



POSGRADOS

MAESTRÍA EN

ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

RPC-SO-30-No.507-2019

OPCIÓN DE
TITULACIÓN:

PROYECTOS DE DESARROLLO

TEMA:

CONTROL DIRECTO DE TENSIÓN PARA UN FILTRO
ACTIVO DE POTENCIA PARALELO MONOFÁSICO

AUTOR:

JORGE LEONARDO TEPAN VELE

DIRECTOR:

JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO

CUENCA - ECUADOR
2022

Autor:



Jorge Leonardo Tapan Vele.

Ingeniero Eléctrico

Candidato a Magíster en Electrónica y Automatización,
Mención en Informática Industrial por la Universidad
Politécnica Salesiana - Sede Cuenca.

jtepanv@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



José Manuel Aller Castro.

Ingeniero Electricista

Doctor Ingeniero Industrial (Programa Sistemas de Energía
Eléctrica).

jaller@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

JORGE LEONARDO TEPAN VELE.

***CONTROL DIRECTO DE TENSIÓN PARA UN FILTRO
ACTIVO DE POTENCIA PARALELO MONOFÁSICO***

Índice general

Índice de Figuras	V
Índice de Tablas	VII
Resumen	VIII
Abstract	VIII
1. Introducción	1
1.1. Descripción general del problema	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Contribuciones	4
2. Filtros activos de potencia	5
2.1. Estado del Arte	7
2.2. Principios de operación	10
2.2.1. Características de los armónicos	12
2.2.2. Características de la compensación armónica	14
2.3. Configuraciones del filtro activo de potencia	16
2.3.1. Filtros de potencia en serie	16
2.3.2. Filtros de potencia en paralelo	18
2.4. Estrategias de control	20
2.4.1. Método de Potencia Reactiva Instantánea p-q	20
2.4.2. Método de Lógica Difusa	22
2.4.3. Método de Filtrado Selectivo	23
3. FAP propuesto con estrategia de control	25
3.1. Estrategia de control y requerimiento de sensores	26
3.2. Esquema de control con reducción de sensores/variables medidas	28
3.3. Modelado en Simulink	30
3.3.1. Bloque principal - FAP	31
3.3.2. Etapa de medición y control	31

3.3.3. Visualización de resultados	33
4. Resultados y discusión	35
4.1. Resultados de simulación del FAP	36
4.1.1. Simulación sin FAP	36
4.1.2. Simulación con FAP	36
4.1.3. Resumen de resultados	38
4.2. Pruebas de simulación con diferentes cargas	39
4.3. Comparación de resultados	41
4.3.1. Comparación de resultados con los basados en la teoría de potencia reactiva instantánea	41
4.3.2. Comparación de resultados con los basados en el control directo de corriente.	43
5. Conclusiones	47
5.1. Conclusiones	48

Índice de Figuras

2.1. Circuito equivalente monofásico de un FAP paralelo.	11
2.2. Circuito equivalente monofásico de un FAP serie	12
2.3. Principio de compensación de la componente de armónicos mediante el filtro activo en paralelo.	12
2.4. Esquema de un SAPF	16
2.5. Diagrama de bloques de un SAPF	17
2.6. Diagrama de bloques de un SSAPF.	18
2.7. Topología inversora VSI, modelo con cuatro ramas.	19
2.8. Determinación de la corriente no activa de la carga mediante el método p-q.	20
2.9. Transformación de un sistema de referencia de fases (a-b-c) a un sistema de coordenadas $\alpha\beta$	21
2.10. Rectificador Boost con PWM.	22
2.11. Diagrama de bloques del sensor de corriente operando como una fuente de corriente sinusoidal.	23
2.12. Celda básica con un filtro selectivo.	24
3.1. Requerimiento de sensores FAP monofásico.	26
3.2. Modelo simplificado de una línea de transmisión	27
3.3. Modelo para un FAP conectado a la línea eléctrica	28
3.4. Esquema de FAP para control de tensión de salida del inversor	29
3.5. Esquema en base a la potencia del FAP	30
3.6. Modelado del bloque principal en Simulink	31
3.7. Modelado del FAP	32
3.8. Etapa de medición y control del FAP	32
3.9. Sensado y calculo de V_{SW}	33
3.10. Calculo de V_{ref}	33
3.11. Visualización de resultados	34
4.1. Tensión V_g y corriente de carga no lineal i_L	37
4.2. Potencia reactiva en la carga Q_L , Potencia reactiva en la línea Q_g	37

4.3. Potencia reactiva en la carga Q_L , Potencia reactiva en el FAP Q_F , Potencia reactiva en la línea Q_g	38
4.4. Potencia activa en la carga P_L , Potencia activa en el FAP P_F , Potencia activa en la línea P_g	39
4.5. Corriente de carga y tensión de generación [Ukande et al., 2015]	42
4.6. Corriente de carga no lineal i_L y tensión V_g	42
4.7. Corriente de carga y tensión de generación [Rahmani et al., 2005]	45
4.8. Corriente de carga no lineal i_L y tensión V_g	45
4.9. Potencia reactiva en la carga Q_L , Potencia reactiva en el FAP Q_F , Potencia reactiva en la línea Q_g	46

Índice de Tablas

4.1. Parámetros de simulación.	36
4.2. Resultados de simulación.	39
4.3. Parámetros de simulación caso 1.	40
4.4. Resultados de simulación caso 1	40
4.5. Parámetros de simulación caso 2.	40
4.6. Resultados de simulación caso 2	40
4.7. Parámetros de comparación teoría P-Q	41
4.8. Resultados de comparación 1	43
4.9. Parámetros de comparación corriente directa	44
4.10. Resultados de comparación 2	45

Resumen

En el siguiente trabajo se presenta un método para el control de armónicos existentes en la red de distribución eléctrica, basado en la utilización de filtros activos de potencia en paralelo. En el cual se mencionan las fuentes de los armónicos, su afección a la red y la solución mediante el desarrollo de un controlador. El esquema de control para contrarrestar el efecto de los armónicos se desarrolla en base a las ecuaciones de flujos de potencia a través de un inductor, que se usan en el modelado de líneas eléctricas de transmisión. A lo largo del trabajo se presenta el desarrollo del algoritmo, esquema de control y su posterior análisis de resultados con cargas no lineales.

En el desarrollo del trabajo se propone el estudio e implementación de un lazo de control para el FAP monofásico, que utilice directamente la tensión de salida del inversor como variable de control, disminuyendo la complejidad matemática del algoritmo de control. Como ventaja adicional el esquema utilizará menor cantidad de sensores que otros controles reportados, siendo de mayor interés para aplicaciones monofásicas de baja potencia.

Palabras claves; Filtro activo de potencia, Compensación de potencia reactiva, Cargas no lineales, Control de tensión del inversor, Simulación en Matlab.

Abstract

The following paper presents a method for the control of harmonics present in the electrical distribution network based on the use of shunt active power filters, in which the sources are mentioned of harmonics, their effect on the network and the solution through the development of a controller. The control scheme to counteract the effect of harmonics is developed based on the equations of power flow through an inductor used in the modeling of electric transmission lines. Throughout the work, the development of the algorithm, control scheme and its subsequent analysis of results with nonlinear loads is presented. with nonlinear loads.

In this work it is propose the study and implementation of a control loop for the single-phase FAP, which directly uses the inverter output voltage as the control variable, reducing the mathematical complexity of the control algorithm. As an additional advantage, the scheme would use fewer sensors than other reported controls, being of greater interest for low power single-phase applications.

Keywords; Active power filter, Reactive power compensation, Non-linear loads, Inverter voltage control, Matlab simulation.

Capítulo 1

Introducción

Las redes eléctricas que dan servicio a los usuarios son de corriente alterna, a niveles de voltaje, según sea el requerimiento de cada abonado. La forma de onda de esta corriente alterna, es en teoría del tipo sinusoidal, en la cual la amplitud y frecuencia son constantes. La existencia en dichas redes de cargas no lineales, producidas por elementos como: hornos de arco, lámparas fluorescentes, controladores de velocidad, rectificadores con diodos o tiristores, afectan a la forma de onda sinusoidal, ocasionan problemas en el funcionamiento de equipos, tanto de los usuarios, como de la empresa proveedora del servicio eléctrico.

La proliferación de las cargas no lineales han hecho que la forma de onda de voltaje y corriente presenten distorsiones con respecto a la señal sinusoidal. Dicha distorsión de la onda se debe a la aparición de corrientes armónicas en los sistemas eléctricos de potencia (SEP). Las corrientes distorsionadas son la suma de las ondas fundamentales con sus armónicas cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia de la onda fundamental y como resultado se tiene la onda distorsionada que al transmitirse por la red eléctrica producen armónicas en las ondas voltaje y corriente en el sistema eléctrico de potencia, con lo que se ocasionan varios efectos, entre ellos: sobrecalentamiento de transformadores, cables y motores, que pueden reducir su vida útil y ocasionar problemas de operación en equipos electrónicos sensibles.

En el transcurso del tiempo se han venido planteando varios métodos a fin de reducir los armónicos en el sistema. El primero se relaciona con el acondicionamiento de la carga. En este caso se adecúan los equipos a fin de ser menos sensibles a las perturbaciones eléctricas. El segundo método se refiere al acondicionamiento de la línea, el cual elimina las distorsiones de la red eléctrica. Este caso hace referencia a los filtros activos y pasivos conectados a la red con una configuración en serie o paralelo. Los filtros

pasivos se han utilizado con mayor frecuencia en la limitación de los flujos de corriente armónica en el sistema de distribución, pero su rendimiento esta limitado a pocos armónicos los cuales pueden introducir resonancia en el SEP [Roger, 1996]. Los componentes del filtro pasivo en una configuración LC consisten en una combinación de una reactancia capacitiva e inductiva cuyo propósito es reducir las corrientes armónicas y como resultado se mejora el factor de potencia de la carga (FP). El mismo que tiene un papel importante en los requisitos de calidad de energía, donde un valor elevado de FP, cercano a la unidad, garantiza una buena calidad de servicio hacia los consumidores. Por el contrario valores bajos de FP indican problemas técnicos relacionados con un mayor consumo de corriente, incremento en las caídas de tensión y por consiguiente una mayor probabilidad de interrupción del servicio [El-Sadek, 2002].

El principio del filtro activo de potencia ha sido investigado desde el año 1970 [Patel et al., 2015], cuyo principio se basa en la electrónica de potencia a través de sus componentes activas como son los transistores y diodos, que sumados a nuevos métodos de procesamiento digital de señales han facilitado el desarrollo de varias estrategias de compensación en el diseño de filtros activos de potencia. Una de las funciones de un filtro activo es generar corrientes o voltajes que anulen los competentes armónicos de la red para que se tenga una forma de onda sinusoidal. Estos se pueden conectar en serie, paralelo o con filtros pasivos para conformar un filtro híbrido. El funcionamiento de un FAP en paralelo se basa en un convertidor PWM conectado a la carga en un punto de acoplamiento común (PCC) y su función es la generación de corrientes de compensación desfasados 180° con respecto a la componente distorsionada de la corriente de carga [Akagi, 1994]. Este tipo de filtros tienen una mayor complejidad en su diseño, pero como resultado se obtiene una alta precisión en la corrección del factor de potencia.

Dentro de los métodos de compensación existe un factor diferencial que describe la detección de los armónicos y las técnicas de control. Esto se puede clasificar dependiendo del dominio donde se desarrolla el modelo matemático [Grady et al., 1990], o bien en el dominio del tiempo en las cuales se resalta la teoría de potencia instantánea (teoría P-Q), armónico individual síncrono (dq-frame) e integradores y variantes generalizados. Por el dominio de la frecuencia se tiene la transformada discreta de Fourier (DFT), transformada rápida de Fourier (FFT) y la transformada de Fourier discreta cursiva (RDFT).

1.1. Descripción general del problema

Las cargas no lineales ocasionan la superposición a la onda sinusoidal componentes armónicas, cuyas frecuencias son múltiplos de la onda fundamental. Esta deformación de la onda fundamental, ocasiona problemas de funcionamiento en los equipos de la red, produciendo picos indeseados de potencia y un aumento de temperatura y reducción de la vida útil de los dispositivos electromecánicos y relés.

Para contrarrestar los efectos negativos de las armónicas, tradicionalmente se utilizaron filtros pasivos debido a su costo y fácil implementación. Sin embargo, las características dinámicas de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), exigen también respuestas dinámicas. Es así como nace la necesidad de los filtros activos de potencia (FAP) que se adaptan a los cambios operativos de la red, para contrarrestar los efectos nocivos de los armónicos.

En la actualidad la disponibilidad de opciones cada vez más económicas para las etapas que componen un FAP, llevan a plantear el estudio e implementación de un esquema de control basado directamente en la tensión entregada por un inversor con fuente de voltaje (VSI), el cual sería de menor complejidad matemática y requeriría de menor cantidad de sensores para operar. Una implementación más simple del FAP puede llevar a un diseño más compacto y económico, lo cual permitiría extender su universo de aplicación a sistemas domiciliarios monofásicos de baja potencia, tales como refrigeradoras, unidades de aires acondicionado, etc., minimizando la cantidad de potencia reactiva y el contenido armónico de la corriente vista por la línea eléctrica.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de control basado en la tensión de salida del VSI que permita la eliminación de la potencia reactiva introducida a la línea eléctrica por cargas no lineales.

1.2.2. Objetivos específicos

- Estudiar las expresiones de potencia activa y reactiva en un sistema eléctrico con FAP monofásico para sentar las bases que permitan generar una propuesta de control.
- Desarrollar e implementar los algoritmos que permitan el control del FAP, sensando la menor cantidad de variables posibles.

- Comparar los resultados obtenidos con aquellos reportados por otros autores basados en la teoría de potencia reactiva instantánea y los basados en el control directo de corriente.

1.3. Contribuciones

Los FAP se han venido empleando en instalaciones de potencia trifásicas desde hace varias décadas, aportando mejoras sustanciales a la calidad de la onda de corriente y al valor del factor de potencia. En la actualidad la disponibilidad de opciones cada vez más económicas para las etapas que componen un FAP, llevan a plantearse el estudio e implementación de un esquema de control basado directamente en la tensión entregada por el VSI, el cual sería de menor complejidad matemática y requeriría de menor cantidad de sensores para operar. Una implementación más simple del FAP puede llevar a un diseño más compacto y económico, lo cual permitiría extender su universo de aplicación a sistemas domiciliarios monofásicos de baja potencia, tales como refrigeradoras, unidades de aires acondicionado, etc., minimizando la cantidad de potencia reactiva y el contenido armónico de la corriente vista por la línea eléctrica.

Capítulo 2

Filtros activos de potencia

A lo largo de este capítulo se explican las características más relevantes con respecto a los filtros activos de potencia, partiendo de un análisis bibliográfico extenso a través de las diferentes herramientas de búsqueda científica. Se analizan los principios de operación de los filtros activos, ejemplificando los circuitos equivalentes de los APF, los cuales contienen las pautas necesarias para ejemplificar cualquier operación o expresión matemática que se busca evaluar en este trabajo.

A lo largo de este capítulo se demostrará que los filtros de potencia tienen una clasificación de acuerdo a su topología, donde todos los autores revisados coinciden en este criterio, los filtros de potencia serán analizados como elementos de filtración de armónicos en paralelo y en serie a una fuente con un respecto a una carga, donde su principio de funcionamiento y compensación armónica será ejemplificado y generalizado.

En este capítulo también se describen las características que presentan los armónicos en una red o en un determinado sistema eléctrico de potencia (SEP) y como estos armónicos degradan la energía suministrada o entregada a una carga que puede ser lineal o no lineal. Esto permitirá evaluar de manera eficiente el problema de los armónicos y su relación con un APF, para esto se considera el tipo de estudio que buscara evaluar en el dominio de la frecuencia o el tiempo, para el caso de este trabajo se buscará enfatizar el comportamiento de los APF en el dominio del tiempo.

Se puntualizará mediante un análisis bibliográfico, cómo la compensación armónica mejora el comportamiento de una red frente a los armónicos inyectados por diversas razones, donde mediante la clasificación de los APF comúnmente por su topología se conoce el comportamiento de un APF bien sea en su conexión serie o paralelo, todo esto amparado mediante diagramas de bloques o circuitos equivalentes, para finalmente conocer su

comportamiento.

Finalmente se investigan y analizan las diferentes estrategias de control que existen para los APF, respecto a su topología sea serie o paralelo, los cuales son un elemento esencial en la búsqueda de entender, analizar y evaluar un APF, evidentemente se describen las diferentes estrategias de control y como pueden posicionarse respecto a un determinado problema, asociado a la distorsión armónica.

2.1. Estado del Arte

El criterio de calidad de la potencia [Dugan et al., 1996] ha alcanzado actualmente una relevancia exponencial debido a la abundancia de receptores fundamentados en la electrónica de potencia. Este modelo de cargas electrónicas de índole no lineal admite un control conveniente de la energía eléctrica, pero aumentan de sobremanera los niveles de distorsión armónica, en suma, suelen ser especialmente sensibles a dicha distorsión [De La Rosa, 2006].

El nivel de distorsión que producen las cargas electrónicas ha sobrepasado las capacidades técnicas de las soluciones convencionales, principalmente constituidos por elementos pasivos, que entre otras consecuencias ocasionan inestabilidades y fenómenos de resonancia. La aplicación de filtros activos de potencia (FAP) ha posibilitado encontrar soluciones viables a esta problemática [Martinek et al., 2019].

H.Sasaki y T.Machida en [Sasaki and Machida, 1971], propusieron por primera vez la aplicación de APF para eliminar la corriente armónica de corriente alterna (CA), así los armónicos anormales y normales podían tratarse de manera eficaz. Desde entonces los estudios entorno a los filtros activos y sus aplicaciones han ido incrementando, teniendo mayor relevancia con el avance de la electrónica de potencia, los FAP se encargan de eliminar armónicos en la red, regular la tensión terminal, suprimir el flicker en la tensión y mejorar el equilibrio de tensión en sistemas trifásicos. Esta amplia gama de objetivos se logra individualmente o en combinación, dependiendo de los requisitos, estrategia de control y configuración.

Los esquemas básicos para la conexión de un FAP son la conexión en serie y en paralelo. El acoplamiento en paralelo se desempeña como una fuente de control y abastecimiento de la intensidad de compensación que suprime los elementos armónicos de la demanda. En la conexión serie se realiza como una fuente controlada de tensión que compensa los armónicos de tensión introducidos por la carga [Salam et al., 2006]. Ambas conexiones tienen la finalidad de mejorar la calidad de energía. En la literatura existen varios métodos de mejorar la no linealidad de cargas monofásicas y trifásicas mediante la aplicación de FAP, algunas de ellas se indican a continuación:

- H. Akagi en [Akagi, 1994], presenta tendencias de un FAP que utilizan inversores de modulación por ancho de pulso (PWM), prestando atención a sus aplicaciones prácticas. Realiza un estudio de la eficacia de un FAP en paralelo y en serie para prácticas en sistemas industriales en Japón en un cicloconvertidor de gran capacidad para accionamientos de acerías y en un horno de arco.
- V. Bhavaraju y P. Enjeti en [Bhavaraju and Enjeti, 1992], proponen un FAP para equilibrar cargas desequilibradas, donde utiliza una topología de convertidor trifásico de modulación por ancho de pulsos (PWM) de CA a CC. Así, se logra el objetivo de equilibrar cargas desequilibradas que varían constantemente.
- Z. Honghao y otros en [Zhong et al., 2004], proponen un nuevo esquema de control basado en la transformación dq por fase, para un filtro de potencia activo híbrido en serie con una configuración trifásica de cuatro hilos, con canal de derivación de corriente fundamental pasiva.
- S. Bhattacharya y D. Subhashish Divan en [Bhattacharya and Divan, 1995], proponen un controlador fundado en un marco de referencia síncrono para un sistema de filtro activo de serie híbrida. Se diseñó, construyó e instaló un sistema de filtro activo de serie híbrida en la estación de bombeo Beverly en la empresa eléctrica de Nueva Inglaterra para una carga de transmisión de velocidad ajustable de 765 kVA para cumplir con los estándares de armónicos recomendados por IEEE 519.
- C. Lin y otros en [Lin et al., 1995], analizan y simulan la estrategia de operación y control del filtro híbrido, se evidencia que la aplicación combinada de los filtros de potencia activa y pasiva y coordinando adecuadamente sus operaciones, para los armónicos formados por la carga no lineal. Los componentes de la frecuencia variable se compensan con la fluctuación de la potencia activa y los componentes de la frecuencia con el fusible mediante las fluctuaciones de la potencia pasiva. Esto proporciona una buena compensación armónica en todo el rango de operación para el armónico de frecuencia que varía irregularmente. Además, esta disposición suprime las resonancias en paralelo y en serie.

- J. Choi y otros en [Choi et al., 1995], presentan un sistema de fuente de alimentación de reserva / filtro de potencia activa (SPS / FAP). Este sistema proporciona funciones combinadas de respaldo de energía de alta eficiencia y eliminación de armónicos dañinos. Basado en el convertidor bilateral que utiliza el esquema de conmutación forzada de corriente, la corriente de línea se puede regular sinusoidalmente con un factor de potencia unitario en el modo FAP y la distorsión de la forma de onda de voltaje se puede mantener en valores reducidos en el modo SPS mediante el control instantáneo de voltaje.
- L. Corradini y otros en [Corradini et al., 2008], investigan técnicas de muestreo múltiple aplicadas al control de corriente en aplicaciones de APF. Utilizando arreglos de puertas programables en campo y convertidores Análogo / Digital rápidos para la implementación del control, es posible minimizar los retrasos computacionales y el retraso relacionado con el muestreo de modulación de ancho de pulso digital (DPWM).
- D. Nora y otros en [Daou et al., 2019], propone un filtro de potencia activa HFAP híbrido, combinando un filtro paralelo y un filtro pasivo controlado por un estrategia de algoritmo de retroceso. Esta estrategia de control se compara con otros dos métodos, el control PI clásico y el control lógico difuso para verificar la efectividad y el nivel de simetría del controlador de retroceso propuesto para el HFAP.

Los esquemas de control utilizados en el trabajo de M. Dawande [Dawande et al., 1996] muestran que cuando se hace una compensación rápida con eficientes técnicas de control para mejorar la eficiencia de los convertidores electrónicos. Otros investigadores como Siyuan Zhou [Zhou and Rincon-Mora, 2006] y Redl, R [Redl and Sun, 2009] han centrado su atención en el estudio de convertidores eléctricos y la aplicación de la técnicas de control para reducir el rizado de la variable reguladora, como el voltaje a la salida, obtener mejor factor de potencia y mejorar la distorsión armónica total en las señales de voltaje y corriente. Entre las estrategias de control utilizadas en convertidores electrónicos de potencia presentadas se encuentran: el control por modos deslizantes publicado por Mahdavi [Mahdavi et al., 1997], control por rampa expuesto en el trabajo por Khosravi [Khosravi et al., 2019], modulación por ancho de pulso centrado PWMC presentado por Henglin Chen [Chen and Zhao, 2016], aplicaciones de la estrategia ZAD con el propósito de hacer cero la media del error publicado por E. J. Revelo Fuelagán [Revelo Fuelagán, 2009].

En la actualidad, la idea de calidad de potencia ha comenzado a ser relevante dentro del medio de la Ingeniería Eléctrica. Se ha convertido en un aspecto significativo para satisfacer la demanda con seguridad y confiabilidad [Pérez Litrán et al., 2011].

2.2. Principios de operación

Un filtro activo es una fuente de tensión o de corriente variable que se conecta directamente o a través de un transformador de acoplamiento al sistema eléctrico de potencia (SEP). En aplicaciones prácticas las fuentes de tensión o de corriente se enlazan a través inversores que trabajan como sistema de control en lazo cerrado con el propósito de introducir la tensión o corriente que se ha fijado por medio de una referencia [Cárdenas et al., 2005]. En las Figura 2.1 y 2.2 se aprecia el circuito equivalente simplificado de un FAP paralelo y un FAP serie, respectivamente.

La conexión en paralelo actúa como una fuente de control y suministro de la intensidad de compensación que suprime las componentes armónicas de la carga. En la conexión serie se realiza como una fuente controlada de tensión que compensa los armónicos de tensión inyectados por la carga. Los filtros activos en conexión paralelo son muy comunes y compensan cargas que generan armónicos de intensidad, como rectificadores controlados con una carga fuertemente inductiva o rectificadores PWM, con una gran inductancia en el lado de continua, empleados en algunas aplicaciones de control de máquinas eléctricas. Por lo tanto, el FAP conectado en serie se enlaza a la demanda por medio de un transformador de acoplamiento y se emplea la compensación de armónicos de rectificadores de diodos haciendo la reducción de armónicos de tensión en la carga y regulación de tensión [Sánchez Herrera et al., 2007].

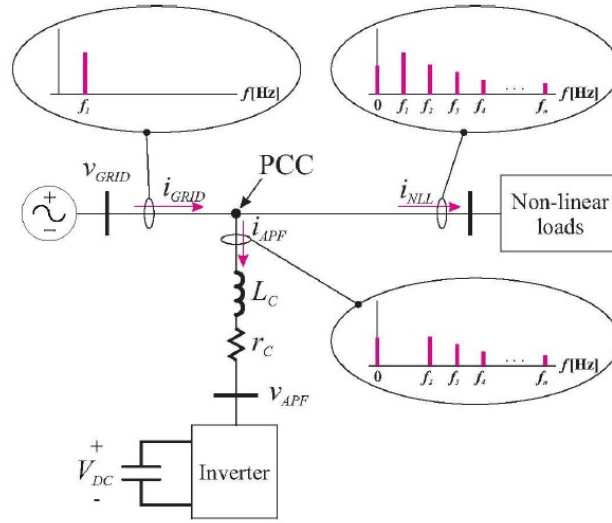


Figura 2.1: Circuito equivalente monofásico de un FAP paralelo.

Donde:

- V_{GRID} es la tensión en la red eléctrica.
- i_{GRID} corriente de la red.
- i_{NLL} corriente de carga no lineal.
- $f_1, f_2, f_3, f_4, \dots, f_n$ armónicos en el espectro de frecuencia de la corriente.
- V_{APF} tensión del filtro activo de potencia.
- i_{APF} corriente del filtro activo de potencia.
- L_c y r_c impedancia de acoplamiento.
- V_{DC} tensión de la fuente del inversor.

En la Figura 2.3 se presenta el principio de operación de un APF en paralelo, donde el dispositivo debe inyectar una corriente armónica en contrafase con la existente en la carga. Por lo tanto, la suma algebraica de corriente en el punto A de la Figura 2.3 asegura que la corriente entregada por la fuente sea una señal sinusoidal pura.

Donde:

- V_{GRID} es la tensión en la red eléctrica.
- Pcc punto de acoplamiento común.

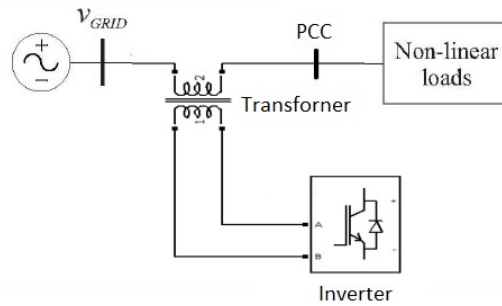


Figura 2.2: Circuito equivalente monofásico de un FAP serie

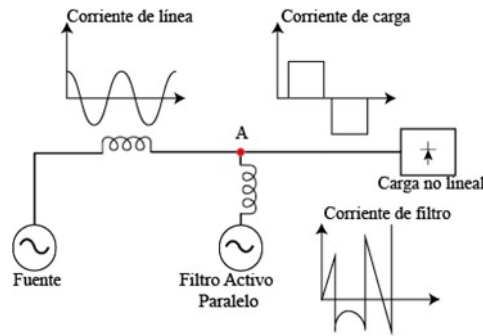


Figura 2.3: Principio de compensación de la componente de armónicos mediante el filtro activo en paralelo.

2.2.1. Características de los armónicos

Los armónicos son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente del SEP, debido a la utilización de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos y en general, al uso de equipos que necesiten ejecutar conmutaciones en su operación natural. Estos últimos son conocidos como convertidores y su amplia utilización en aplicaciones industriales y sistemas de transmisión/distribución agrava la problemática [Reyes et al., 2003].

En [Strojny, 1983], se explica que la presencia de armónicos en la red ocasiona problemas operativos, algunos de estos son:

- Fallo del banco de condensadores por avería dieléctrica o sobrecarga de potencia reactiva.
- Interferencia con el control de ondulación y los sistemas portadores

de la línea eléctrica, lo que producen un mal funcionamiento de los sistemas que realizan conmutación remota, control de carga y medición.

- Pérdidas por encima de los valores nominales y calentamiento en las máquinas síncronas y de inducción.
- Sobretensiones y corrientes por encima de los valores nominales en el sistema desde resonancia a tensiones o corrientes armónicas en la red.

Estos problemas dependen de la fuente de armónicos, su ubicación en el sistema eléctrico y las características de la red que promueven la propagación de armónicos. Además, con el avance de la tecnología se ha logrado determinar las principales fuentes de armónicos, estas son:

- Medidas de conservación de energía, como aquellas para mejorar la eficiencia del motor y la adaptación de carga, que emplean dispositivos semiconductores de potencia y conmutación para su operación. Estos dispositivos suelen producir formas de onda de corriente y voltaje irregulares que son ricas en armónicos.
- Dispositivos de control del motor, como controles de velocidad para tracción.
- Conversión y transmisión de energía de corriente continua de alto voltaje.
- Interconexión de convertidores de energía eólica y solar con sistemas de distribución.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva que han reemplazado en gran medida a los condensadores síncronos como fuentes de reactivos continuamente variables.
- El desarrollo y el uso potencialmente amplio de vehículos eléctricos que requieren una cantidad significativa de rectificación de energía para cargar las baterías.

Para el estudio de estos problemas se quiere de un análisis armónico que tiene como objetivo predecir la distorsión armónica en una o más localizaciones del sistema eléctrico [Grady et al., 1990]. Además, ayuda a estimar el efecto de una nueva carga no lineal o de la instalación de un filtro de armónico. Existen, dos metodologías para el análisis armónico:

- Estudio en el dominio temporal: El sistema es modelado en detalle, después de lo cual se realiza un estudio del dominio temporal que reproducen las ondas reales. Las componentes armónicas se obtienen aplicando la transformada de Fourier a las formas de onda.

- Estudio en el dominio de la frecuencia: Se realiza un modelo de sistema separado para cada componente de frecuencia considerada en el estudio. Cada modelo de frecuencia es relativamente única debido a que ya que solo necesita ser válido para esa frecuencia específica. Los modelos resultantes son los mismos que se utilizan para el análisis de frecuencia fundamental que resulta en tensiones y corrientes complejas [Tripathi et al., 2016].

La principal dificultad se presenta al momento de elegir los valores de impedancia. En especial, para componentes de alta frecuencia, se requieren diferentes modelos porque las diversas corrientes capacitivas se vuelven importantes. Sin embargo, los métodos de cálculo siguen siendo los mismos. En [Watson and Arrillaga, 2003], se introducen detalles adicionales acerca del estudio del dominio de la frecuencia. La exigencia de las normas de armónicos [Xu et al., 1995] obliga a las fábricas y establecimientos a controlar la cantidad de armónicos que inyectan en el SEP.

2.2.2. Características de la compensación armónica

En la actualidad los armónicos es un parámetro significativo que requiere compensación en los sistemas eléctricos. Los armónicos en el sistema de potencia pueden resultar de dispositivos de compensación de potencia reactiva que generan por sí mismos una medida notable de armónicos. La compensación de armónicos de voltaje [Grady et al., 1990] no se estudia normalmente porque en general las fuentes de alimentación tienen baja impedancia. El voltaje terminal en el PCC se mantiene comúnmente dentro de los límites normales de caída de voltaje y distorsión armónica total. Este problema suele ser relevante para usuarios sensibles al voltaje armónico, dispositivos que requieren que la alimentación sea puramente sinusoidal, como los dispositivos de protección del sistema de potencia.

Por otro lado, en [Koozehkanani et al., 1996] se explica que el problema relacionado con los armónicos de corriente es más considerable en aplicaciones de baja y media potencia. La compensación de armónicos de corriente reduce en gran medida la cantidad de distorsión en la tensión en el punto de acoplamiento común, debido a que las compensaciones de armónicos de tensión y corriente están interrelacionadas.

Es posible emplear múltiples compensaciones para mejorar la eficacia de los filtros activos. Las corrientes armónicas y la potencia reactiva son las mejores opciones para conservar la corriente de alimentación completamente libre de armónicos y en fase con la tensión de alimentación [Grady et al., 1990]. Idealmente, se debería utilizar un compensador para filtrar todo, lo

que sería una gran ventaja desde el punto de vista de la flexibilidad. Sin embargo, la capacidad de potencia del compensador se vería mermada. Además, es posible filtrar armónicos en corriente y en voltaje junto con la una compensación reactiva, el desafío en este punto sería encontrar el punto óptimo de compensación. En [Ruiz-Tipán et al., 2020] se presenta una metodología para solventar este inconveniente.

Para reducir los problemas de armónicos, las empresas de servicios públicos están haciendo cumplir cada vez más los estándares internacionales de armónicos para clientes industriales. A través de una revisión literaria, se ha determinado que las técnicas de mitigación de armónicos rara vez se realizan debido al costo adicional para el consumidor. Por lo tanto, se requiere una táctica de control rentable para suprimir y, si es posible, eliminar los efectos armónicos en el sistema. Se ha propuesto varias técnicas de mitigación de armónicos para reducir el efecto de la magnitud de los armónicos que se muestran a continuación:

- Filtros pasivos: Aumentan el factor de potencia, reducen los armónicos de alta frecuencia, pero son de gran tamaño. Si no se utilizan reactores de sintonización, puede producirse inestabilidad debido a la resonancia en paralelo con la inductancia de la fuente. El rendimiento depende de la impedancia de la fuente, que comúnmente no se obtiene con exactitud y puede variar con los cambios del sistema [Dugan et al., 1996].
- Filtros Activos: Mejoran el factor de potencia, permiten controlar la corriente de salida, proporcionan un funcionamiento estable frente a las variaciones de impedancia de la fuente de CA y una solución breve indistintamente del orden y la magnitud del armónico. Las corrientes de inyección pueden fluir hacia otros componentes del sistema. El costo suele ser más elevado que los filtros pasivos [Singh et al., 1999].
- Técnica de mitigación de armónicos con PWM: Esta técnica es capaz de obtener reducciones de armónicos menores al 1% de la fundamental. Además, se puede programar para eliminar armónicos específicos.

Para evitar efectos indeseables de los armónicos debido a su interferencia indebida con el SEP, se pueden implementar técnicas de compensación (filtros) tanto pasivas como activas. Los filtros pasivos tienen el inconveniente de un tamaño voluminoso, envejecimiento

de los componentes, resonancia y rendimiento de compensación fija. Éstos proporcionan una compensación excesiva o insuficiente de los armónicos, siempre que se produzca un cambio de carga [Ametani, 1976]. Por lo tanto, se prefiere la compensación APF, a la compensación pasiva. Los APF son una solución actualizada para los problemas de calidad de la energía, que permiten la compensación de los armónicos y el desequilibrio de corriente junto con la mejora del factor de potencia

2.3. Configuraciones del filtro activo de potencia

En términos generales los filtros activos de potencia (APFs) tienen dos tipos de configuraciones genéricas, las que poseen una configuración en serie a la fuente y a la carga no lineal y aquellos que están en paralelo a los elementos descritos anteriormente, siendo esta clasificación topológica la que se busca analizar en esta sección, sin embargo también los APFs pueden ser clasificados de acuerdo al número de fases, en general siendo monofásicos o trifásicos, considerando el número de conductores del sistema [Hashim et al., 2016].

2.3.1. Filtros de potencia en serie

Para la configuración del APF en serie (SAPF) a la carga, se parte de una topología bastante sencilla como se observa en la Figura 2.4. Básicamente el filtro está conformado por un convertidor y puede tener un filtro de salida que comúnmente suelen ser del tipo inductivo (L) o inductivo - capacitivo (LC), con la característica relevante que el filtro está conectado en serie entre la alimentación y la carga [Hashim et al., 2016].

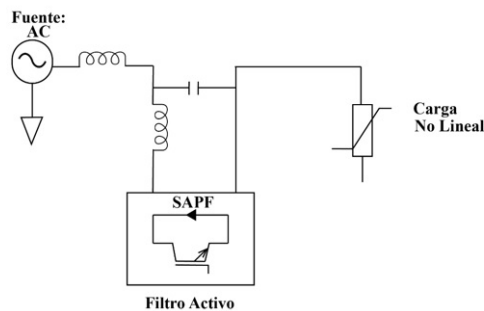


Figura 2.4: Esquema de un SAPF

Los SAPF son utilizados para el filtrado de armónicos de corriente y la compensación de distorsión de tensión, como son las caídas de tensión, flickers o parpadeos y tensiones trifásicas desequilibradas, comúnmente en sistemas de distribución a niveles de baja y media tensión [Swain et al., 2016]. El SAPF tiene la función de eliminar la incidencia armónica de tensión ocasionada por la carga, funcionando como un escudo frente a las distorsiones armónicas que puedan ingresar a la alimentación a la entrada del filtro, que generalmente se traduce con la presencia de armónicos en el generador, los cuales evidentemente disminuyen el rendimiento de este y la potencia que pueda entregar a una determinada carga.

Como se observa en la Figura 2.4, estos dispositivos introducen una impedancia propia del filtro, puesto que la conexión de este filtro se realiza mediante un transformador de acoplamiento, lo que se traduce en impedancias adicionales que incrementan las pérdidas activas que pueda tener el sistema sometida al SAPF [Swain et al., 2016]. Por este motivo, es necesario incluir un sistema de control al sistema que permita la conmutación “inteligente” del filtro, como se observa en el diagrama de bloques de la Figura 2.5.

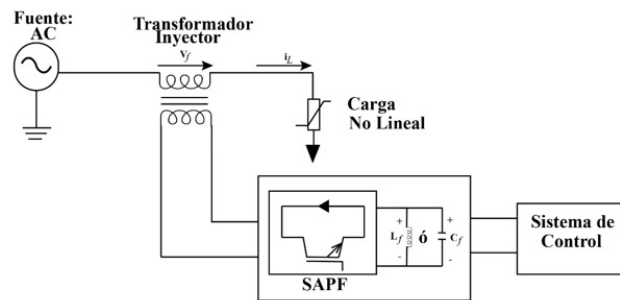


Figura 2.5: Diagrama de bloques de un SAPF

El SAPF como tal compensa los problemas de tensión de alimentación, inyectando tensión en serie a la línea para un lograr un barrido de los armónicos y obtener una tensión libre de distorsiones armónicas en los terminales de carga, partiendo de esto se puede modelar un SAPF mediante una diferencia de tensión entre la tensión medida en la carga y la tensión suministrado, obteniéndose como resultado la tensión inyectada en serie, como se observa en la siguiente expresión [Chen et al., 2019]:

$$\Delta V_{SAPF} = V_{inj} = V_c - V_s \quad (2.1)$$

Donde:

- ΔV_{SAPF} variación de tensión entre la carga y la tensión suministrada.
- V_{inj} tensión inyectada en serie.
- V_c tensión en la carga.
- V_s tensión suministrada.

2.3.2. Filtros de potencia en paralelo

Por otra parte, los filtros activos de potencia en paralelo (SSAPF), su objetivo es compensar el factor de potencia y las corrientes no activas en una red. Este tipo de filtros posee una estructura característica compuesta por el enlace de corriente, dispositivo electrónico de potencia, almacenamiento de energía, acondicionamiento de la señal y su controlador característico, como se observa en la Figura 2.6. Únicamente el dispositivo controlador puede ser un método programable [Büyük et al., 2017].

Cada uno de los elementos del SSAPF tiene una finalidad, como el enlace de corriente donde su función es operar como una conexión que permite la transferencia de energía entre la red y el convertidor de potencia, donde la magnitud de rizado de la corriente de inyección dependerá de esta variable. Por otra parte, el convertidor es un dispositivo de conmutación que permite controlar el Flujo de Potencia (PF), entre el elemento almacenador de energía del filtro y la red. Es decir, tienen un comportamiento similar a un interruptor bidireccional [Büyük et al., 2017].

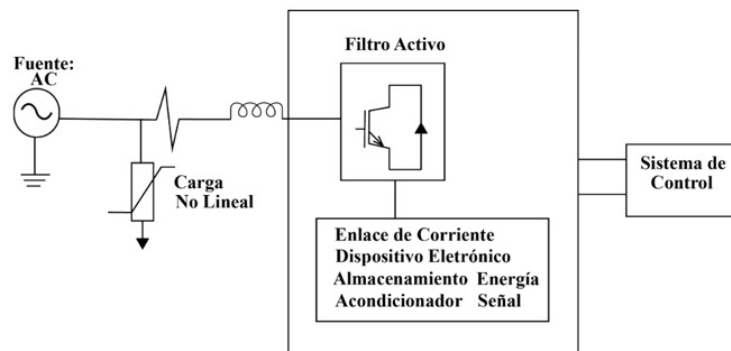


Figura 2.6: Diagrama de bloques de un SSAPF.

Por otra parte, el controlador debe realizar la función de garantizar el proceso de compensación del FP, realizando el cálculo de las corrientes de

referencia para el control de las corrientes de inyección, garantizando que los niveles de energía en el elemento almacenador es el adecuado para su correcta operación, asegurando una óptima interacción entre las señales de conmutación de los dispositivos semiconductores del convertidor y el sistema, mediante el acondicionamiento de la señal [Büyük et al., 2017].

Los SSAPF, generalmente suelen ser estructurados en esquemas de tipo medio puente que pueden ser diseñados como fuentes de corriente (CSI) o como fuentes de tensión (VSI). De forma similar se pueden clasificar los filtros en paralelo de acuerdo al número de conductores, en configuración monofásico o trifásica [Mane and Namboothiripad, 2017].

Como se mencionó en párrafos anteriores los sistemas SSAPF pueden ser compensados cuando se tratan de sistemas de cuatro conductores, en los cuales se busca compensar a través de una cuarta rama el conductor neutro como se muestra en la Figura 2.7. Sin embargo, en estos sistemas cuando se inyecta componentes de secuencia cero, debido a la división de la alimentación puede provocar un desbalance en el sistema, porque la alimentación es desequilibrada y por lo tanto la corriente homopolar causa este desequilibrio [Devassy and Singh, 2017].

En ciertas ocasiones, debido al desequilibrio ocasionado por este tipo de configuración en su alimentación se puede utilizar topologías de dos a cuatros inversores monofásico en paralelo por línea para compensar el desequilibrio en las fases.

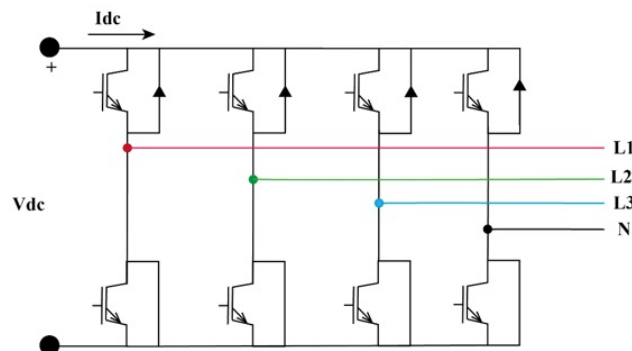


Figura 2.7: Topología inversora VSI, modelo con cuatro ramas.

2.4. Estrategias de control

2.4.1. Método de Potencia Reactiva Instantánea p-q

En los años 80 se formuló la teoría de “Potencia Instantánea” con la deducción desarrollada por Akagi [Akagi, 1994]. Inicialmente esta teoría dedujo una eficacia muy alta para los sistemas de potencia de tres hilos, pero no produce los mismos resultados para los sistemas de potencia de 4 hilos [Cárdenas et al., 2005].

En la Figura 2.8 se detalla el modelo general del método de potencia reactiva instantánea para un sistema de potencia de 3 hilos. La idea principal de este método es el cálculo de la potencia instantánea consumida por la carga.

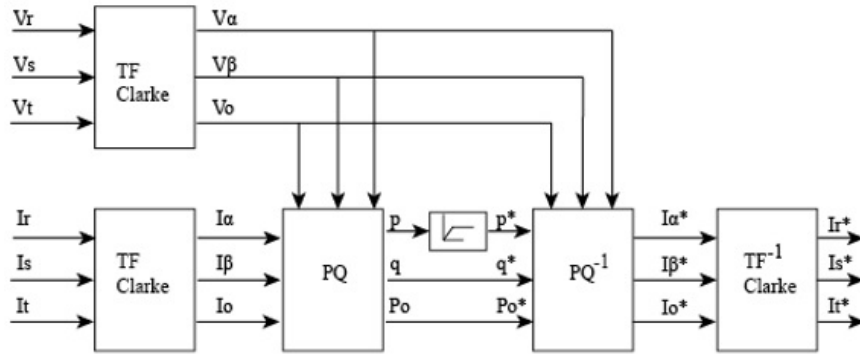


Figura 2.8: Determinación de la corriente no activa de la carga mediante el método p-q.

Dicha teoría también está fundamentada en la transformación de coordenadas de Clarke a partir de las coordenadas de fase, como se describe en la Figura 2.9. [Pérez Litrán et al., 2011].

La obtención matemática de esta teoría se define mediante un vector de tensiones e intensidades como se observa en la siguiente expresión:

$$V = [V_a \ V_b \ V_c]^T \quad i = [i_a \ i_b \ i_c]^T \quad (2.2)$$

Donde:

- V_a, V_b, V_c son las tensiones en las fases a, b y c.
- i_a, i_b, i_c son las corrientes en las fases a, b y c.

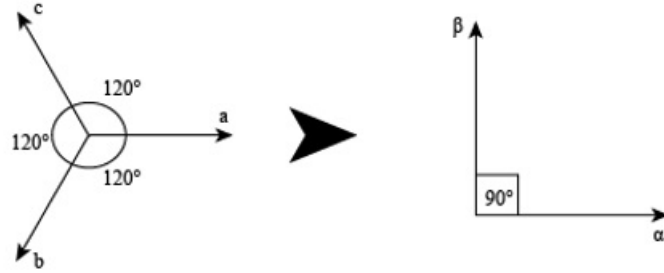


Figura 2.9: Transformación de un sistema de referencia de fases (a-b-c) a un sistema de coordenadas $\alpha\beta$

Para determinar la potencia real instantánea con el nuevo sistema de coordenadas $\alpha - \beta$, se usa la siguiente expresión:

$$p = V_{\alpha}i_{\alpha} + V_{\beta}i_{\beta} \quad (2.3)$$

La potencia imaginaria en el sistema de coordenadas se define en la expresión:

$$q = V_{\alpha}i_{\beta} + V_{\beta}i_{\alpha} \quad (2.4)$$

Al momento de realizar el cálculo correspondiente, se determina un voltaje de alimentación ideal el cual es de muy baja distorsión y a su vez se encuentra balanceado. Se recalca que en la mayor parte de los casos que se han verificado mediante este método se han obtenido resultados muy lejanos a los asumidos, sin embargo algunos investigadores ponen en duda estos resultados y los discuten en [Huang and Wu, 1999], donde se propone un método de solución que consiste en el cálculo de las corrientes principales y la cantidad de corriente suministrada por el convertidor.

La fase determinada proviene de los voltajes principales conjuntamente con las corrientes balanceadas bajo ciertas condiciones de inestabilidad en la tensión de entrada [Chang and Chen, 2006]. De esta forma solo falta obtener la amplitud de la corriente. Esta magnitud puede ser obtenida por medio de la regulación de voltaje en el bus de DC. Todo esto bajo la premisa de que la potencia real suministrada por la fuente principal es igual a la potencia real demandada por la carga y el resto es compensado por el APF.

2.4.2. Método de Lógica Difusa

La idea principal de esta estrategia de control es la utilización de un módulo PWM (Modulador por Ancho de Pulsos), el cual permite compensar cargas desbalanceadas y a su vez el factor de potencia que se maneja en el sistema, utilizando esta estrategia se evita el cálculo de armónicos y potencia reactiva del sistema el cual tenía por objetivo buscar la compensación adecuada para un correcto funcionamiento [Malesani et al., 1998]. El trabajo fundamental del rectificador es actuar sobre las corrientes principales y hacer que las señales de onda sean forzosamente sinusoidales balanceadas y en fase con el voltaje principal del sistema. En la Figura 2.10 se especifica el esquema de conexión con boost PWM [Malesani et al., 1998].

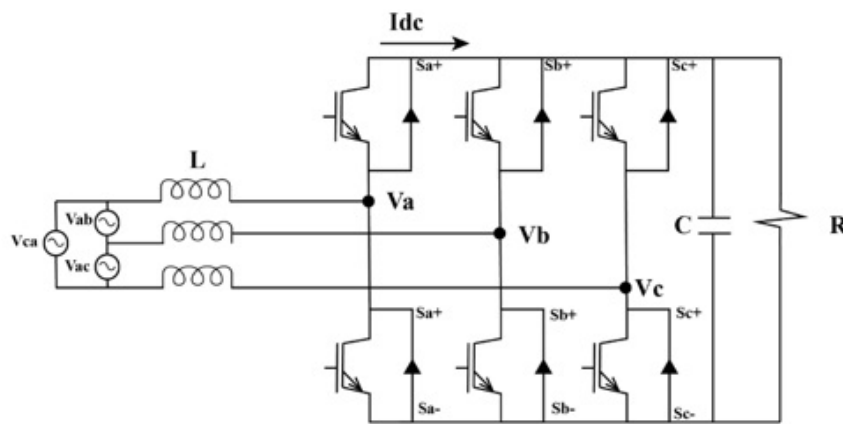


Figura 2.10: Rectificador Boost con PWM.

Un fundamento adicional que posee este método de control es el que el rectificador no detecta cargas no lineales es decir las cargas que se consideran contaminantes. Este proceso se realiza específicamente en cargas que se encuentran conectadas entre el rectificador y los sensores de corriente. Por esta razón, el rectificador al no detectar cargas contaminantes permite que se mantenga la corriente principal en forma sinusoidal. El rectificador con PWM con VSCC (Voltage Source Current Controller) al funcionar en los cuatro cuadrantes permite que dicho sistema funcione como filtro activo de potencia Dahale and Hinge [2019].

Al controlar la amplitud de la corriente se puede compensar el voltaje de la barra de corriente continua (DC). De esta forma, se explica el motivo por el cual se omite el cálculo de armónicos y factor de potencia del sistema, debido a que el rectificador puede configurar las necesidades del filtrado y compensación autónomamente. Se destaca que la ubicación de los sensores

es fundamental para realizar este proceso y los cuales deben ser ubicados en la línea principal de fuente, forzando inclusive a la corriente a mantener su referencia sinusoidal, para una mejor comprensión del proceso de especifica en la Figura 2.11, el diagrama de bloques que representa esta estrategia de control [Dahale and Hinge, 2019].

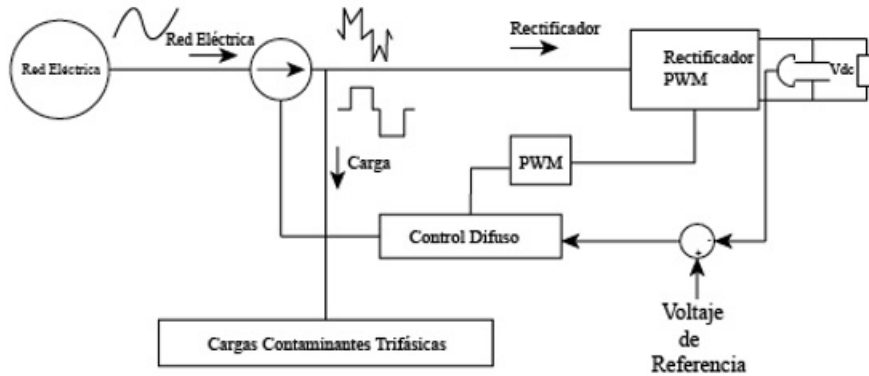


Figura 2.11: Diagrama de bloques del sensor de corriente operando como una fuente de corriente sinusoidal.

2.4.3. Método de Filtrado Selectivo

El estudio de los filtros selectivos se lleva a cabo desde los últimos años como de describe en [Basic et al., 2000]. Este método se especifica en sistemas donde no se requiere un filtrado exhaustivo de muchas frecuencias. En muchos casos donde se aplica un filtro selectivo se deseaba una eliminación total de algunas frecuencias. Esto trae consecuencias graves al sistema incluso llevando a la inestabilidad.

Una teoría que estudia el filtrado selectivo en un sistema de tres hilos se estudia en [Casaravilla et al., 2004], el cual tiene como objetivo optimizar el filtro activo a utilizar. En la Figura 2.12 se detalla una celda básica con un filtro selectivo.

Como se detalla en [Cárdenas et al., 2005], al utilizar los filtros selectivos se obtiene la oportunidad de elegir la corriente armónica a la que se requiere filtrar conjuntamente con su nivel de atenuación. Esto es debido al uso oportuno de un filtro selectivo que se encarga de remover corrientes con armónicos que superan un cierto nivel.

El filtraje selectivo está conformado por varios métodos, llegando a

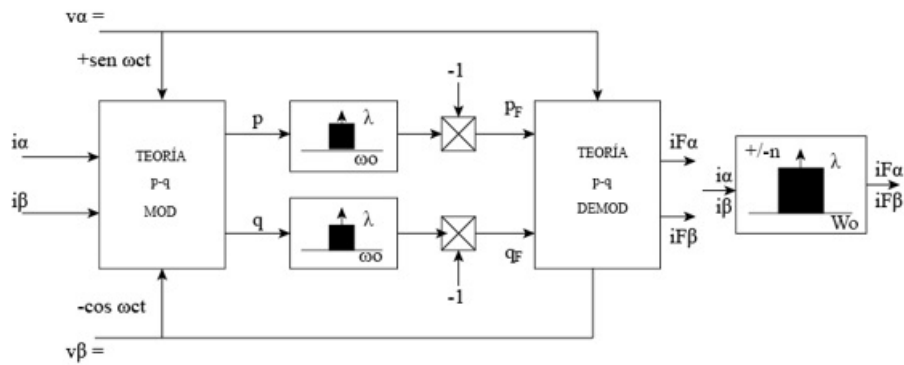


Figura 2.12: Celda básica con un filtro selectivo.

la conclusión que la parte fundamental de este método es un filtro pasa banda, el cual se encarga de atrapar armónicos que provocan las corrientes individualmente. Este método presenta una alteración a tener en cuenta, y es que al incluir un retardo de fase, provoca que la eficacia del FAP sea bajo, con lo siguiente se aconseja que la aplicación de una correcta serie de Fourier es una opción más adecuada con la finalidad de descifrar los armónicos del sistema [Angulo et al., 2012].

Capítulo 3

FAP propuesto con estrategia de control

En el presente capítulo se estudia una estrategia de control que permita la implementación de un lazo de control para el FAP monofásico, que utilice directamente la tensión de salida del inversor como variable de control, para lo cual se realiza un estudio para implementar la menor cantidad de sensores.

Con el esquema planteado y los requerimientos de sensores que miden las variables requeridas se procede a realizar el modelado en Simulink, donde se puede aplicar la tensión de salida del inversor en una red eléctrica con una carga no lineal.

3.1. Estrategia de control y requerimiento de sensores

Para el desarrollo del esquema del FAP propuesto se plantea la etapa de sensado de corriente y tensión, donde los controles más comúnmente utilizados se dividen en aquellos basados en la teoría de potencia reactiva instantánea [Akagi, 1994] y los basados en el control directo de corriente [Qiu et al., 2009]. Para ambas familias, la implementación de un lazo de control para un FAP paralelo monofásico requiere conocer la corriente de línea y la corriente de carga (i_1 e i_2) como se muestra en la Figura 3.1, a partir de la cual se extrae la corriente del FAP (i_3). Además, se requiere el sensado de la tensión de línea (V_1) y de la tensión del bus DC (V_2). Ambos métodos operan implementando un lazo de control de corriente, el cual debe ser diseñado para controlar la etapa de modulación de ancho de pulso (PWM) del VSI (inversor con fuente de voltaje). La variable de salida natural del VSI es la tensión, con lo cual la operación a través de un lazo de corriente agrega complejidad al lazo de control.

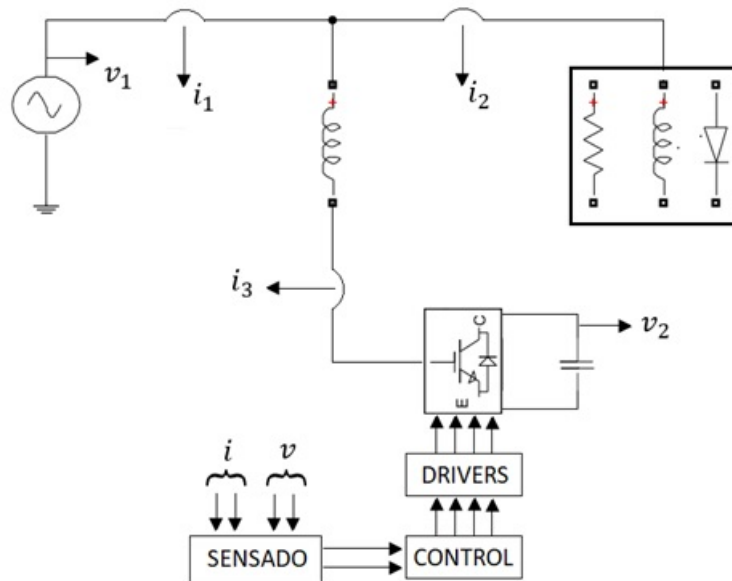


Figura 3.1: Requerimiento de sensores FAP monofásico.

Mediante las ecuaciones de flujo de potencia a través de un inductor que son utilizadas en el modelado de líneas de transmisión [Kundur, 2007]. Se plantea que, dada dos fuentes de tensión sinusoidales V_s y V_c , como las presentadas en la Figura 3.2 y una reactancia inductiva X_L , el flujo de

potencia activa (P) y reactiva (Q) se puede modelar utilizando las siguientes expresiones:

$$P_c = \frac{V_s V_c}{X_L} \sin(\delta) \quad (3.1)$$

$$Q_c = \frac{V_s V_c}{X_L} \cos(\delta) - \frac{V_c^2}{X_L} \quad (3.2)$$

Donde:

- V_s es la tensión en la fuente s.
- V_c es la tensión en la fuente c.
- δ es el ángulo de desfase entre ambas fuentes.

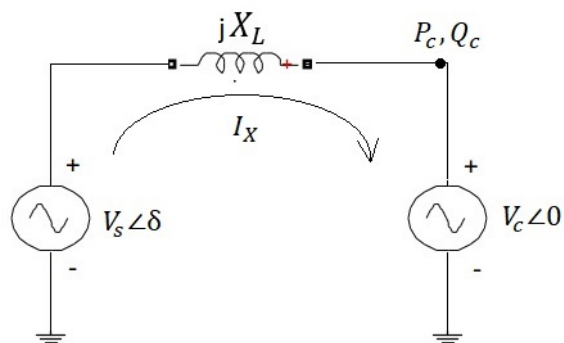


Figura 3.2: Modelo simplificado de una línea de transmisión

Donde:

- V_s es la tensión en la fuente s.
- X_L se define como la impedancia de red.
- V_c es la tensión en la fuente c.
- δ es el ángulo de desfase entre ambas fuentes.

Si la fuente V_s se reemplaza por la tensión de salida del inversor V_{sw} , la fuente V_c se reemplaza por la tensión de red V_g y la reactancia X_L se asocia con el inductor de acoplamiento del FAP, como se muestra en la Figura 3.3, el flujo de potencia activa y reactiva a través del inductor puede ser controlado directamente en términos de la tensión de salida del inversor, sin requerir de un lazo de corriente.

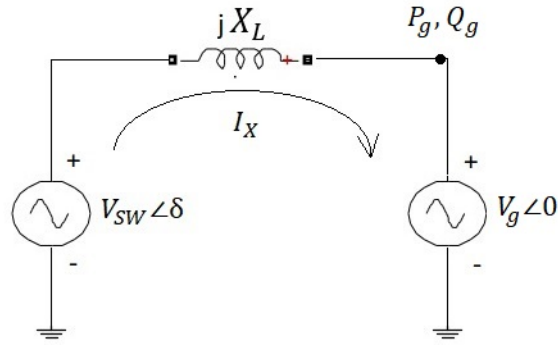


Figura 3.3: Modelo para un FAP conectado a la línea eléctrica

Donde:

- V_g es la tensión en la red.
- X_L definido como inductor de acoplamiento del FAP.
- V_{SW} es la tensión de salida del inversor.

3.2. Esquema de control con reducción de sensores/variables medidas

Según los requerimientos de las ecuaciones (3.1) y (3.2) se procede a sensar la corriente de la red eléctrica y de la carga (i_g e i_L), además de la tensión de la red eléctrica V_g , como se indica en la Figura 3.4. Con la corriente y voltaje de carga se obtiene la potencia reactiva Q_L que debe ser anulada por el FAP, para lo cual se parte de la ecuación (3.2) y (3.1) y se reemplaza V_s con V_{SW} que es la tensión de salida del inversor. Además V_c se reemplaza con V_g , dando como resultado las expresiones siguientes:

$$P = \frac{V_g V_{SW}}{X_L} \sin(\delta) \quad (3.3)$$

$$Q = \frac{V_{SW}V_g}{X_L} \cos(\delta) - \frac{V_g^2}{X_L} \quad (3.4)$$

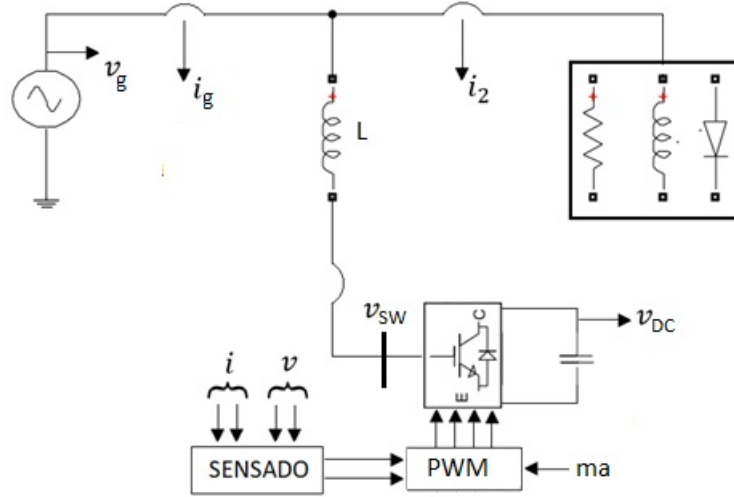


Figura 3.4: Esquema de FAP para control de tensión de salida del inversor

Partiendo de la Figura 3.5 se realiza un análisis de potencias de la línea Q_g , potencia de carga Q_L y potencia del FAP Q_F , donde se tiene en cuenta que el fin del FAP propuesto es que la potencia reactiva de la línea Q_g se anule. Para esto, la potencia reactiva del FAP debe anular la potencia reactiva Q_L de la carga. Además de cumplir este objetivo se plantea que el P_F entregado por el FAP no modifique la potencia activa de la línea. Esto se obtiene utilizando la ecuación (3.3), determinando que se anule el ángulo de carga.

$$P = \frac{V_g V_{SW}}{X_L} \sin(0) = 0 \quad (3.5)$$

Con el valor cero del ángulo δ se reemplaza en la ecuación (3.4) y se procede a despejar el valor de la tensión de salida del inversor V_{SW} como se detalla en las siguientes ecuaciones:

$$Q = \frac{V_{SW}V_g}{X_L} \cos(\delta) - \frac{V_g^2}{X_L} \quad (3.6)$$

$$V_{SW} = \frac{Q_L 2\pi 60 L}{V_g} + V_g \quad (3.7)$$

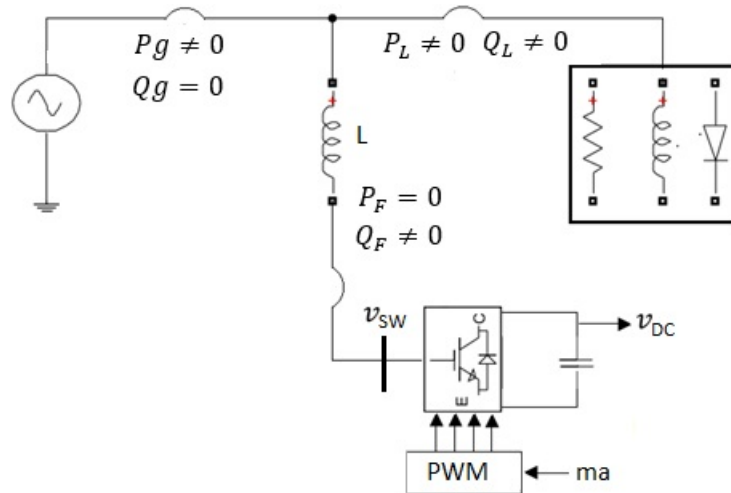


Figura 3.5: Esquema en base a la potencia del FAP

3.3. Modelado en Simulink

Para el modelado del sistema eléctrico de potencia se utilizó el programa Matlab con la herramienta de Simulink y mediante diagramas de bloques se construyó la red del sistema eléctrico que incluye una fuente de generación eléctrica monofásica, el sistema cargas lineales, no lineales y la red principal del sistema al cual se le conecta el filtro activo de potencia. Este se modela con los circuitos de potencia que conforman el inversor con la fuente de voltaje (VSI) y el bus DC, además de los bloques de control y medición que permiten el sensado y regulación de la potencia reactiva del sistema. Para el desarrollo de esta etapa se planteo tres bloques:

- Bloque Principal- FAP
- Etapa de medición y control
- Visualización de resultados

3.3.1. Bloque principal - FAP

Para el desarrollo del bloque principal se utilizó la herramienta Simulink que proporcionan un modelamiento del sistema eléctrico de potencia como se muestra en la Figura 3.6. Dentro de este bloque se encuentra la fuente de tensión monofásica, los sensores de corriente y tensión de la red, modelamiento de la carga no lineal y en el punto de acoplamiento común (PCC) se encuentra la etapa de compensación de la potencia reactiva mediante el desarrollo del filtro activo de potencia.

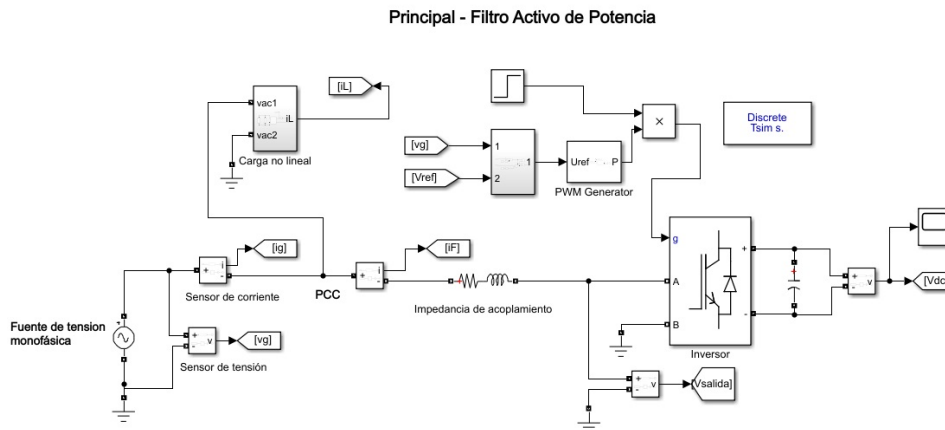


Figura 3.6: Modelado del bloque principal en Simulink

En la Figura 3.7 se encuentra el bloque principal del FAP en el cual se presenta como elemento principal el inversor monofásico (VSI), el cual se encuentra conectado a la red mediante una impedancia de acoplamiento. El inversor está compuesto por un bloque de Simulink que modela un puente H con transistores IGBT y además está constituido por una barra DC compuesta por un condensador. La puerta del inversor está regulada por la etapa de control, que se encarga de calcular los anchos de pulso requeridos para modular al inversor con el fin de anular la potencia reactiva de la red.

3.3.2. Etapa de medición y control

En la etapa de medición y control se procede a medir la variables de corriente y tensión en la red y la carga. Con estos valores y utilizando las ecuaciones (3.1) y (3.2) se plantea el diagrama de bloques de control como muestra en la Figura 3.8.

En esta etapa se procede a determinar la potencia reactiva de la carga Q_g y de la línea Q_L con la finalidad de obtener el valor de V_{SW} que se

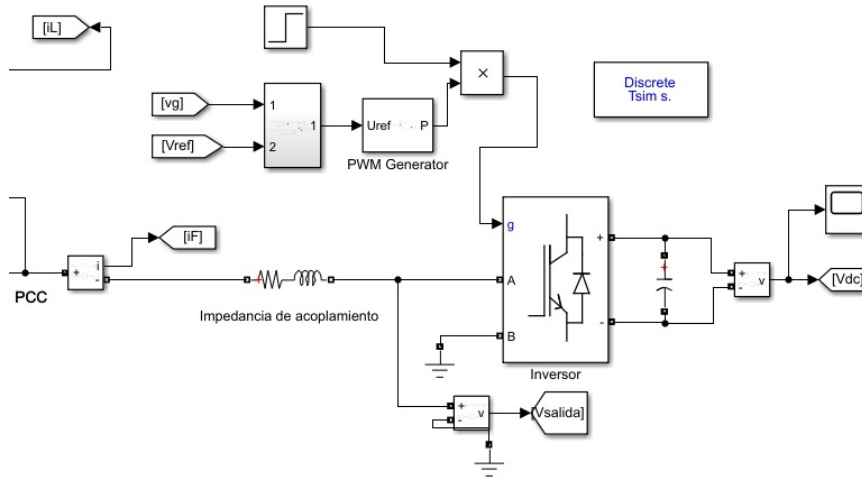


Figura 3.7: Modelado del FAP

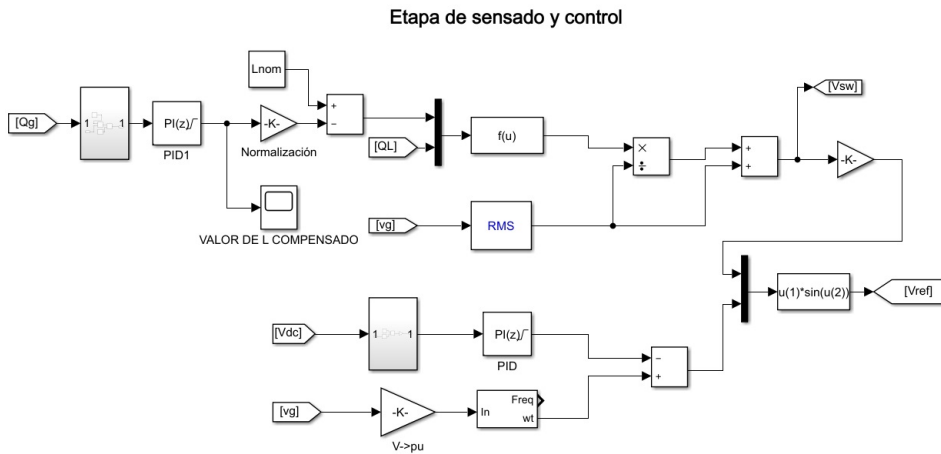


Figura 3.8: Etapa de medición y control del FAP

planteó en la ecuación (3.7). Para alcanzar este objetivo se subdivide la Figura 3.8 en la Figura 3.9, en la cual se observa el procesamiento de la potencia reactiva Q_g , a la cual se le aplica un control PI a fin de regular los picos de potencia en cada instante del sensado. Luego, se define el valor de impedancia nominal de acople que se utiliza en la ecuación V_{SW} . Una vez calculado el valor de V_{SW} se convierte el resultado en un valor por unidad.

Con el valor de V_{SW} se procede a calcular el valor de V_{ref} como se detalla en la Figura 3.10. Esto permite controlar la amplitud de V_{SW} , lo que implica

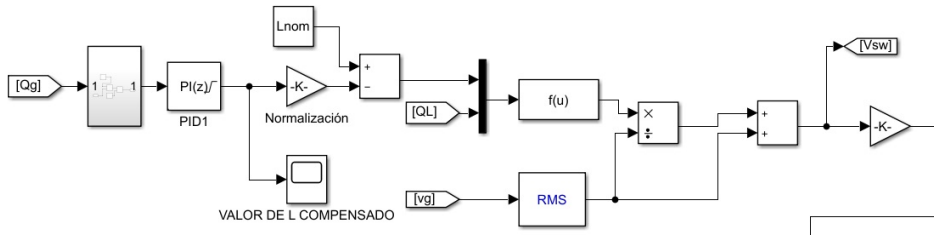


Figura 3.9: Sensado y calculo de V_{sw}

controlar el índice de modulación m_a que se envía al generador de anchos de pulso PWM, y se ingresa al inversor a fin de ajustar la potencia reactiva del filtro, permitiendo cancelar la potencia reactiva en la línea.

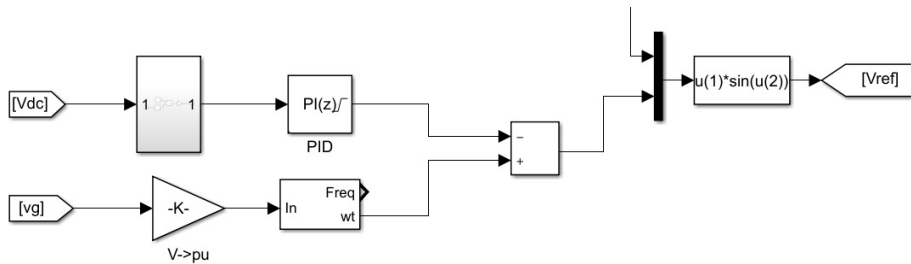


Figura 3.10: Calculo de V_{ref}

3.3.3. Visualización de resultados

En la etapa de visualización se presentan los resultados de la variación de la potencia activa y reactiva en el tiempo, tanto en la línea, en la carga y en el FAP, como se observa en la Figura 3.11. Para el desarrollo de esta etapa se colocan pantallas para la visualización de potencias y se utiliza la herramienta del osciloscopio para representar gráficamente la evolución de la señal de potencia reactiva en el tiempo. En esta última representación se puede observar la cancelación de la potencia reactiva en la línea. Esta variación se realiza en un tiempo de simulación de 0.4 segundos, donde se puede observar una estabilización en la señal que proporciona una potencia reactiva desde el FAP hacia la red.

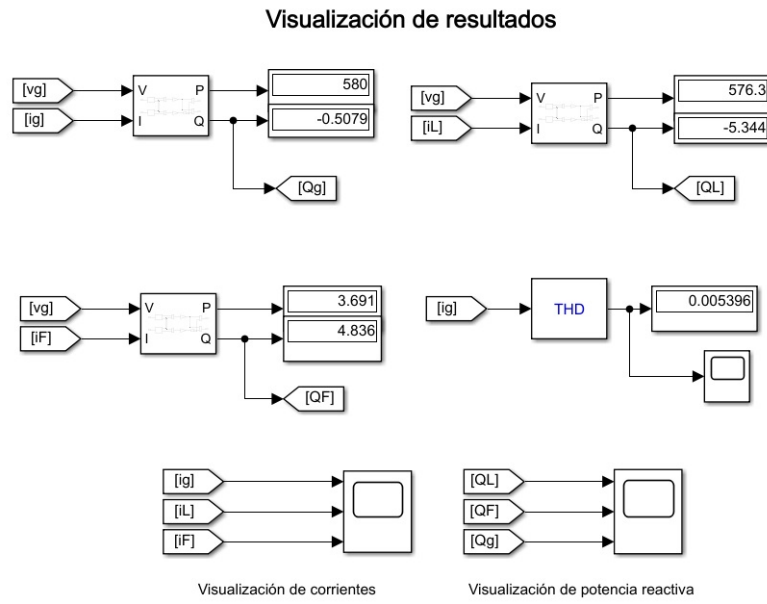


Figura 3.11: Visualización de resultados

Capítulo 4

Resultados y discusión

En el desarrollo de este capítulo se presenta los resultados de las simulaciones realizadas en Simulink. Para esto se procede a dar valores a las variables de tensión tanto en la generación de la red como en el bus DC del inversor, además de los valores de impedancia de acoplamiento y valores en la carga no lineal, para posteriormente visualizar el funcionamiento del filtro activo de potencia cuyo objetivo es anular la potencia reactiva de la línea causada por la carga no lineal. Finalmente en este capítulo se analizan los resultados obtenidos y se procede a comparar con trabajos que se hicieron en referencia a un filtro activo de potencia basados en la potencia reactiva instantánea y al control directo de corrientes.

4.1. Resultados de simulación del FAP

En esta sección del trabajo se procede a fijar valores en la simulación a fin de validar los resultados con el control directo de la tensión en el filtro activo de potencia. En la Tabla 4.1 se detalla los valores utilizados en la simulación en base al circuito presentado en la Figura 3.6.

Tabla 4.1: Parámetros de simulación.

Parámetros	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
Tensión de generación	V_g	120V
Frecuencia fundamental	Fnom	60Hz
Tensión de bus DC	V_{dc}	300V
Capacitor de bus DC	C_{dc}	2mF
Impedancia de acoplamiento	R/L	0.1Ω / 8mH
Carga no lineal	R/L	30Ω / 50mH

Con los datos presentados en la Tabla 4.1 se realizan las simulaciones en dos etapas. Con la red del sistema eléctrico sin el FAP y una segunda simulación con el ingreso del FAP en el sistema.

4.1.1. Simulación sin FAP

En esta etapa de simulación se desconecta la parte del FAP presentado en la Figura 3.6 y se simula el sistema de eléctrico de potencia con la generación y la carga no lineal. En la Figura 4.1 se observa la tensión de generación pico que en este caso sería 169.7V y la corriente de carga no lineal que se ajustaron a los parámetros presentados en la Tabla 4.1. Como se observa en la Figura 4.1, la carga es no lineal debido a que no sigue la señal de tensión aplicada en la fuente V_g .

En la Figura 4.2 se presenta los resultados obtenidos en la potencia reactiva de la carga Q_L que va a ser la misma que la potencia reactiva en la línea Q_g , debido a que en el sistema no se presenta ningún tipo de elemento que suprima dicha potencia reactiva producida por las cargas no lineales en el sistema. El tiempo que se aplica en la simulación es de 0.45s donde se estabiliza la señales del sistema. La potencia reactiva Q_g en la red producida por la carga no lineal es de 90.51VAR.

4.1.2. Simulación con FAP

Con los datos de la Tabla 4.1 y con el circuito presentado en Simulink en la Figura 3.6 se procede a conectar en el punto de acoplamiento común

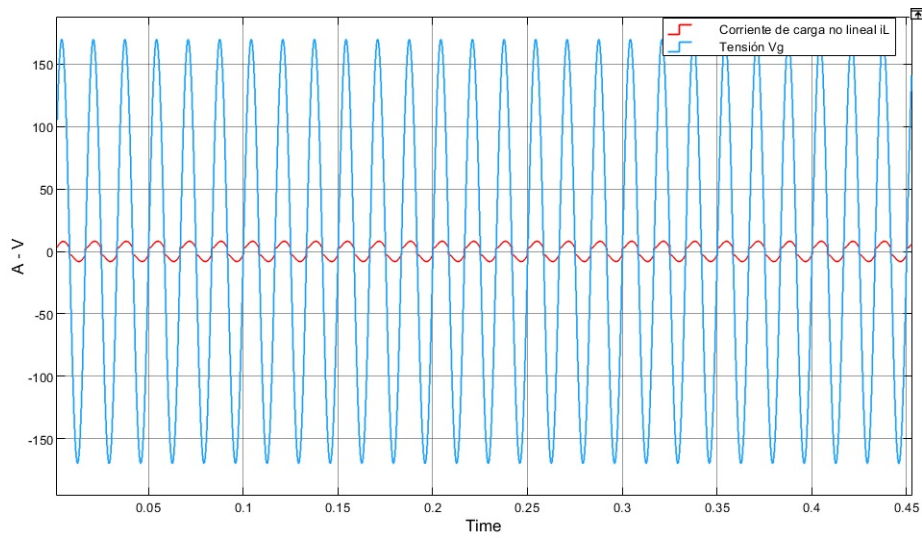


Figura 4.1: Tensión V_g y corriente de carga no lineal i_L

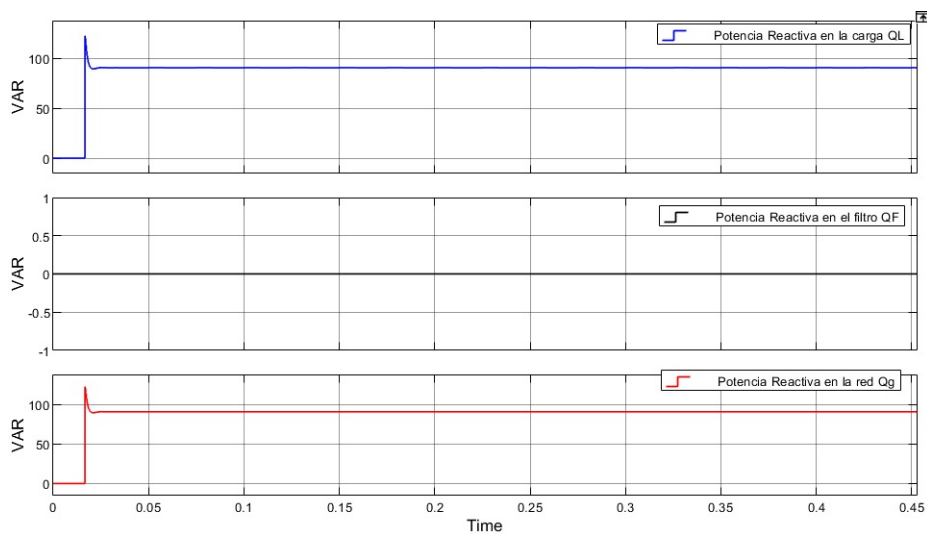


Figura 4.2: Potencia reactiva en la carga Q_L , Potencia reactiva en la línea Q_g

(PCC) el filtro activo de potencia. Este funciona en un primer instante con el sensado de la corriente y tensión de línea y de carga y a partir del tiempo $10/f_{nom}$ correspondiente a 0.16s, se empiezan a medir estas variables con la finalidad de obtener la potencia reactiva que produce la carga Q_L . Con este valor y utilizando las ecuaciones (3.4) y (3.7), se procede a calcular y

controlar el valor de tensión de salida del inversor V_{SW} en cada instante de tiempo con la finalidad de anular la potencia reactiva producida por la carga no léal.

En la Figura 4.3 se presenta el gráfico de las potencias reactivas a lo largo del tiempo de simulación que en este caso es 0.45s, tiempo en el cual se estabiliza el control y entra en un periodo de cancelación de la potencia reactiva presente en la red del sistema. La potencia generada por el FAP tiende a un valor de -90.4VAR que produce la cancelación de la potencia reactiva de la red con un error de 0.12 %.

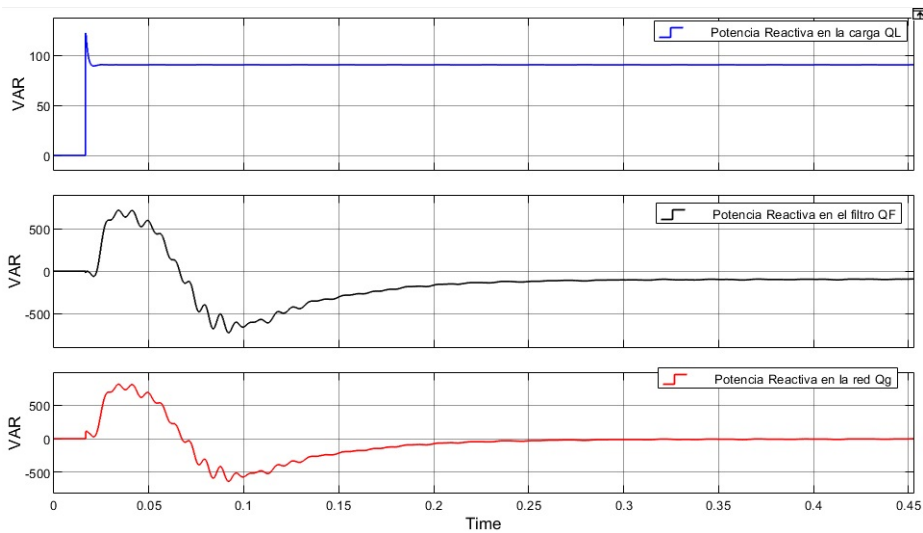


Figura 4.3: Potencia reactiva en la carga Q_L , Potencia reactiva en el FAP Q_F , Potencia reactiva en la línea Q_g

Con el tipo de control propuesto, el flujo de potencia activa y reactiva se controla directamente en términos de tensión de salida del inversor sin requerir de un lazo de corriente. Para este caso se controla la potencia reactiva entregada por el FAP y se controla que el FAP no entregue potencia activa al sistema. Como se puede observar en la Figura 4.4, la potencia activa entregada por el FAP tiende a ser menor al 0.49 % en el tiempo de simulación presentado.

4.1.3. Resumen de resultados

Con las simulaciones planteadas en las secciones 4.1.1 y 4.1.2, utilizando los valores de la Tabla 4.1 se procede a realizar la Tabla comparativa de los resultados 4.2.

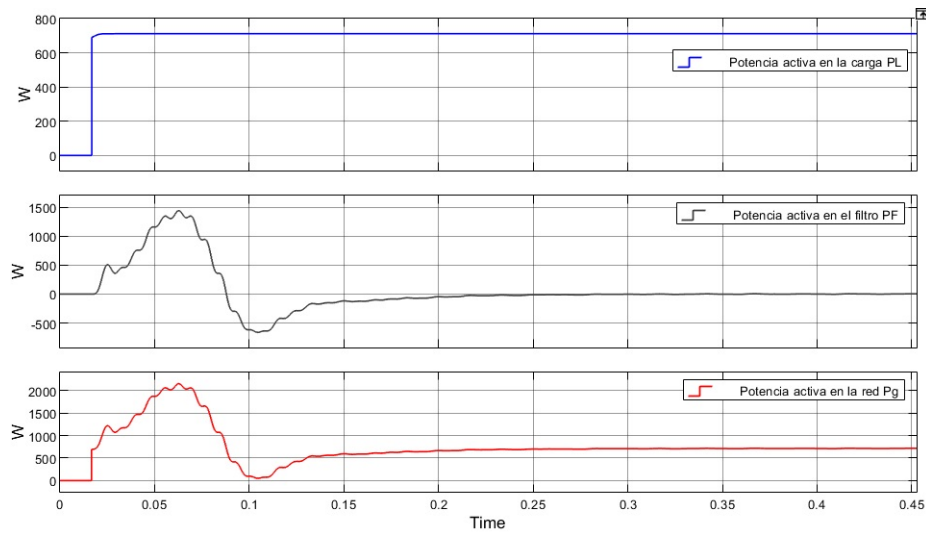


Figura 4.4: Potencia activa en la carga P_L , Potencia activa en el FAP P_F , Potencia activa en la línea P_g

Tabla 4.2: Resultados de simulación.

Parámetros en la red	Sistema sin FAP	Sistema con FAP
Factor de Potencia	0.992	0.99999
Potencia activa	711.3W	714.8W
Potencia reactiva	90.51VAR	0.12VAR

En la Tabla 4.2, se resume los resultados de las potencias presentes en la red del sistema. El factor de potencia se mejora con el FAP aproximándose a la unidad. Con la potencia activa se cumple el objetivo de no entregar potencia activa desde el FAP, presentando un margen de error del 0.49 % y por otro lado se concluye con el objetivo del trabajo que es el control de tensión del inversor para anular la potencia reactiva del sistema con la implementación del FAP teniendo un margen de error del 0.12 %.

4.2. Pruebas de simulación con diferentes cargas

A fin de realizar una comprobación de la eficiencia del sistema y el algoritmo planteado en la parte de Simulink se procede a realizar pruebas con dos cargas diferentes como se plantea en diferentes casos.

En el primer caso se realiza un cambio de valores en la carga como se presenta en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Parámetros de simulación caso 1.

Parámetros	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
Tensión de generación	V_g	120V
Frecuencia fundamental	Fnom	60Hz
Tensión de bus DC	V_{dc}	300V
Capacitor de bus DC	C_{dc}	2mF
Impedancia de acoplamiento	R/L	0.1Ω / 8mH
Carga no lineal	R/L	3Ω / 5mH

Tabla 4.4: Resultados de simulación caso 1

Parámetros en la red	Sistema sin FAP	Sistema con FAP
Factor de Potencia	0.9875	0.99999
Potencia activa	566.7W	569.4W
Potencia reactiva	904.4VAR	-0.8866VAR

Al igual que en el caso 1, en este punto se realiza un cambio de valores de carga y se plantea una simulación con los valores definidos en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Parámetros de simulación caso 2.

Parámetros	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
Tensión de generación	V_g	120V
Frecuencia fundamental	Fnom	60Hz
Tensión de bus DC	V_{dc}	300V
Capacitor de bus DC	C_{dc}	2mF
Impedancia de acoplamiento	R/L	0.1Ω / 8mH
Carga no lineal	R/L	300Ω / 500mH

Tabla 4.6: Resultados de simulación caso 2

Parámetros en la red	Sistema sin FAP	Sistema con FAP
Factor de Potencia	0.999	1
Potencia activa	1482W	1485W
Potencia reactiva	9.049VAR	0.1351VAR

Como se puede observar en la Tabla 4.4 que corresponde a los resultados para el caso 1 al igual que en el caso general de la Tabla 4.2, se observa que

al reducir la carga resistiva e inductiva se sigue manteniendo un factor de potencia cercano a la unidad y se cumple el objetivo de lograr la cancelación de la potencia reactiva del sistema con un margen de error de 0.09 %.

Para el caso 2 se presenta los resultados en la Tabla 4.6 en donde se aumenta en la carga el parámetro resistivo e inductivo en un valor 100 veces mayor con respecto al caso 1. En los resultados de la Tabla 4.6, se observa un comportamiento similar a los casos anteriores, donde el factor de potencia es prácticamente unitario y al igual que el caso 1 se cumple con la cancelación de la potencia reactiva de la red del sistema con un margen de error del 1.49 %.

4.3. Comparación de resultados

4.3.1. Comparación de resultados con los basados en la teoría de potencia reactiva instantánea

En esta sección se plantea una comparación de resultados con el trabajo de Ukande, Anurag H and Tiwari, SL and Kadwane, SG and Kadu, Atul [Ukande et al., 2015]. Dentro de las técnicas analizadas en la parte del estado del arte del trabajo, se encuentra el método de potencia reactiva instantánea P-Q, cuyo objetivo es la generación de una corriente de compensación y a su vez crea una tensión de referencia para regular la modulación del ancho de pulsos que alimenta al inversor.

Para la comparación de resultados se utiliza el trabajo de Ukande, [Ukande et al., 2015], en el que se presenta el método de potencia reactiva instantánea P-Q, donde se plantea la utilización de un filtro activo de potencia en paralelo. En este ejemplo la red del sistema eléctrico es monofásica y en la publicación se establecen los datos que pueden ser utilizados en la simulación. En la Tabla 4.7 se presentan los datos de este sistema.

Tabla 4.7: Parámetros de comparación teoría P-Q

Parámetros	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
Tensión de generación	V_g	100V
Frecuencia fundamental	F_{nom}	50Hz
Capacitor de bus DC	C_{dc}	1200uF/220V
Impedancia de acoplamiento	R/L	0.1 Ω / 5mH
Carga no lineal	R/L	30 Ω / 50mH

Con los datos de la Tabla 4.7 se realiza la modelación correspondiente. En la Figura 4.6 se presentan los resultados que corresponde a la tensión de

la red V_g y corriente de carga i_L . Para realizar la comparación se extrae de la publicación de Ukande [Ukande et al., 2015] el gráfico de tensión de la línea y corriente de carga presentados en la Figura 4.5.

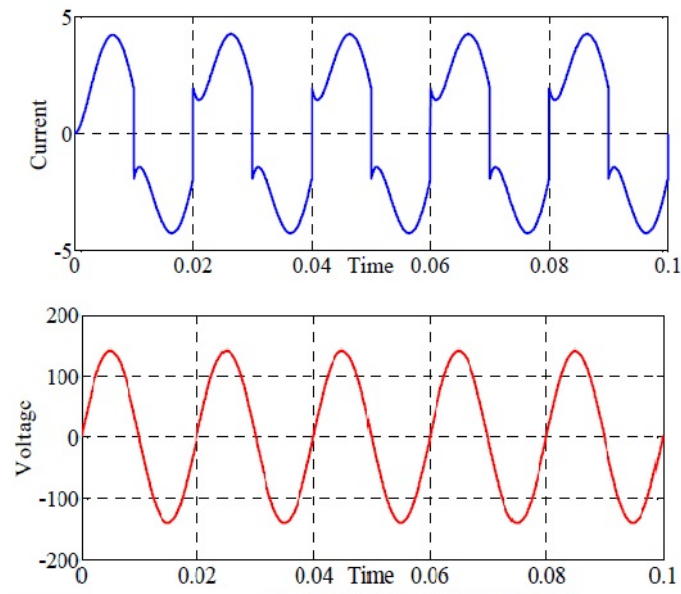


Figura 4.5: Corriente de carga y tensión de generación [Ukande et al., 2015]

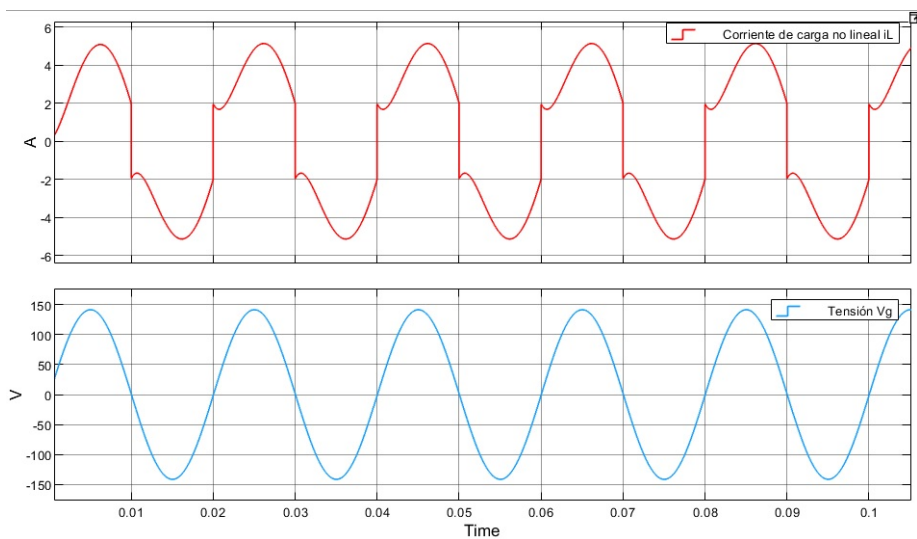


Figura 4.6: Corriente de carga no lineal i_L y tensión V_g

En la publicación de Ukande [Ukande et al., 2015] se implementa un lazo de control para un FAP paralelo monofásico que requiere la medición de la corriente de línea y de carga, a partir de la cual se determina la corriente del FAP. Además, se requiere el sensado de la tensión de línea y la tensión de la barra DC. Este método opera implementando un lazo de control de corriente, el cual debe ser diseñado para controlar la etapa de modulación de ancho de pulso (PWM) del VSI. La variable de salida natural del VSI es la tensión, con lo cual la operación a través de un lazo de corriente, agrega complejidad al lazo de control, a diferencia del control presentado en este trabajo, donde el flujo de potencia activa y reactiva a través del inductor puede ser controlado directamente en términos de la tensión de salida del inversor, sin requerir de un lazo de corriente.

A raíz de lo expuesto, si bien los métodos son similares en el sensado de potencias de línea y carga, su diferencia radica en el lazo de control implementado. Los resultados presentados en la publicación de Ukande [Ukande et al., 2015] se centran principalmente en la reducción de la distorsión armónica total (THD).

Tabla 4.8: Resultados de comparación 1

Parámetros en la red	Resultados presentados en Ukande	Sistema con FAP
Factor de Potencia	0.951	0.9999
THD	3.06 %	0.2275 %

Dentro de los parámetros comparables con el trabajo de Ukande [Ukande et al., 2015], se plantea el factor de potencia y la distorsión armónica total que se presentan en la Tabla 4.8, donde se observa un mejor comportamiento del FAP propuesto en este trabajo en relación al factor de potencia que es cercano a la unidad y al porcentaje de THD que se encuentra dentro del rango de la norma estándar IEEE-519, el cual establece un valor inferior al 5 % de THD.

4.3.2. Comparación de resultados con los basados en el control directo de corriente.

Al igual que en la sección 4.3.1, se procede a realizar una comparación con el método basado en el control directo de corriente, que se fundamenta en la extracción de la corriente armónica de la carga a partir de su forma de onda distorsionada y utilizando la técnica de control M-PWM. Se realiza una comparación entre una señal portadora triangular de alta frecuencia

y la corriente armónica de carga. Este proceso de comparación genera las señales de pulso que se ingresa en el inversor generando una corriente de compensación para eliminar los armónicos presentes en la red.

Para la comparación de resultados se utiliza el trabajo de Salem Rahmani y Kamal Al-Haddad [Rahmani et al., 2005], con el método de control directo de corriente, donde se plantea la utilización de un filtro activo de potencia en paralelo, un sistema eléctrico monofásico, y que la publicación establezca datos que pueden ser utilizados en la simulación. En la Tabla 4.9 se presentan los datos de este caso.

Tabla 4.9: Parámetros de comparación corriente directa

Parámetros	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
Tensión de generación	V_g	120V
Frecuencia fundamental	F_{nom}	60Hz
Capacitor de bus DC	C_{dc}	1000uF/250V
Impedancia de acoplamiento	R/L	0.1Ω / 0.2mH
Carga no lineal	R/L	12Ω / 10mH

Con los datos de la Tabla 4.9 se procede a realizar la simulación correspondiente. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.8 que corresponde a la tensión de la red V_g y corriente de carga i_L . Para realizar la comparación se extrae de la publicación de Salem Rahmani y Kamal Al-Haddad [Rahmani et al., 2005], el gráfico de tensión de la línea y corriente de carga presentados en la Figura 4.7.

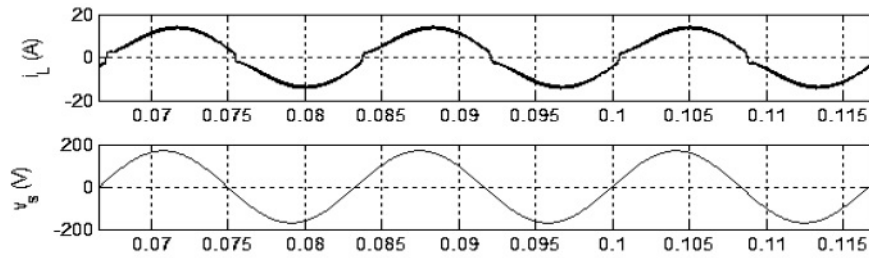


Figura 4.7: Corriente de carga y tensión de generación [Rahmani et al., 2005]

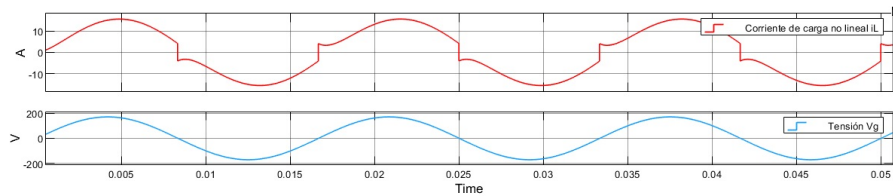


Figura 4.8: Corriente de carga no lineal i_L y tensión V_g

Como se menciona en la sección 4.3.1, estos métodos requieren de un lazo de corriente que agrega complejidad al lazo de control, a diferencia del control presentado en este trabajo donde el flujo de potencia activa y reactiva a través del inductor puede ser controlado directamente en términos de la tensión de salida del inversor, sin requerir de un lazo de corriente.

A raíz de lo expuesto, si bien los métodos son similares en el sensado de corriente de carga y línea, su diferencia radica en el lazo de control implementado, por lo que los resultados presentados en la publicación de Salem Rahmani y Kamal Al-Haddad [Rahmani et al., 2005] se centran en la reducción de la distorsión armónica total (THD) con el método M-PWM del control directo de corriente.

Tabla 4.10: Resultados de comparación 2

Parámetros en la red	Resultados de Salem Rahmani	Sistema con FAP
THD	1 %	0.1268 %

En la Tabla 4.10 se presentan los resultados de la distorsión armónica total, del trabajo de Salem Rahmani, Kamal Al-Haddad [Rahmani et al., 2005] y el control propuesto en este trabajo, dando como resultado un mejor

comportamiento de este último. Este valor de THD se encuentra dentro del rango de la norma estándar IEEE-519 que establece un valor inferior al 5 % de THD. Como se observa en la Figura 4.9, se muestra una cancelación de la potencia reactiva de la línea con un rango de error del 2.15 %.

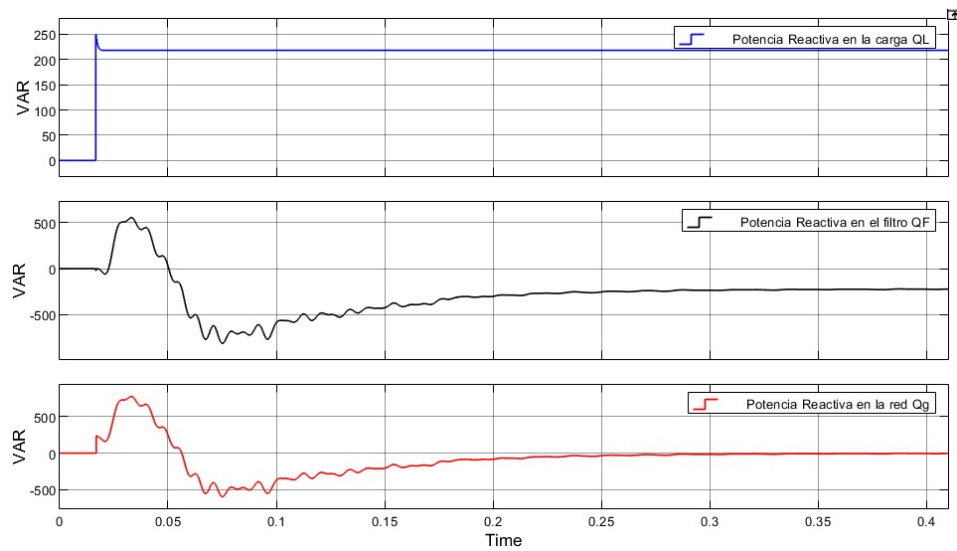


Figura 4.9: Potencia reactiva en la carga Q_L , Potencia reactiva en el FAP Q_F , Potencia reactiva en la línea Q_g

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un filtro para eliminar contenido armónico en la red basado en la tensión de salida del VSI, el cual permitió la eliminación de la potencia reactiva introducida a la línea eléctrica por cargas no lineales.

El filtro propuesto cumple con los objetivos del trabajo porque se desarrolló e implementó un algoritmo que permitió el control del FAP, midiendo las variables de tensión y corriente de la red y la carga.

Dentro del desarrollo del trabajo se utiliza el programa de Matlab con la herramienta de Simulink, donde se propone un diagrama de bloques, en el cual se utilizan los datos de un sistema eléctrico de potencia, incluyendo la tensión de generación, frecuencia de trabajo y la resistencia e inductancia de la carga no lineal. Para la etapa del filtrado de la potencia reactiva se propone un FAP, donde se tiene como elemento principal el bloque del inversor, del cual se deriva una etapa de control y medición que permiten una mayor eficiencia en el ajuste de la tensión de salida del inversor. Este desarrollo comprobó la eficiencia del circuito planteado en Simulink.

En la sección del estado del arte se plantearon varios métodos de eliminación de armónicas producidas por las cargas no lineales, dentro de los cuales se destaca los basados en la teoría de potencia reactiva instantánea y los que utilizan el control directo de corriente. Estos métodos se comparan y analizan en la sección 4.3 con el algoritmo propuesto en este trabajo, dando como resultado una mejor respuesta del sistema en la cancelación de la potencia reactiva. La corrección del factor de potencia es muy cercano a la unidad y en los casos comparativos se analiza la distorsión armónica total que se encuentra dentro de los límites establecidos en la norma estándar IEEE-519.

Los FAP se han venido empleando en instalaciones de potencia trifásicas desde hace varias décadas, aportando mejoras sustanciales a la calidad de la onda de corriente y al valor del factor de potencia. En la actualidad existen varias opciones cada vez más económicas de componentes electrónicos utilizados en la implementación de un FAP, por lo que se planteó un estudio y se implementó un esquema de control basado directamente en la tensión entregada por el VSI, el cual es de menor complejidad matemática y requiere una menor cantidad de sensores para operar. Por lo que dentro del aspecto físico se puede desarrollar una implementación más simple del FAP, llevando esto a un diseño más compacto y económico, lo cual permitiría extender su universo de aplicación a sistemas domiciliarios monofásicos de baja potencia, tales como refrigeradoras, unidades de aires acondicionado,

etc., minimizando la cantidad de potencia reactiva y el contenido armónico de la corriente que se presenta en la red.

Considerando la composición del FAP en sus inicios, este se destinó solamente a instalaciones industriales de alta potencia, donde el costo de su instalación se viera recompensado por los beneficios que implicaba su operación. Sin embargo, los costos de la electrónica involucrada en las distintas etapas de un FAP, ha experimentado un continuo descenso en sus precios, abriendo la posibilidad a que hoy en día se pueda plantear el desarrollo de un FAP para aplicaciones de muy baja potencia. Los componentes que mayor reducción de precio han experimentado son aquellos que pertenecen a los módulos de potencia, los cuales implementan dentro de su encapsulado, no solo la etapa de potencia completa, sino también la etapa de los circuitos de manejo de los transistores de potencia, dando lugar a una solución muy compacta y de muy bajo costo.

Bibliografía

- H. Akagi. Trends in active power line conditioners. *IEEE Transactions on power Electronics*, 9(3):263–268, 1994.
- A. Ametani. Harmonic reduction in thyristor converters by harmonic current injection. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 95(2):441–449, 1976.
- M. Angulo, D. A. Ruiz-Caballero, J. Lago, M. L. Heldwein, and S. A. Mussa. Active power filter control strategy with implicit closed-loop current control and resonant controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(7):2721–2730, 2012.
- D. Basic, V. Ramsden, and P. Muttik. Hybrid filter control system with adaptive filters for selective elimination of harmonics and interharmonics. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 147(4):295–303, 2000.
- S. Bhattacharya and D. Divan. Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system. In *IAS'95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*, volume 3, pages 2531–2540. IEEE, 1995.
- V. Bhavaraju and P. Enjeti. Analysis and design of an active power filter for balancing unbalanced loads. In *PESC'92 Record. 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pages 1214–1220. IEEE, 1992.
- M. Büyük, A. Tan, M. İnci, and M. Tümay. A notch filter based active damping of llcl filter in shunt active power filter. In *2017 International Symposium on Power Electronics (Ee)*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- P. F. Cárdenas, F. R. Jimenez, and J. M. Salamanca. Aspectos generales de filtros activos de potencia en sistemas de potencia. In *III Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica*, volume 77, pages 1–10, 2005.
- G. Casaravilla, A. Salvia, C. Briozzo, and E. H. Watanabe. Selective active filter with optimum remote harmonic distortion control. *IEEE Transactions on power delivery*, 19(4):1990–1997, 2004.

- G. Chang and W. Chen. A new reference compensation voltage strategy for series active power filter control. *IEEE transactions on power delivery*, 21(3):1754–1756, 2006.
- H. Chen and H. Zhao. Review on pulse-width modulation strategies for common-mode voltage reduction in three-phase voltage-source inverters. *IET Power Electronics*, 9(14):2611–2620, 2016.
- X. Chen, T. Wang, H. Wang, Y. Hou, and L. Guo. A magnetic flux compensated series active power filter using deadbeat control based on repetitive predictor theory. In *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pages 1–5. IEEE, 2019.
- J.-H. Choi, G.-W. Park, and S. B. Dewan. Standby power supply with active power filter ability using digital controller. In *Proceedings of 1995 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC'95*, volume 2, pages 783–789. IEEE, 1995.
- L. Corradini, W. Stefanutti, and P. Mattavelli. Analysis of multisampled current control for active filters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44(6):1785–1794, 2008.
- S. Dahale and T. Hinge. Harmonics reduction in microgrids using apf with fuzzy controller. In *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, volume 1, pages 1–6. IEEE, 2019.
- N. Daou, F. G. Montoya, N. Ababssi, and Y. Djeghader. A hybrid active filter using the backstepping controller for harmonic current compensation. *Symmetry*, 11(9):1161, 2019.
- M. S. Dawande, V. R. Kanetkar, and G. K. Dubey. Three-phase switch mode rectifier with hysteresis current control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 11(3):466–471, 1996.
- F. De La Rosa. *Harmonics and power systems*. CRC press Boca Raton, 2006.
- S. Devassy and B. Singh. Control of solar energy integrated active power filter in weak grid system. In *2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS)*, pages 573–578. IEEE, 2017.
- R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty. Electrical power systems quality. *New York*, 1996.
- M. Z. El-Sadek. Power system voltage stability and power quality. *Book, Mukhtar Press, Assuit, Egypt*, 2002.

- W. M. Grady, M. J. Samotyj, and A. H. Noyola. Survey of active power line conditioning methodologies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(3): 1536–1542, 1990.
- H. F. Hashim, R. Omar, and M. Rasheed. Design and analysis of a three phase series active power filter (sapf) based on hysteresis controller. *IET Conference Proceedings*, pages 53 (5 .)–53 (5 .)(1), January 2016.
- S.-J. Huang and J.-C. Wu. A control algorithm for three-phase three-wired active power filters under nonideal mains voltages. *IEEE transactions on Power Electronics*, 14(4):753–760, 1999.
- M. Khosravi, M. Amirbande, D. A. Khaburi, M. Rivera, J. Riveros, J. Rodriguez, A. Vahedi, and P. Wheeler. Review of model predictive control strategies for matrix converters. *IET Power Electronics*, 12(12): 3021–3032, 2019.
- Z. D. Koozehkanani, P. Mehta, and M. Darwish. An active filter for retrofit applications. *IET Conference Proceedings*, pages 150–155(5), January 1996.
- P. Kundur. Power system stability. *Power system stability and control*, pages 7–1, 2007.
- C. E. Lin, W.-F. Su, S.-L. Lu, C.-L. Chen, and C.-L. Huang. Operation strategy of hybrid harmonic filter in demand-side system. In *IAS'95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*, volume 3, pages 1862–1866. IEEE, 1995.
- J. Mahdavi, A. Emadi, and H. Toliyat. Application of state space averaging method to sliding mode control of pwm dc/dc converters. In *IAS'97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting*, volume 2, pages 820–827. IEEE, 1997.
- L. Malesani, P. Mattavelli, and S. Buso. Robust dead-beat current control for pwm rectifiers and active filters. In *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No. 98CH36242)*, volume 2, pages 1377–1384. IEEE, 1998.
- M. Mane and M. K. Namboothiripad. Pwm based sliding mode controller for shunt active power filter. In *2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- R. Martinek, J. Rzigky, R. Jaros, P. Bilik, and M. Ladrova. Least mean squares and recursive least squares algorithms for total harmonic distortion reduction using shunt active power filter control. *Energies*, 12(8):1545, 2019.

- T. M. Patel, A. N. Lathiya, N. G. Misra, and Y. R. Prajapati. Power quality issues and harmonics reduction by hybrid filter. *IJSRD - International Journal for Scientific Research Development*, 3:2212–2216, 2015.
- S. Pérez Litrán et al. Análisis y diseño de filtros activos serie e híbrido para la mejora de la calidad de la potencia eléctrica. *Universidad de Huelva*, page 262, 2011.
- H. Qiu, Y. Zhongdong, L. Qiao, and S. Renzhong. A direct current control of shunt active power filter. In *2009 International Conference on Energy and Environment Technology*, volume 2, pages 7–10. IEEE, 2009.
- S. Rahmani, K. Al-Haddad, H. Y. Kanaan, and F. Fnaiech. A comparative study of two pwm techniques for single-phase shunt active power filters employing direct current control strategy. In *2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, 2005.
- R. Redl and J. Sun. Ripple-based control of switching regulators—an overview. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(12):2669–2680, 2009.
- E. J. Revelo Fuelagán. Diseño de una técnica de control con banda de histéresis adaptativa para corrección del factor de potencia. *Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación*, 2009.
- C. A. R. Reyes, R. A. G. Rendón, and M. A. Naranja. Análisis de armónicos en sistemas eléctricos. *Scientia et Technica*, 1(21):21–26, 2003.
- M. F. M. H. W. B. Roger, C Dugan. Dugan. Electrical power system quality. *Book, Digital Engineering Library, McGraw-Hill*, page 521, 1996.
- F. Ruiz-Tipán, C. Barrera-Singaña, and A. Valenzuela. Reactive power compensation using power flow sensitivity analysis and qv curves. In *2020 IEEE ANDESCON*, pages 1–6. IEEE, 2020.
- Z. Salam, P. C. Tan, and A. Jusoh. Harmonics mitigation using active power filter: A technological review. *Elektrika Journal of Electrical Engineering*, 8(2):17–26, 2006.
- M. R. Sánchez Herrera et al. Nuevas propuestas en la teoría de la potencia reactiva instantánea: aplicación a la compensación de cargas industriales con filtros activos de potencia. *Universidad de Huelva, Departamento de Ingeniería Electrónica*, page 284, 2007.
- H. Sasaki and T. Machida. A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic flux compensation—considerations on basic design. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (5):2009–2019, 1971.

- B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra. A review of active filters for power quality improvement. *IEEE transactions on industrial electronics*, 46(5): 960–971, 1999.
- J. Strojny. Power system harmonics: An overview. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102:2455–2460, 1983.
- S. D. Swain, P. K. Ray, and K. B. Mohanty. A real time study of hybrid series active power filter for power quality improvement. In *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- S. M. Tripathi, A. N. Tiwari, and D. Singh. Optimum design of proportional-integral controllers in grid-integrated pmsg-based wind energy conversion system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 26(5):1006–1031, 2016.
- A. H. Ukande, S. Tiwari, S. Kadwane, and A. Kadu. Generalise pq theory with spwm for single phase shunt active filter applications. In *2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC)*, pages 89–94. IEEE, 2015.
- N. Watson and J. Arrillaga. Harmonics in large systems. *Electric Power Systems Research*, 66(1):15–29, 2003.
- W. Xu, Y. Mansour, C. Siggers, and M. Hughes. Developing utility harmonic regulations based on ieeec 519-bc, hydro’s approach. *IEEE transactions on power delivery*, 10(3):1423–1431, 1995.
- H. Zhong, P. Chen, Z. Lu, Z. Qian, and H. Ma. Three-phase four-wire series hybrid active power filter with fundamental current bypass channel. In *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004*, volume 1, pages 536–539. IEEE, 2004.
- S. Zhou and G. A. Rincon-Mora. A high efficiency, soft switching dc-dc converter with adaptive current-ripple control for portable applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 53(4): 319–323, 2006.