potencia instantánea en los ejes α - β , tal como se ha expresado anteriormente, como suma de las potencias en cada eje es:

$$p = p_\alpha + p_\beta = v_\alpha * i_\alpha + v_\beta * i_\beta = v_\alpha * (i_{\alpha p} + i_{\alpha q}) + v_\beta * (i_{\beta p} + i_{\beta q}) \quad (3.13)$$

Con lo cual se tiene;

$$\begin{bmatrix} p_\alpha \\ p_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha i_\alpha \\ v_\beta i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha i_{\alpha p} \\ v_\beta i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha i_{\alpha q} \\ v_\beta i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

De modo que la potencia real instantánea estará dada por:

$$P = p_\alpha + p_\beta = \frac{v_\alpha^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p + \frac{-v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q + \frac{v_\beta^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p + \frac{v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q \quad (3.15)$$

En donde el significado de cada sumando es el siguiente:

Potencia activa instantánea en el eje α :

$$p_{\alpha P} = \frac{v_\alpha^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p \quad (3.16)$$

Potencia reactiva instantánea en el eje α :

$$p_{\alpha q} = \frac{-v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q \quad (3.17)$$

Potencia activa instantánea en el eje β :

$$p_{\beta P} = \frac{v_\beta^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p \quad (3.18)$$

Potencia reactiva instantánea en el eje β :

$$p_{\beta q} = \frac{v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} q \quad (3.19)$$

Con lo que p puede escribirse como:

$$p = p_{\alpha} + p_{\beta} = p_{\alpha P} + p_{\alpha q} + p_{\beta P} + p_{\beta q} \quad (3.20)$$

De lo anterior se obtiene:

$$p = p_{\alpha p} + p_{\beta p} \quad y \quad p_{\alpha p} + p_{\beta p} = 0$$

La potencia real instantánea consta de los sumandos $p_{\alpha p}$ y $p_{\beta p}$, la cual coincide con la potencia activa del sistema trifásico y se denomina *potencia activa instantánea*.

Los sumandos $p_{\alpha p}$ y $p_{\beta p}$ tienen el mismo valor y signo contrario, se cancelan mutuamente y no contribuyen a la transferencia de potencia instantánea entre la fuente y la carga. Por ello a esos términos se les llama ***potencia reactiva instantánea*** (IRP por sus siglas en inglés) y puede considerarse que es una potencia que circula entre las fases y no entre la fuente y la carga. Además, para su compensación no es necesario disponer de ningún sistema de almacenamiento de energía.

El concepto de la IRP, distinto al de *potencia imaginaria instantánea*, es en realidad el más importante aportado por la teoría introducida por Akagi y otros.

Como extensión a la teoría de la potencia reactiva, en [Peng y Lai, 1996], se propone la teoría generalizada de la potencia instantánea (TGPI), la cual se aplica a sistemas con neutro flotante y referidos a cualquier sistema de coordenadas, tema que no será abordado en esta tesis, pero que es importante mencionar.

En general para el desarrollo del filtro híbrido pasivo-activo propuesto en esta tesis, se hizo uso del diagrama de bloques mostrado en la Figura 3.6, para compensación de armónicos, basado en la TPRI mencionada y desarrollada anteriormente en esta sección.

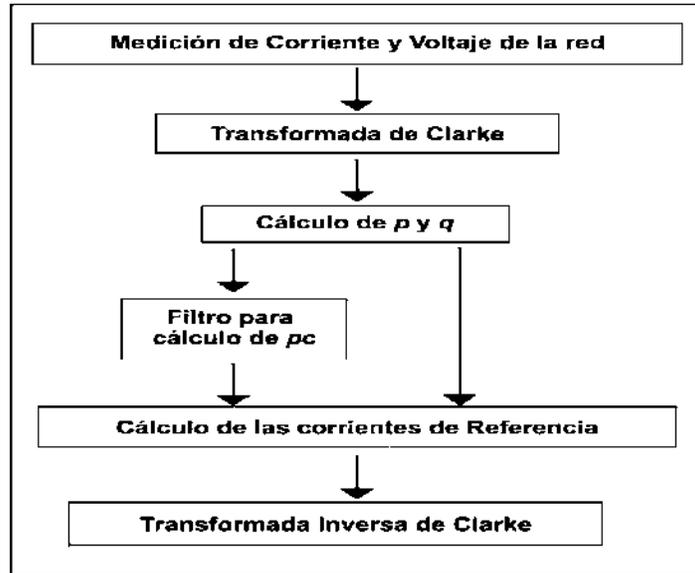


Figura 3.6.- Esquema para cálculo de corrientes de referencia.

De la Ecuación (3.7) se obtienen las corrientes de referencia necesarias para generar los pulsos con los cuales se podrán mitigar los armónicos del sistema. Dichas corrientes de referencia se encuentran en el marco de referencia de α - β , por lo que se debe aplicar la transformación inversa de Clarke, esto para obtenerlas en el marco de referencia abc [Plata y Tacca, 2003].

En base a lo anterior las corrientes de referencia se obtienen mediante la siguiente Ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

La Ecuación (3.21), permite obtener las corrientes de filtrado de referencia para la corrección de la distorsión armónica en las corrientes de línea, a inyectar por un FAP mediante el método de TPRI.

3.7 Técnica de Modulación Delta utilizada en el filtro Activo

En la modulación delta [Rashid, 1993] se deja que una forma de onda, i_{fk} ($k = abc$) para este caso, oscile dentro de una ventana Δi que está por encima y por debajo de la forma de onda de referencia i_{fk}^* ($k = abc$). La función de conmutación del inversor, que es idéntica a la del voltaje de salida, se genera a partir de los vértices que se forman, según se muestra en la Figura 3.7 para la fase a ; también se conoce como *control por histéresis*. La frecuencia de conmutación depende del ancho de la ventana Δi . La descripción del método para obtener las señales de conmutación de los transistores T_{A+} y T_{A-} para la fase a se describe a continuación, asumiendo que una señal de conmutación $S_{(T_{A+})} = 1$ indica una señal de encendido y $S_{(T_{A-})} = 0$ indica la señal de apagado; en este caso para el transistor T_{A+} .

En principio se fijan los valores de la ventana Δi , por ejemplo $\Delta i_{max} = 0.1$ y $\Delta i_{min} = -0.1$, para controlar la corriente $i_{fa}(t)$ que está oscilando dentro de la ventana Δi .

La corriente de referencia $i_{fa}^*(t)$ se sustrae de la corriente $i_{fa}(t)$, si la diferencia es menor que $\Delta i_{min} = -0.1$ esto indica que se violó el límite inferior de la ventana Δi y la señal de control del transistor será $S_{(T_{A+})} = 1$; de manera contraria, si la diferencia es mayor que $\Delta i_{max} = 0.1$, esto indica que se violó el límite superior de la ventana Δi y por lo tanto la señal de control será $S_{(T_{A-})} = 0$. Las señales de control del transistor están dadas, entonces por la siguiente ecuación:

$$si \begin{cases} S_{(T_{A+})} = 0, & S_{(T_{A-})} = 1 \\ S_{(T_{A+})} = 1, & S_{(T_{A-})} = 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

Supóngase que en el punto ❶ de la Figura 3.7 la diferencia de $i_{fa}(t) - i_{fa}^*(t)$ es menor que $\Delta i_{min} = -0.1$, entonces la señal de control para el transistor T_{A+} es $S_{(T_{A+})} = 1$ y de acuerdo a la

Ecuación (3.22) la señal de control para el transistor T_{A-} es $S_{(T_{A-})} = 0$. Ambas señales de control permanecen fijas hasta que en el punto ② de la Fig. 3.7 la diferencia de $i_{fa}(t) - i_{*fa}(t)$ es mayor que $\Delta i_{max} = 0.1$, por lo que ahora la señal de control para el transistor T_{A+} cambia de encendido a apagado, es decir $S_{(T_{A+})} = 0$. De la Ecuación (3.22), la señal de control para el transistor T_{A-} cambia a encendido $S_{(T_{A-})} = 1$.

De nueva cuenta estas señales de control son mantenidas hasta llegar al punto ③ de la Figura 3.7, donde se repite el procedimiento de cambio en las señales de control de los transistores. Este proceso para determinar las señales de control de los transistores se mantiene durante la simulación y se aplica de manera idéntica para las fases b y c .

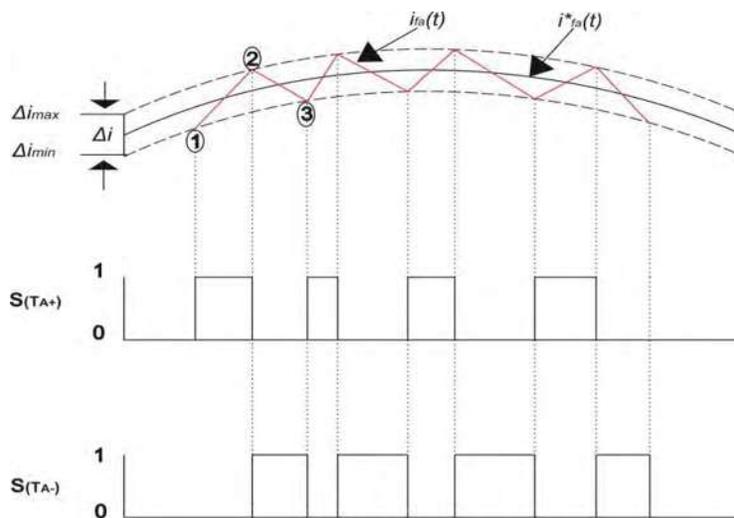


Figura 3.7.- Técnica de modulación delta.

3.8 Conclusiones

En este capítulo se han descrito las principales topologías híbridas, de las cuales se optó por utilizar la denominada Filtro Activo en paralelo con el filtro Pasivo y estos en paralelo con la red, con estructura de *convertidor de voltaje en modo de control por corriente*.

Existen tres posibles estrategias de control para el elemento activo del filtro híbrido, las cuales son: Técnica de Modulación Delta (Control por Histéresis), Modulación PWM o

Space Vector Modulation. De estas estrategias, la Técnica de Modulación Delta basada en la realimentación por corriente de red es la que se eligió para el desarrollo de esta tesis.

También se han relacionado algunas técnicas de control, basadas en el dominio del tiempo, considerado estas por su elevada rapidez de respuesta.

Se introduce el concepto de *potencia reactiva instantánea (IRP)*, cuyo interés reside en que es una potencia que circula entre las fases, no entre la red y la carga, y no precisa elementos de almacenamiento de energía para su compensación.

En este capítulo también se ha presentado una teoría sobre la potencia instantánea, denominada *Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea (TPRI)*, aplicable a cualquier sistema trifásico, con o sin neutro y con aplicación directa al control de los FAP.

La teoría se desarrolla en un sistema de ejes $\alpha\text{-}\beta\text{-}\theta$ y requiere la transformación de los voltajes y corrientes del sistema trifásico al nuevo sistema de ejes de referencia.

Se han definido dos potencias denominadas *potencia activa instantánea* y *potencia reactiva instantánea*, como el producto escalar y el módulo del producto vectorial de los vectores espaciales de voltaje y/o corriente.

A partir de aquí se han definido dos corrientes: una que está alineada con el vector de voltaje, que es la *corriente activa instantánea*, y otra perpendicular a esta, que es la *corriente reactiva instantánea*.

Capítulo 4 Análisis, Diseño y Simulación del Filtro Híbrido propuesto

4.1 Introducción

En este capítulo se muestra la topología del filtro híbrido tomado como modelo de estudio, así como la metodología bajo la cual opera el sistema de control el cual consta de varias acciones conjuntas.

El diseño del filtro híbrido para la mitigación de la distorsión armónica en las corrientes de línea fue realizado en Simulink® de Matlab®. Este programa permite a partir de un entorno gráfico estudiar el sistema eléctrico, realizar análisis de su funcionamiento midiendo tanto los parámetros propios del circuito, así como las variables eléctricas relevantes a las que se les requiere hacer seguimiento en su comportamiento.

A continuación se describe como es implementado cada uno de los componentes que permiten la operación correcta del filtro híbrido, desde los cálculos realizados para la obtención del filtro pasivo, así como el diagrama de cálculo de corrientes de referencia, control por histéresis e implementación del inversor trifásico en el filtro activo y por último el diagrama de conexión del modelo completo del circuito.

La propuesta se basa en dar solución a la distorsión de las corriente de línea por medio del filtro híbrido; formado por un filtro pasivo con distintas ramas LC sintonizadas a las frecuencias de los armónicos de corriente más relevantes (5° y 7° armónico), el filtro pasivo estará conectado en paralelo con un filtro activo, estando estos a su vez también conectados en paralelo con la fuente de alimentación.

En este Capítulo se analiza el cálculo de las corrientes de referencia para el filtro activo, el cual mide las corrientes de la fuente y de la carga para realizar compensaciones que permitan disminuir el contenido armónico inyectado hacia la red de alimentación.

Una vez que se detalla el principio y funcionamiento en que se basa el método de filtrado híbrido propuesto, en este Capítulo se ilustra por medio de simulaciones los resultados obtenidos del sistema, al momento de encontrarse en operación con y sin el filtro.

4.2 Análisis y diseño del filtro pasivo

Como se mencionó en el Capítulo 2, el filtro pasivo de sintonía única es una de las soluciones tradicionales empleadas en la eliminación de armónicos y como su nombre lo indica, emplea solamente elementos pasivos (inductores y capacitores) en su construcción. La Figura 4.1 muestra el diagrama esquemático elemental de un filtro pasivo de sintonía única de segundo orden.

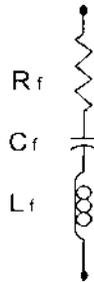


Figura 4.1.- Diagrama del Filtro Pasivo de Sintonía Única.

En la figura anterior, R_F engloba la resistencia serie equivalente asociada con el inductor y con el capacitor, las pérdidas en la conexión física de los elementos y determina el factor de calidad del filtro.

Los filtros de sintonización única se colocan en paralelo con la carga y representan una ruta de baja impedancia para el armónico de interés, limitando su paso a sólo una sección del sistema eléctrico.

Los filtros pasivos se diseñan, además, para corregir factor de potencia a frecuencia fundamental cuando la carga es de naturaleza inductiva [Akagi, 1994].

4.2.1 Cálculo del filtro pasivo

Para el cálculo del filtro pasivo, es decir, para determinar la capacidad de los elementos que conforman el filtro, se propuso como punto de partida un capacitor de $88\mu F$ para el caso de la eliminación del 5° armónico y de $44\mu F$ para el 7° armónico, con $Q_f = 25$.

A partir de la Ecuación (2.1) se realizó el cálculo de la inductancia necesaria para la mitigación del 5° y 7° armónico. Por medio de la Ecuación (2.2) se obtuvo el valor de R_f , el cual podría considerarse como la resistencia propia de la inductancia.

Los valores de los elementos utilizados en el filtro, así como su factor de calidad (Q_f) se muestran en la Tabla 4.1, donde se puede apreciar el bajo factor de calidad de los filtros utilizados comparado con valores industriales típicos ($Q_f = 60$).

Tabla 4.1.- Parámetros del Filtro Pasivo.

Armónica	C (μF)	L (mH)	R(Ω)	Q_f
5 ^a	88	3.1982	0.2411	25
7 ^a	44	3.2635	0.344	25

4.3 Análisis y Diseño del Filtro Activo

El filtro activo diseñado es modelado considerando las cuatro partes o etapas que lo integran, las cuales son:

1.- *Etapas de adquisición de datos:* Esta etapa está formada por los medidores de voltaje y de corriente.

2.- *Etapas de generación de señales de referencia:* En esta etapa se reciben las señales de la etapa anterior y se procesan para obtener las corrientes de referencia requeridas; para esto

se utiliza la teoría de la potencia reactiva instantánea [Akagi *et al.*, 1986] descrita en el capítulo anterior.

3.- *Etapa de control*: En esta etapa se reciben las señales de corriente generadas en la etapa anterior y por medio de un control por histéresis se generan los pulsos necesarios para activar el bloque de potencia.

4.- *Etapa de potencia*: Integrada por un inversor, formado por 6 mosfets de compuerta aislada y dos capacitores por el lado de CD, esta etapa se conecta al punto de conexión común (PCC).

4.3.1 Cálculo de las corrientes de referencia

En la Figura 4.2 se muestran las cuatro etapas del filtro activo descritas anteriormente, obsérvese cómo en la etapa de adquisición de datos de corriente y voltaje se miden señales proporcionales a los valores instantáneos de corriente y de voltaje en el punto del sistema donde se conecta el filtro. Con esta etapa, el circuito de generación de señales de referencia tiene la información necesaria para determinar las señales que deben utilizarse en el circuito, para el control de la conducción de los mosfets. A la salida del convertidor se obtendrán las componentes armónicas de corriente y las corrientes reactivas que consume la carga no lineal, evitándose que sean suministradas por el sistema de potencia.

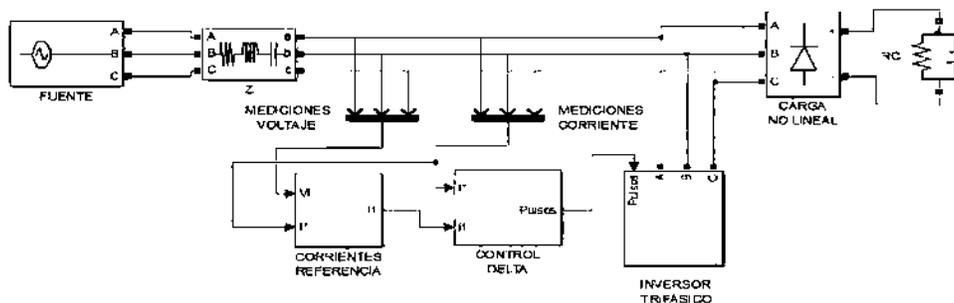


Figura 4.2.- Diagrama de Filtro activo de corriente utilizado.

El circuito de control también necesita las señales a la salida del filtro, por lo que es necesaria la adquisición de estas señales. En la etapa de control se realiza la comparación entre la señal a la salida del filtro y las señales de referencias, obteniéndose una señal de error que será utilizada por el controlador de histéresis para forzar a la corriente de salida a seguir el valor de la referencia, más adelante se explicará en detalle la operación de este lazo de control de corriente.

En la Figura 4.3 se describe la implementación del cálculo de las corrientes de referencia de filtrado, en donde, a la entrada se reciben las mediciones de los voltajes de la fuente y las corrientes de línea, después se procede a calcular las corrientes de referencia de filtrado $i^*_{\beta k}$, (donde $k = abc$) según las ecuaciones (3.1)-(3.21).

El cálculo de las corrientes de referencia se muestra en la Figura 4.3, donde a la entrada se reciben los valores de voltaje y corrientes medidos del sistema, valores a los que se les aplica la transformada de Clarke según las Ecuaciones (3.1) y (3.2), esto para realizar el cambio de marco de referencia del sistema, de un marco de referencia cambiante en el tiempo a un marco de referencia estacionario, es decir del marco de referencia abc a $\alpha\beta 0$. Los valores obtenidos de voltaje y corriente en el marco de referencia $\alpha\beta 0$ son enviados como vector a un bloque 1 y 2 respectivamente, los cuales a su vez son enviados al bloque 3, en donde se encontraran contenidos tanto los valores de voltaje así como los valores de corriente, esto para su posterior manipulación en el cálculo de los valores de las potencias. Tanto el bloque 1 y 2 los podemos encontrar en Simulink® de Matlab®.

En el bloque **Valpha2+Vbeta2** de la Figura 4.3 se realiza la suma de los cuadrados de los voltajes v_α y v_β , en tanto que en el bloque **PZero** se realiza el cálculo de la potencia instantánea p_0 la cual se obtiene en términos de la secuencia cero del sistema, potencia que en un sistema balanceado deberá ser igual a cero. En el bloque **Pinstantanea** se realiza el cálculo de p (*potencia instantánea real*), en tanto que en el bloque **Qreactiva instantanea** se realiza el cálculo de q (*potencia reactiva instantánea*) de acuerdo a la Ecuación (3.6), donde p_0, p y q son las potencias que el filtro activo debe inyectar para compensar el factor de potencia, las corrientes armónicas y/o el desbalance de fase, todo esto dentro del marco

de referencia $\alpha\beta 0$. Estos valores calculados son enviados al bloque 4 de la Figura 4.3, donde previamente se habían mandado a almacenar también los voltajes v_0 , v_α y v_β , necesarios para realizar el cálculo matemático de las corrientes de referencia.

En los bloques *Ialpha*, *Ibeta* e *IZero* se realiza el cálculo de las corrientes de referencia i_α , i_β e i_0 por medio de la Ecuación (3.7), dichos valores obtenidos son enviados al bloque 5 de la Figura 4.3. Los valores del bloque 5 de nueva cuenta son multiplexados y por medio del bloque de conversión $\alpha\beta 0$ -*abc*, de acuerdo a la Ecuación (3.21), nos permite regresar el sistema al marco de referencia inicial, es decir al marco de referencia *abc*.

Cabe destacar que este proceso de la obtención de las corrientes de filtrado se realiza de manera casi instantánea ya que el retraso de tiempo en la aplicación del filtro debe ser despreciable una vez que el sistema se encuentre en operación.

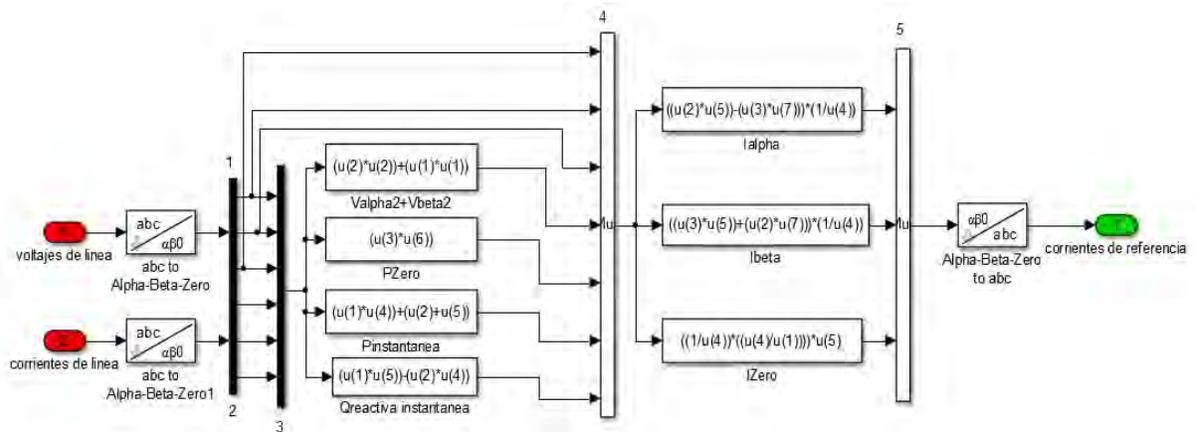


Figura 4.3.- Diagrama en Simulink® de Matlab® para cálculo de corrientes de referencia.

De tal forma que el proceso antes descrito permite la obtención de las corrientes de referencia de filtrado. Dichas corrientes tendrán que pasar por un proceso de control, que en esta tesis se optó por la utilización de la técnica de modulación delta o control por histéresis descrita en la sección 4.3.2.

4.3.2 Técnica de Modulación Delta o control por histéresis

Como se mencionó en el capítulo anterior, la técnica de modulación delta también llamada control por histéresis, es un control de conmutación donde la señal de referencia para el caso del filtrado activo, es una señal de corriente. Se define una banda de histéresis con unos límites inferiores y superiores donde se permite que la corriente de salida pueda variar.

Este controlador siempre actúa con saturación y con dos acciones de control de signos opuestos. Cada vez que el error de seguimiento de la referencia cambia de signo y supera el límite de la banda, la acción a tomar es la contraria a la que se venía realizando.

En la implementación de la técnica de modulación delta ilustrada en la Figura 4.4 se reciben a la entrada las corrientes de filtrado de referencia $i_{fk}^*(t)$, ($k = abc$) y las corrientes de línea del circuito $i_{lk}(t)$, ($k = abc$). El procedimiento consiste en que la corriente de filtrado de referencia de fase se resta a la corriente de línea, $i_f^*(t) - i_l(t)$, en cada instante de tiempo y la diferencia llega a la entrada de un relevador. En el relevador la diferencia se compara con los límites establecidos por el ancho de la ventana Δi como fue descrito en la sección 3.7; si esta diferencia sobrepasa el límite inferior de la señal de control para el transistor T_{A+} será $S_{T_{A+}}(t) = 0$ y esta salida en el mismo tiempo es la entrada a un negador que otorga la señal contraria para el transistor T_{A-} la cual será $S_{T_{A-}}(t) = 1$.

Estas señales de control se mantienen hasta que la diferencia $i_f^*(t) - i_l(t)$ viola el límite inferior de la ventana Δi , entonces la señal de control para el transistor T_{A+} cambia a encendido $S_{T_{A+}}(t) = 1$, una vez más esta señal es tomada por el negador que otorga la señal contraria al transistor T_{A-} indicando la no conducción de este, es decir, $S_{T_{A-}}(t) = 0$.

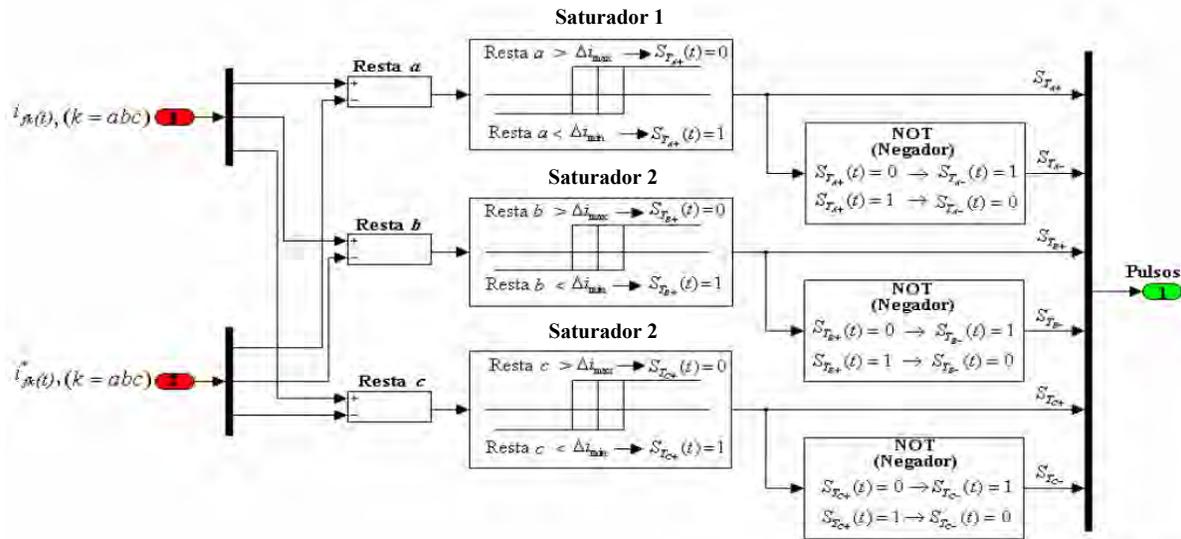


Figura 4.4.- Diagrama de Técnica de modulación delta.

4.3.3 Funcionamiento del Inversor Trifásico

La implementación de un inversor trifásico con activación y desactivación controlada por transistores de efecto de campo de metal mosfet (por sus siglas en inglés) en Simulink® de Matlab® se ilustra en la Figura 4.5. Debido a que estos dispositivos son controlados por voltaje la velocidad de conmutación es muy alta siendo los tiempos de conmutación del orden de los nanosegundos [Mohan *et al.*, 1995].

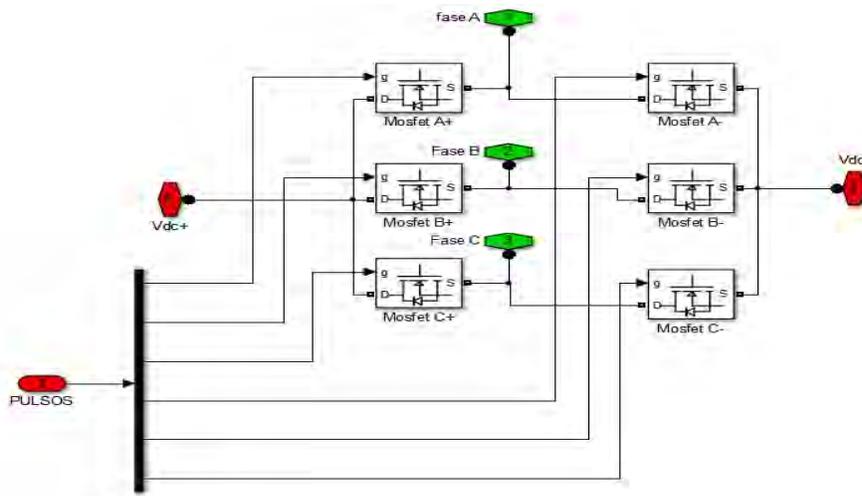


Figura 4.5.- Inversor Trifásico utilizado.

4.3.4 Circuitos Snubber

Los semiconductores presentan unos límites muy estrictos en cuanto a valores máximos de voltaje, corriente y potencia soportados, que si son superados podrían provocar la destrucción del dispositivo.

Cuando se diseña un circuito se debe tener especial cuidado en que sus componentes puedan resistir las más estrictas condiciones de trabajo, tanto durante su funcionamiento normal como ante determinadas acciones ajenas a la propia operación normal del circuito.

Los circuitos de ayuda a la conmutación conocidos comúnmente como “snubber” son una parte esencial en muchos de los circuitos electrónicos de potencia. Básicamente se pueden considerar como un conjunto de componentes (pasivos y/o activos) que se incorporan al circuito de potencia para reducir en el dispositivo semiconductor el estrés eléctrico durante la conmutación y asegurar un régimen de trabajo seguro.

De una manera más explícita, un circuito snubber controla las características eléctricas de operación del dispositivo mediante algunas de las siguientes estrategias [Mohan *et al.* 1995]:

1. Limitando los voltajes aplicados a los dispositivos durante las transitorios que ocurren en el apagado.
2. Limitando las corrientes de los dispositivos durante los transitorios que ocurren en el encendido.
3. Limitando la tasa de cambio de la corriente (di / dt) que fluye en el dispositivo durante el encendido.
4. Limitando la tasa de cambio del voltaje (dv / dt) en los dispositivos durante el apagado.
5. Guiando la trayectoria de conmutación del dispositivo durante encendido y apagado.

Desde la perspectiva de la topología del circuito, existen tres clases principales de circuitos snubber [Mohan *et al.* 1995]:

1. Circuito snubber $R-C$ no polarizado. Utilizados para proteger diodos y tiristores limitando el voltaje y (dv / dt) .
2. Circuito snubber $R-C$ polarizado. Son utilizados para guiar la trayectoria de conmutación durante el apagado de los interruptores controlables, para mantener el voltaje aplicado a los dispositivos en niveles seguros o para limitar (dv / dt) durante el apagado del dispositivo.
3. Circuitos snubber $R-L$. Estos son utilizados para guiar la trayectoria de conmutación de los interruptores controlables y/o para limitar (di / dt) durante el encendido.

Es importante enfatizar que los circuitos snubber no son una parte fundamental del convertidor de electrónica de potencia. El circuito snubber es una adición al convertidor básico que se añade para reducir o controlar las características de los interruptores controlables durante su operación, cuando esto es necesario.

4.4 Simulación de la Red Eléctrica Propuesta

En la Figura 4.6 se muestra la configuración del sistema fuente-rectificador sin filtros conectados. Los principales parámetros de éste se listan en la Tabla 4.2, donde $Z_s = R_s + L_s$.

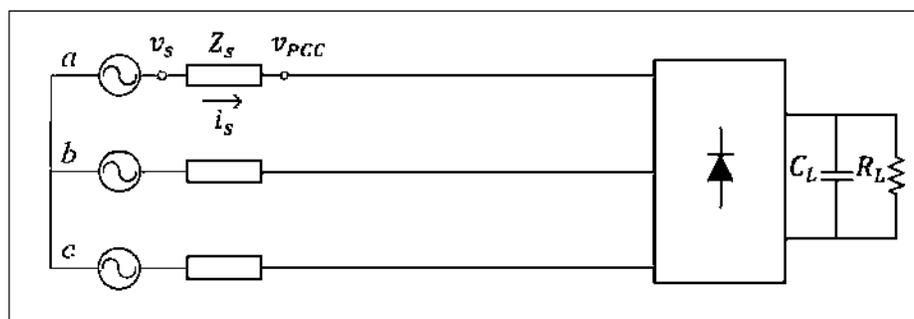


Figura 4.6.- Sistema Eléctrico sin filtros conectados.

Tabla 4.2.- Parámetros del sistema Eléctrico simulado.

v_s	$250V_{ff}$
L_s	5mH
R_s	0.25Ω
C_L	$220\mu F$
R_L	10Ω

En la Figura 4.7 se observa la señal del voltaje de la fase a medida en el PCC. En la Figura 4.8 se muestra la señal de la corriente de línea también de la fase a , que corresponde a la típica señal distorsionada a causa de un rectificador trifásico de 6 pulsos. Se puede observar que el voltaje V_{PCC} se ve afectado por los armónicos de la corriente i_s debido a la caída de voltaje no senoidal producida en la impedancia de línea. Debido a esto, el nivel de distorsión de dicho voltaje depende fuertemente de este parámetro de la red.

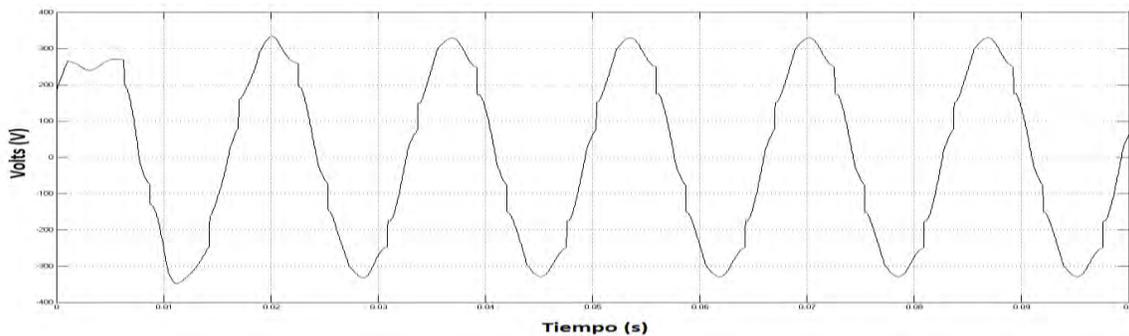


Figura 4.7.- Simulación del Sistema Eléctrico sin Filtros. Voltaje en el PCC.

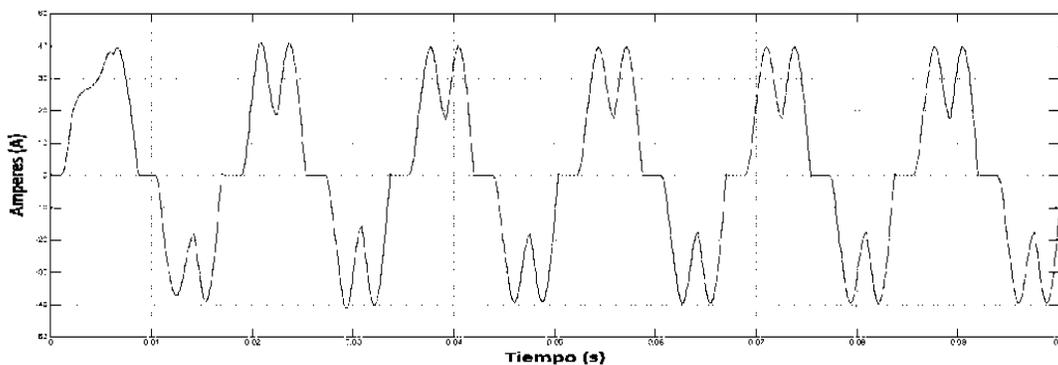


Figura 4.8.- Simulaciones del Sistema Eléctrico sin Filtros. Corriente de línea.

El contenido armónico y la distorsión armónica total (THD) de la corriente de línea y del voltaje en el PCC de la carga se muestran en las Figuras 4.9 y 4.10, respectivamente. Se puede apreciar una elevada magnitud del 5° y 7° armónico (de 35.07% y 7.26% para el caso de la corriente, así como de 16.06% y 11.48% para el voltaje respectivamente), así como la presencia de armónicos impares de orden superior y su elevado THD. En la corriente de línea se puede apreciar con mayor claridad el elevado valor de los armónicos, en tanto que en el voltaje el valor del THD es menor, dado que se consideró una baja impedancia de línea.

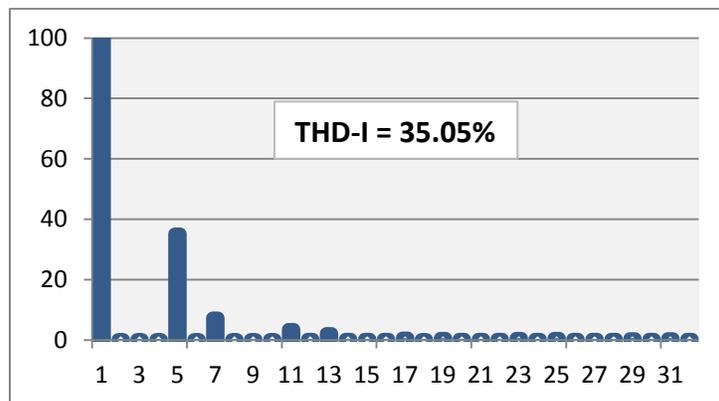


Figura 4.9.- Contenido armónico de i_s .

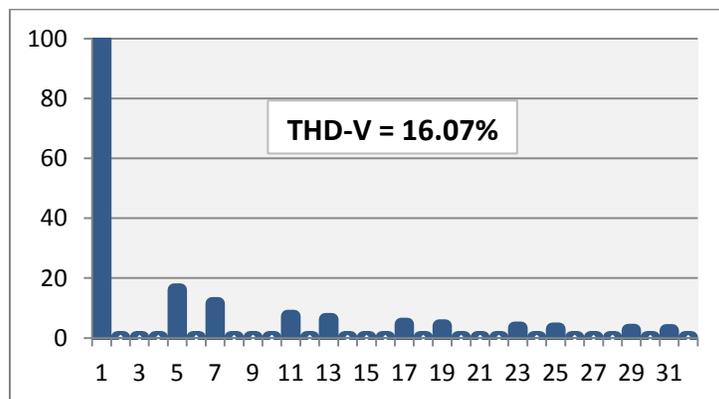


Figura 4.10.- Contenido armónico de v_{PCC} .

4.5 Simulación del Filtro Híbrido Propuesto

El objetivo de la configuración híbrida es que se tenga un mejor desempeño al momento de filtrado, aprovechando cada una de las ventajas que brindan los filtros pasivo y activo.

Una forma de elevar el desempeño es combinando la robustez y el rendimiento del filtro pasivo, con la controlabilidad y eficiencia del filtro activo.

De manera general, los filtros híbridos están pensados para que requieran poca potencia en su parte activa y mejoren las características de compensación de los filtros pasivos asociados a ellos, disminuyendo la posibilidad de resonancias entre la impedancia de red y el filtro pasivo [Gómez *et al.*, 2009]. Así, la configuración híbrida puede ser aplicada en cargas no lineales de gran potencia.

Las funciones de filtrado dependen, entre otras cosas, del dimensionamiento de potencia del filtro activo y del método de control empleado.

En la Figura 4.11 se muestra el filtro híbrido propuesto.

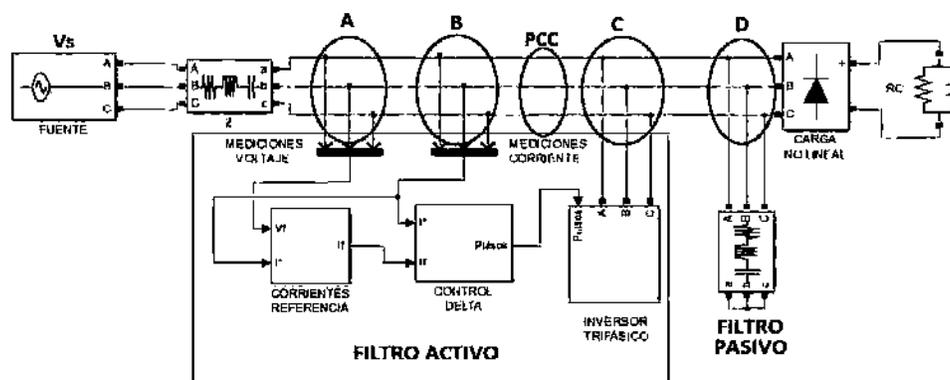


Figura 4.11.- Diagrama de Filtro Híbrido utilizado.

Una vez simulado el sistema eléctrico con el filtro híbrido ya en operación, tal como se muestra en el diagrama de la Figura 4.11, se realiza la medición de las señales de voltaje y corriente.

Para el caso de los voltajes, la medición se hace antes del PCC (punto D), así como después del mismo (punto A) de la Figura 4.11. En la Figura 4.12 se muestran las mediciones de voltaje realizadas en el punto A y D, donde se puede apreciar la diferencia que existe entre la Figura 4.12 a) y la Figura 4.12 b). En la Figura 4.12 a) se observa un alto contenido armónico con $TDH = 16\%$ mostrado en la Tabla 4.3 y medido en el punto D, en tanto que en la Figura 4.12 b) las señales de voltaje son prácticamente senoidales, con un contenido armónico bajo y un $THD = 0.3\%$ mostrado en la Tabla 4.3. Con lo cual se obtiene un resultado favorable al momento de operar el filtro híbrido.

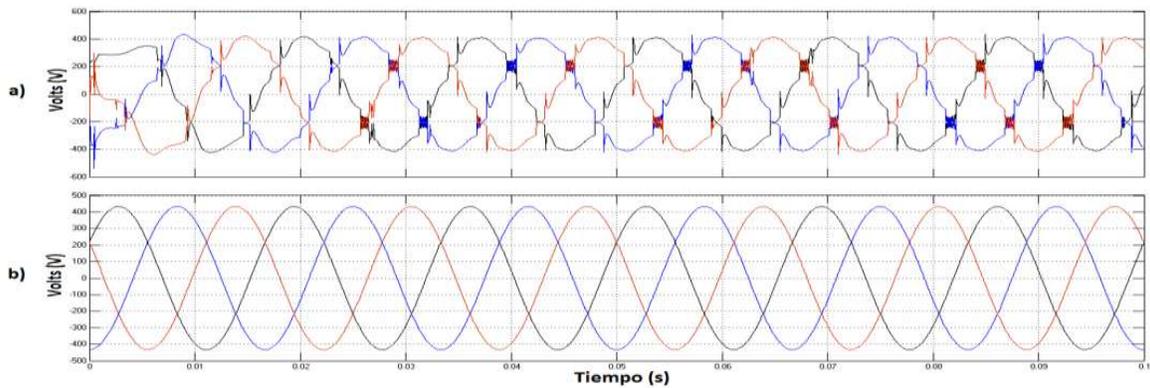


Figura 4.12.- Señales de Voltaje del sistema a) Punto D después del PCC, b) Punto A antes del PCC.

Tabla 4.3.- Mediciones de Voltaje (THD).

Medición	THD (%)
Punto A	16.07
Punto D	00.30

Para una mejor apreciación de la diferencia que existe entre las señales de voltaje antes del PCC y después del mismo. En la Figura 4.13 se realizó la medición de la fase a ; donde se aprecia de manera clara, la diferencia que existe en la señal del voltaje.

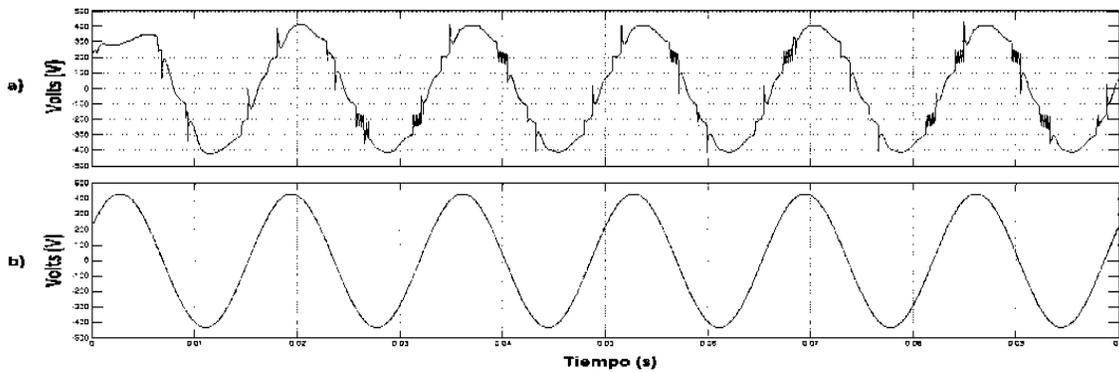


Figura 4.13.- Señal de voltaje de la fase *a*) Punto D después del PCC, b) Punto A antes del PCC.

En la Figura 4.14 se observan las señales de corriente de línea del sistema. En la Figura 4.14 a) se muestran las corrientes que circulan hacia la carga medidas en el punto D de la Figura 4.11, con un alto contenido armónico y un THD = 35.05% mostrado en la Tabla 4.4, en tanto que en la Figura 4.14 b) se muestran las corrientes de líneas de la red, prácticamente senoidales, con un THD = 0.7% también mostrado en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4.- Mediciones de corriente (THD)

Medición	THD (%)
Punto B	35.05
Punto D	00.70

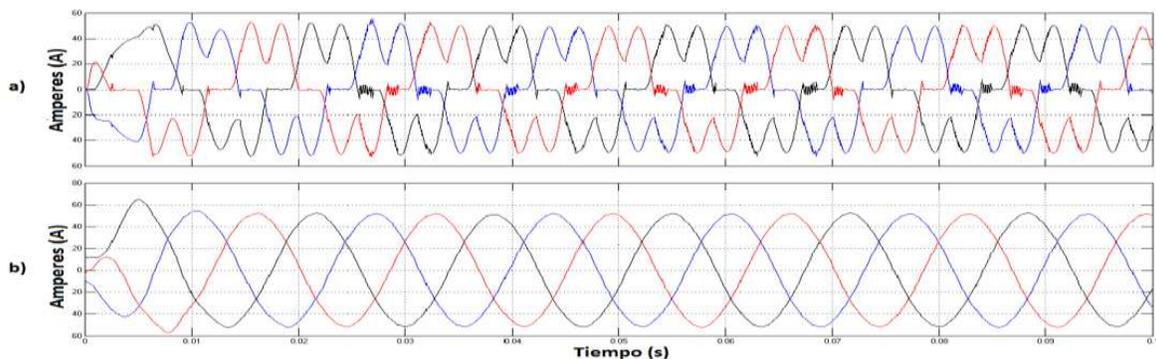


Figura 4.14.- Señales de corrientes de línea del sistema a) Punto D, corriente de la carga, b) Punto B, corriente hacia la red.

También para el caso de las corrientes de línea, en la Figura 4.15 se muestra la medición de la fase *a*, donde se puede apreciar mejor la diferencia que existe en la corriente de la carga y la corriente que va hacia la red.

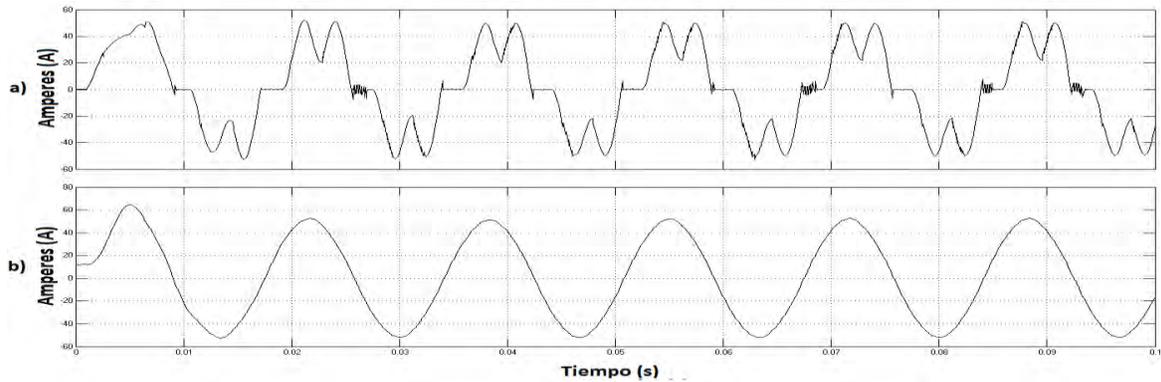


Figura 4.15.- Señal de corriente de línea de la fase *a*. a) Punto D, corriente de la carga, b) Punto A, corriente hacia la red.

En la Figura 4.16 se muestran las corriente de fase inyectadas por el filtro híbrido a la red, con las cuales se realiza la cancelación y/o mitigación de armónicos producidos por la carga no lineal. Estas corrientes de fase son la suma de la corriente absorbida por el filtro pasivo así como la compensada por el filtro activo.

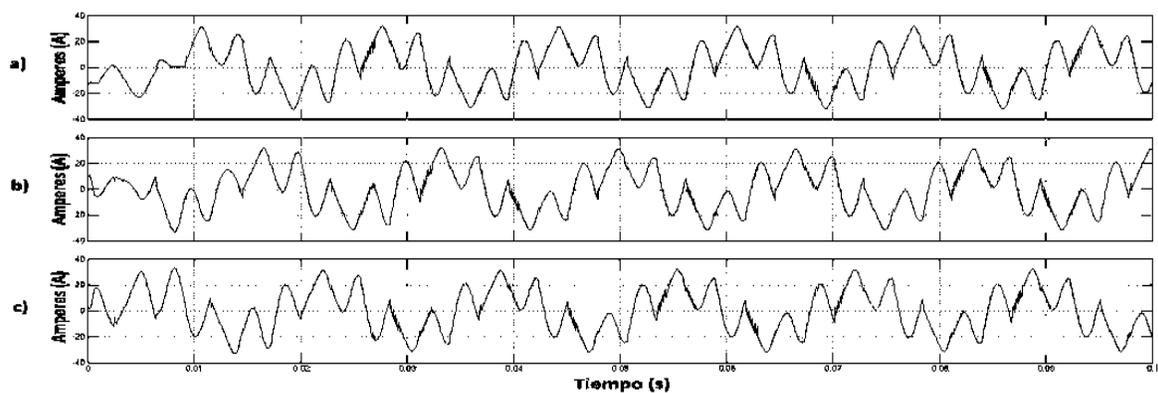


Figura 4.16.- Corrientes de filtrado inyectadas a la red, a) Fase *a*, b) Fase *b* y c) Fase *c*.

En la Figura 4.17 a) se muestran las formas de onda de corriente de la fase *a* inyectada a carga, en tanto que en la Figura 4.17 b) se muestra la corriente inyectada por el filtro

híbrido a la fase *a*. Esto con la finalidad de apreciar que la sumas de estas dos corrientes resulta en la cancelación de armónicos de línea.

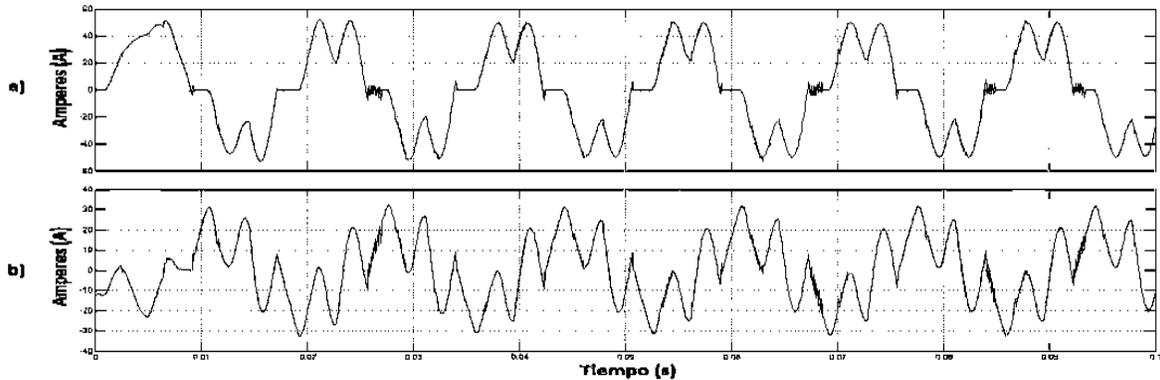


Figura 4.17.- a) Corriente de línea de la fase *a*, b) corriente inyectada hacia la fase *a*.

En la Figura 4.18 se muestran las corrientes armónicas absorbidas e inyectadas por el filtro híbrido, así como la suma de estas. En la Figura 4.18 a) se muestra la corriente absorbida por la parte pasiva del filtro híbrido, así como también se aprecia que es la que contribuye en mayor magnitud para la mitigación de armónicos. En la Figura 4.18 b) se aprecia la corriente inyectada por la parte activa del filtro híbrido, en donde se demuestra lo anterior, ya que la parte activa del filtro híbrido compensa las limitantes del filtro pasivo. En la Figura 4.18 c) se muestra la suma de corriente del filtro pasivo y el filtro activo; es decir, es la corriente generada por el filtro híbrido, corriente que es inyectada a la red para la mitigación de la distorsión armónica.

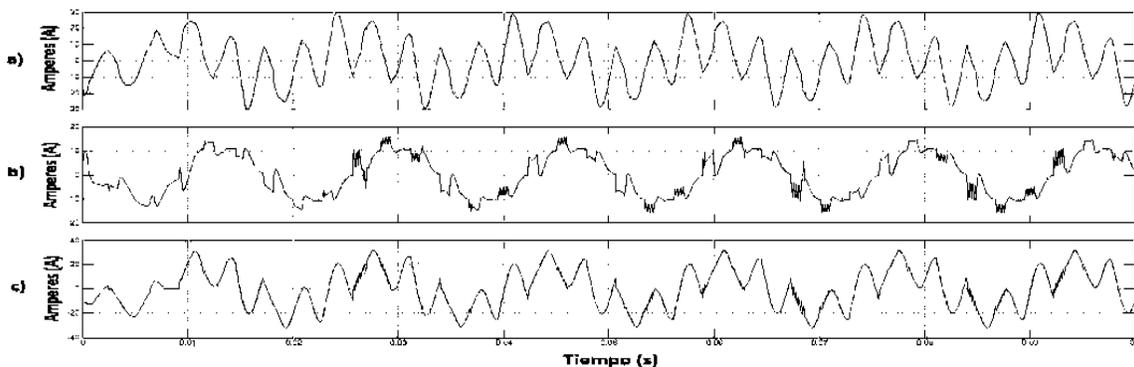


Figura 4.18.- Corriente a) absorbida por el filtro pasivo, b) generada por el filtro activo, c) inyectada por el filtro híbrido.

4.4 Conclusiones

En este capítulo se determinaron los valores requeridos para el filtro pasivo, necesarios para la adecuada mitigación de los armónicos de bajo orden (5° y 7°), pero mayores en cuanto a magnitud se refiere. También se aplicó el método de TPRI propuesto para el cálculo de las corrientes de filtrado de referencia.

Se analizó el proceso de diseño de un esquema de filtro híbrido aplicable sin necesitar de transformadores. También se mostró el desarrollo del método de compensación utilizado.

Se especificaron y describieron las cuatro etapas que conforman al filtro activo diseñado: adquisición de datos, generación de señales de referencia, etapa de control y etapa de potencia, respectivamente. Durante el desarrollo de dichas etapas se hizo el cambio de marcos de referencia, de abc a $\alpha\beta 0$, para poder realizar la generación de pulsos necesarios que puedan compensar los armónicos de la red mediante el sistema inversor trifásico de potencia.

Se analizaron las características del circuito de control para el filtro activo, el cual mide las corrientes de la fuente y de la carga para realizar compensaciones que permitan disminuir el contenido armónico inyectado a la red.

En general, la solución propuesta en este capítulo consistió en un filtro híbrido, formado por un filtro pasivo conectado en paralelo con un filtro activo; siendo el conjunto conectado en paralelo con la fuente de alimentación sin necesidad de un transformador adaptador. La función de esta topología es la de permitir que el filtro activo sea menos demandado en cuanto a potencia real se refiere, lo cual permite los elementos requeridos para este trabajo demanden menos dimensiones y costos.

La simulación realizada en el software Simulink® de Matlab®, permitió verificar la viabilidad y eficacia del filtro híbrido propuesto en el presente trabajo.

Capítulo 5 Conclusiones Generales y Trabajos Futuros

5.1 Conclusiones Generales

Como se planteó en el objetivo principal de esta tesis, se analizó y desarrolló un Filtro Híbrido Activo-Pasivo para la mitigación de distorsión armónica en redes eléctricas no lineales. Se propuso un procedimiento general para el cálculo de parámetros de un filtro pasivo, el diseño más adecuado del filtro activo, así como también se propuso un arreglo en particular para la obtención del filtro híbrido que permitió eliminar y/o mitigar satisfactoriamente la distorsión armónica inyectada a la red por medio de elementos conmutados.

Como resultado de la investigación realizada y reportada en esta tesis se han identificado las siguientes conclusiones generales:

- La inserción de cargas no lineales produce corrientes y voltajes de frecuencias diferentes a la del diseño original del sistema eléctrico, lo cual fluye a través de la red eléctrica afectando a dispositivos y equipo no diseñados para operar en condiciones diferentes a las del sistema.
- Se presentó el desarrollo de la Teoría de la Potencia Reactiva Instantánea (TPRI) como método de solución. Dicho método fue utilizado en la programación del filtro activo, mismo que se encuentra en paralelo con el filtro pasivo, el cual previamente fue calculado y analizado. Estos filtros en conjunto constituyen el filtro híbrido propuesto para la mitigación de armónicos generados por una carga no lineal.
- El filtro híbrido se ha presentado como una solución adecuada para compensar perturbaciones que tienen origen en la demanda eléctrica, pudiendo compensar, además de los armónicos generados por la carga, otras perturbaciones, tales como la

corrección del FP y la compensación de reactivos del sistema, lo cual resulta en que la corriente demandada difiera de su forma original.

- Se ha realizado un estudio de la presencia de la distorsión armónica y sus efectos adversos, los cuales son presentados y analizados en el Capítulo 4. También se presenta el análisis y desarrollo de los sistemas de filtrado activo y pasivo de forma individual.
- En esta tesis se ha incluido una revisión de los efectos de la resonancia paralela entre el filtro pasivo y la impedancia de red. Con estos fundamentos se ha hecho el análisis de un filtro híbrido de corriente, integrado por un filtro pasivo y un filtro activo en paralelo.
- En la topología híbrida, la parte activa no realiza directamente el filtrado armónico sino que mejora las características del filtrado pasivo; por lo que se demostró que la corriente armónica en los filtros pasivos aumenta mientras disminuye en la red eléctrica.
- En esta tesis se ha propuesto un método eficiente para la mitigación de corrientes armónicas predominantes en una red eléctrica, en donde la simulación se realizó en un sistema de potencia trifásico con cargas no lineales utilizando el software Simulink® de Matlab®.
- El funcionamiento del filtro híbrido propuesto fue comprobado mediante simulaciones, donde, por medio de las señales obtenidas se muestra la corrección y/o eliminación de armónicos individuales y THD de corriente y voltaje.
- La contribución que presenta esta tesis es una mejora en la calidad de la energía, por medio de la propuesta de un filtro híbrido para la mitigación selectiva de armónicos inyectados a la red por una carga trifásica no lineal.

5.2 Trabajos Futuros

Tomado como referencia la investigación reportada en esta tesis, se propone proseguir en las siguientes vertientes de investigación:

- Aplicar el método de filtrado híbrido propuesto para la supresión de armónicos en sistemas eléctricos con cargas no lineales diversas, tales como hornos de arco eléctrico, entre otras.
- Otro punto que no fue considerado y que se podría implementar sería la mejora del factor de potencia y la corrección de desbalance de cargas, aunque esto haría que la potencia nominal del filtro fuera mayor y por lo tanto podría repercutir negativamente en su costo.
- Desarrollo de filtros activos de potencia multinivel.
- Estudio, análisis y compensación de componentes inter-armónicos
- Análisis y desarrollo de otras teorías para la determinación de las corrientes de referencia, tales como el Método del Marco de Referencia Síncrono, Marco de Referencia *abc* Basado en Componentes Simétricas, Potencia Reactiva Instantánea basada en Componentes Simétricas, entre otras.
- Desarrollo experimental del modelo propuesto de filtrado híbrido activo pasivo con el control de la Teoría de Potencia Reactiva Instantánea (TPRI) analizada en esta tesis.
- Usar otras técnicas de control así como otras topologías.
- Análisis y simulación de la operación dinámica del filtro híbrido en tiempo real.

Referencias

[Arrillaga *et al.*, 2001]

J. Arrillaga, N. R. Watson, S. Chen., “*Power System Quality Assesment*” Wiley. Inglaterra 2001.

[Arrillaga y Watson, 2003]

J. Arrillaga, N.R. Watson , “*Power System Harmonics*”, Second Edition, 2003
John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-470-85129-5

[Akagi *et al.*, 1983]

Akagi, Kanazawa y Nabae. “*Genaralized Theory of the Instantaneous reactive Power in Three-Phase Circuits*”. IPEC’ 83-Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983; p. 1375-1386.

[Akagi *et al.*, 1986]

H. Akagi, Y. Kanazawa, y A. Nabae, “*Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Device Without Energy Storage Components*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.22 No.6, Septiembre/Octubre 1986, Págs. 1082-1090.

[Akagi *et al.*, 1986]

Akagi, H., Nabae, A., Atoh, S., “*Control Strategy of Active Power Filters Using Multiple Voltage-Source PWM Converters*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol IA-22, No. 3, 1986.

[Akagi, 1994]

Akagi, H., “*Trends in active power line conditioners*”. IEEE, Transactions on Power Electronics, Vol. 9, No. 3, May 1994 Pag. 263-268.

[Candela, 2009]

José Ignacio Candela García, “*Aportaciones al filtrado híbrido paralelo en redes trifásicas de cuatro hilos*”, Barcelona junio del 2009.

[Casaravilla *et al.*, 2002]

G. Casaravilla, A. Salvia, C. Briozzo and E. Watanabe. “*Control strategies of selective harmonic current shunt active filter*” IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 149, No. 2, December 2002.

[Chen *et al.*, 1996]

P. T. Cheng, S. Bhattacharya, and D. M. Divan, “*Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications,*” in Proceedings IEEE APEC’96, 1996, pp. 911-917.

[Depenbrock, 1962]

M. Depenbrock. “*Untersuchungen über die Spannungs- und Leistungsverhältnisse bei Umrichtern ohne Energiespeicher*”. Ph.D. thesis. Tech. Univ. Hannover. Hannover, Germany. 1962.

[Dugan *et al.*, 1999]

Dugan, R.C., Brooks, D.L., McDermott, T.E., Sundaram, A., “*Using voltage sag and interruption indices in distribution planning*” Winter Meeting 1999, Vol. 2, Jan-Feb, pp. 1164-1169.

[Erlicki y Eigeles, 1968]

M. S. Erlicki and A. Emanuel Eigeles, “*New Aspects of Power Factor Improvements Part I Theoretical Basis*” IEEE Transactions on Industry and General Applications, vol. IGA 4, 1968, July/August, pp. 441–446.

[Fang *et al.*, 2001]

Fang Zhuo, Yue-Wang, Zhao'an-Wang. “*The configuration of main circuit and control strategy for active power filter in three-phase four-wire system*”. IEEE 32 Annual Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC. 2001, Vol. 3, June 2001, Pag. 1615-1618.

[Grady y Santoso, 2001]

Grady, W. M., Santoso, S., “*Understanding Power System Harmonics*”. IEEE Power Engineering Review, 21(11), 8-11.

[Grady, 2000]

Prof. Mack Grady, University of Texas at Austin, “*Understanding Power System Harmonics*”, September 2000.

[Gyugyi y Strycula, 1976]

L. Gyugyi, E. Strycula, “*Active AC Power Filters*”. Conference Record of IEEE-IAS Annual Meeting, 1976, pp. 529-535.

[Hayafume *et al.*, 1984]

K. Hayafume, T. Ueshiba, E. Masada, Y. Ogiwara, “*Microcomputer Controlled Active Power Filter*”. Proceedings of the IEEE IECON’84, 1984, pp. 1221-1226.

[IEEE Standard 519-1992]

IEEE standard 18–2002, *IEEE Standard for Shunt Power Capacitors*, IEEE 1992.

[Jaakkola, 2001]

Jaakkola, “*Puesta a punto para una mejor calidad de la energía. Filtros del tercer armónico*”. Revista ABB, 2001, Marzo.

[Longatt, 2004]

Gonzalez Longatt, F.M., “*Entendiendo la Transformación de Park*”. Junio 2004.

[Mohan *et al.*, 1977]

N. Mohan, H. A. Peterson, W. F. Long, G. R. Dreifuerst, J. J. Vithayathil, “*Active Filters for AC Harmonic Suppression*”, Proc. of the IEEE-PES Winter Meeting, paper A77026-8, Enero 1977.

[Mohan *et al.* 1995]

Ned Mohan, Tore M. Undeland y William P. Robbins, “*Power Electronics*” John Wiley & Sons, 1995.

[Peng y Lai, 1996]

Fang Zheng Peng y Jih-Sheng Lai. “*Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems*”. En: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 45, No. 1 (feb. 1996); p. 293-297.

[Peng, 1998]

Peng, F. Z., “*Application issues of active power filters*”. Industry Applications Magazine, IEEE, 4(5), 21-30, 1998.

[Plata y Tacca, 2003]

E. A. Cano Plata y H. E. Tacca. “*Definición de la Potencia Trifásica con la Transformada WAVELET. Parte I: Base Matemática*” IEEE Latin America Transactions, vol. 1, no. 1, October 2003.

[Román, 1995]

M. Román. “*Filtros activos de potencia para la cancelación de armónicos*”. II Seminario Anual de Automática y Electrónica Industrial. SAAEI 95, Universitat Rovira i Virgili (Tarragona).1995.

[Román, 2006]

M. Román. “*Filtros Activos de Potencia para la Compensación Instantánea de Armónicos y Energía Reactiva*”. Universitat Politècnica de Catalunya 2006.

[Saetieo *et al.*, 1995]

S. Saetieo, R. Devaraj, D. A. Torrey, “*The Design, Implementation of a Three-Phase Active Power Filter Based on Sliding Mode Control*”. IEEE Transactions on Industry Applications, September/October 1995, Vol. 31, pp. 993-1000.

[Singh y Haddad, 1999]

Bhim Singh, Kamala-Haddad, “*A review of active filters for power quality improvement*”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 5, October 1999, Pag. 960-971.

[Torrey *et al.*, 1995]

D. A. Torrey, A. M. A. M. Al-Zamel, “*Single-Phase Active Power Filters for Multiple Nonlinear Loads*”. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, May 1995, pp. 263-272.

[Kousou *et al.*, 2008]

A. Kousou, B. S. Khaldi, M. O. Mahmoudi and M. S. Boucherit. “*Shunt Active Power filter Apparent Power For Design Process*” *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008 IEEE*.

[Wang *et al.*, 2001]

Wang, Z., Wang, Q., Yao, W., Liu, J. “*A series active power filter adopting hybrid control approach*”. Power Electronics, IEEE Transactions on, 16(3), 301-310.

[Willems, 1992]

Jacques L. Willems, “*A new interpretation of Akagi-Nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations*”. En: IEEE Transactions on instrumentation and measurement, Vol. 41, No. 4, 1992 P: 523-527.