



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Departament d'Enginyeria Electrònica

***“ELIMINACIÓN DE PERTURBACIONES DE BAJA FRECUENCIA EN REDES ELÉCTRICAS, MEDIANTE
COMPENSADORES ESTÁTICOS”***

Tesis doctoral presentada como requisito parcial para la obtención del título de Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya, dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería Electrónica.

Manuel Lamich Arocas

Director: *Josep Balcells Sendra*

Febrero 2015

A mis compañeros de trabajo y amigos sin cuyo apoyo nunca habría podido terminar esta tesis;
a mis directores de tesis por su paciencia y ayuda y a mis familiares y amigos.

RESUMEN

La proliferación de equipos electrónicos alimentados en CC, conectados a la red, provoca multitud de problemas de distorsión armónica y una reducción de la eficiencia en la transmisión de la energía eléctrica. Estos equipos se comportan como cargas fuertemente no lineales, cuyo comportamiento depende de su topología y estructura, pero también de la impedancia de la red que los alimenta y de otras posibles cargas en paralelo, alimentadas por la misma red. Para corregir esta situación se puede optar por modificar las cargas o por introducir filtros, generalmente en paralelo con las mismas, para reducir la propagación de armónicos por la red de alimentación. Los filtros pueden ser de dos tipos: activos o pasivos. La tesis se ha centrado en el estudio de la topología, los métodos de control y el comportamiento una vez conectados a la red de los filtros activos paralelo.

Más concretamente, la tesis está centrada en el estudio de filtros híbridos, acoplados a red mediante un filtro pasivo LC serie. Las aportaciones básicas de la tesis, todas ellas avaladas por publicaciones, son las siguientes:

- a) Topología del filtro: Distintas topologías de filtros presentan diversos problemas, que se explican detalladamente en la memoria. En la tesis se han analizado los filtros híbridos acoplados a la red mediante un conjunto LC y se propone una nueva topología llamada "Neutro a Negativo" (NtN). La topología propuesta utiliza un solo condensador en el bus de CC y por tanto elimina la necesidad de equilibrar la tensión respecto a otras topologías basadas en convertidores VSI con bus de continua partido.
- b) Control y técnicas de modulación PWM: En el apartado de control, la tesis hace aportaciones en dos aspectos: Por una parte se ha introducido una transformación basada en ejes de referencia a 60° , en vez de la clásica descomposición en ejes ortogonales $\alpha\beta$. Este cambio simplifica enormemente la obtención de los estados del VSI cuando el sistema al que va destinado es un filtro que no dispone de neutro. Por otra parte se ha desarrollado un regulador de corriente, y una nueva técnica de modulación para seguimiento rápido de la consigna, desarrollada para trabajar con redes de 3 y 4 hilos.
- c) Control de la corriente reactiva: Se ha desarrollado un nuevo método que permite reducir la corriente reactiva capacitiva que requiere el filtro híbrido en condiciones de poca carga. El método regula la tensión disponible en el condensador de acoplo, adaptándolo a la necesidad de crear un determinado di/dt . El método es aplicable sin pérdida de prestaciones del filtro.
- d) Modelado de cargas: La inserción de filtros de armónicos en la red, altera el funcionamiento de las cargas no lineales que los producen y genera ciertos problemas de amplificación que se han tratado en el último capítulo. El capítulo está dedicado a obtener un modelo de las cargas no lineales para poder predecir los resultados de la inserción de los filtros. Se ha desarrollado un modelo de las cargas basado en Redes Neuronales, que permite predecir el fenómeno de amplificación. El modelo se genera a partir de un conjunto de medidas tomadas en el punto donde se pretende conectar el filtro activo. Este modelo se ha completado con un método iterativo que permite predecir la variación de las corrientes armónicas en la red cuando se introduce un filtro activo en una instalación.

SUMMARY

The increasing use of DC electronic devices connected to mains lead to several problems of harmonic distortion and efficiency reduction in electrical energy transmission. These devices behave as strongly non linear loads, whose behavior depends on their topology and structure, but also on the impedance of the supply network and on other possible parallel loads fed by the same network. In order to correct this situation, we can modify the loads (which will not always be a possible solution) or we can introduce filters, usually connected in parallel with the loads, to reduce harmonic propagation to the supply network. These filters can be active or passive. This thesis is devoted to study the most suitable topology and control methods of parallel active filters. It also analyses the filters behavior when they are connected to the mains.

More specifically, the thesis is focused on hybrid filters, coupled to the mains by means of LC passive filters. The main contributions of the thesis, all of them supported by publications, are explained below:

a) Contribution concerning filter topology: Various filter topologies show several problems which are explained in detail on the memory document. Hybrid filters coupled to the mains by passive LC filters are analyzed in the thesis and a new topology called "Neutral to Negative" (NtN) is proposed. This topology uses only one capacitor in the DC bus and therefore avoids the problem of the DC bus balance requirement, characteristic of VSI with DC bus split capacitors topologies.

b) Contributions concerning control and PWM modulation techniques: In these area the contributions are concentrated in two features:

b1) A new current decomposition based on a vector split up using two unit vectors shifted 60° , instead of the classical decomposition using $\alpha\beta$ orthogonal transformation. Such decomposition considerably simplifies obtaining the VSI states in case of three wire systems (without neutral).

b2) A new feed forward current controller, using time domain techniques, which has been developed to track current. The method can be used in three or four-wire mains.

c) New Technique for leading current control in hybrid filters: A new method to reduce leading current in low load conditions has been developed. This method regulates the available voltage across coupling capacitors in order to obtain the necessary di/dt . The method optimizes the filter behavior without losing filter features.

d) Contribution to non linear loads modeling: The insertion of harmonics filters in power lines changes the behavior of non-linear-loads (NLL) and produce harmonic amplification problems, as described in the last chapter. This chapter is devoted to obtain a NLL model in order to predict the load response when a filter is introduced. A model based in Neural Networks (NN) has been developed. This model is obtained by training the NN using a set of harmonics data, (V_h, I_h) , obtained at the point where the filter is going to be connected. This NN model has been completed with the use of an iterative method allowing the prediction of harmonic currents in the electric network when an active filter is connected.

CONTENIDO

Capítulo 1 Generalidades. Estado del Arte

1.1	Descripción del problema	1-1
1.2	Objetivos de la tesis	1-4
1.3	Topologías de filtros. Híbridos no híbridos	1-5
1.4	Discusión y elección del tipo de filtro	1-12
1.5	Resumen.....	1-13

Capítulo 2 Filtro Híbrido Paralelo

2.0	Introducción	2-1
2.1	Estructura de filtro híbrido de 4 hilos	2-4
2.2	Limitaciones de la estructura clásica.....	2-6
2.3	Nueva estructura "Neutro a Negativo" (NtN)	2-8
2.3.1	Elección del circuito LC de acoplo	2-11
2.4	Estructura del filtro híbrido 3 hilos	2-14
2.5	Nueva propuesta de modelo vectorial.....	2-16
2.6	Esquema unifilar equivalente del filtro de 3 hilos.....	2-17
2.7	Conclusiones.....	2-19
2.8	Aportaciones	2-19

Capítulo 3 Control del Filtro Híbrido Paralelo

3.0	Introducción	3-1
3.1	Control en lazo abierto o en lazo cerrado del FA.....	3-2
3.2	Obtención de consignas de corriente	3-4
3.3	Obtención de consignas: Métodos Temporales vs. Frecuenciales	3-4
3.3.1	Aplicación de PLL.....	3-6
3.3.2	Filtros de ventana adaptable.....	3-10
3.3.3	Obtención de la potencia activa.....	3-16
3.4	Control del filtro híbrido de 4 hilos con N a negativo	3-18
3.5	Control del filtro híbrido 3 hilos	3-23
3.6	Simulación del comportamiento del Filtro Híbrido.....	3-25
3.7	Resultados experimentales del Filtro Híbrido	3-30

3.8	Conclusiones.....	3-34
3.9	Aportaciones	3-35
Capítulo 4 Mejora del Filtro Híbrido con estructura NtN		
4.0.	Introducción	4-1
4.1.	Presentación del método	4-1
4.2.	Simulación del comportamiento del filtro híbrido con reducción de reactiva	4-6
4.3.	Resultados experimentales del Filtro Híbrido	4-7
4.4.	Conclusiones.....	4-11
4.5.	Aportaciones	4-12
Capítulo 5 Aplicación de los Filtros Activos: Modelado de cargas.		
5.0	Introducción	5-1
5.1	Variación de la corriente de carga al filtrar	5-2
5.2	Fenómeno de amplificación de armónicos	5-3
5.3	Modelado de las cargas no lineales	5-11
5.4	Aplicación de las redes neuronales	5-14
5.5	Resultados de simulación	5-26
5.6	Resultados de simulación al incluir el FA	5-39
5.7	Resultados experimentales	5-42
5.8	Conclusiones.....	5-50
5.9	Aportaciones	5-51
Aportaciones y Futuros Trabajos		A-1
Referencias		R-1

CAPÍTULO 1

Generalidades. Estado del Arte

1.1 Descripción del problema

La proliferación de equipos electrónicos, que se comportan como cargas no lineales, conectados a la red, provocan multitud de problemas de distorsión armónica y una reducción de la eficiencia en la transmisión de la energía eléctrica.

Dichos equipos consumen corrientes de forma no senoidal, con distinto contenido armónico en función de los distintos tipos de cargas (por ejemplo en rectificadores monofásicos el tercer armónico es muy importante mientras que en rectificadores trifásicos no aparece). Estas corrientes armónicas causan sobrecarga del sistema de distribución ya que aumenta la corriente eficaz que debe circular por las líneas, para suministrar la misma potencia activa. Si además combinamos este efecto con el hecho de que la impedancia de líneas y transformadores no es nula y en ocasiones puede ser elevada provocan distorsión de la tensión de alimentación, que afecta a todas las cargas que comparten la línea. Por todo ello, la reducción de los armónicos de corriente en las líneas de alimentación de baja tensión se ha convertido en un problema, que se intenta solucionar con la colocación de filtros y procurando, en lo posible, reducir las impedancias de las líneas de distribución. Asimismo, se procura alimentar las cargas distorsionantes con tramos de línea independientes para que no compartan impedancias en común.

Tanto en Europa como en Estados Unidos se han introducido Normas Regulatoras que restringen la emisión de armónicos de corriente. Estos estándares son básicamente

el IEC 61000-3-2 / IEC 61000-3-4 , 61000-3-12 para Europa i el IEEE 519-1992 [CENELEC/IEC] para Estados Unidos.

Para mejorar la situación, existen dos alternativas: modificar el diseño de los equipos (cargas) que generan las perturbaciones o modificar la red para reducirlas. La mejor solución sería la combinación de ambas, pero también lógicamente la más cara.

La primera alternativa parecería la más adecuada ya que se eliminaría el problema desde la raíz, y en ciertos campos ya se está aplicando. La solución consiste básicamente en controlar las cargas como cargas con Factor de Potencia Unitario (UPF, Unit Power Factor). Sin embargo, la eliminación total de las perturbaciones, implicaría la sustitución de los equipos ya existentes con el coste económico asociado. Incluso suponiendo que el coste económico de la sustitución fuese aceptable, en algunos casos se podría reducir la fiabilidad de los equipos [Akagi, 2006] [Tangtheerajaronwong et al 2006].

Atendiendo a la segunda alternativa, uso de filtros, las soluciones posibles se pueden dividir en dos tipos: activas o pasivas.

Los filtros pasivos hace ya más de tres décadas que se vienen aplicando, pero presentan una serie de problemas que, básicamente, se pueden reducir a su incapacidad de adaptarse, en cada instante, a las condiciones cambiantes de la red y de la carga, donde se encuentran conectados.

Dentro de las soluciones activas, una de las soluciones implementadas los últimos años es la utilización de Filtros Activos de Potencia (APF "Active Power Filters") [Akagi 2005]. De hecho la primera publicación en la que se propone un APF de forma práctica es [Akagi, Kanazawa y Nabae 1984]. Estos Filtros Activos (FA) se pueden utilizar en solitario, o combinados con otros dispositivos como son: Filtros Pasivos, Sistemas para la compensación del $\cos \phi$, para el equilibrado de fases, o para la regulación de la tensión.; formando lo que se ha llamado Acondicionadores Activos de Líneas de Alimentación (APLC "Active Power Line Conditioners") Figura 1-1.

El término APLC es mucho más que un filtro de armónicos ya que incluye la eliminación de los armónicos, el control del factor de potencia, la regulación de la tensión y el equilibrado de las fases.

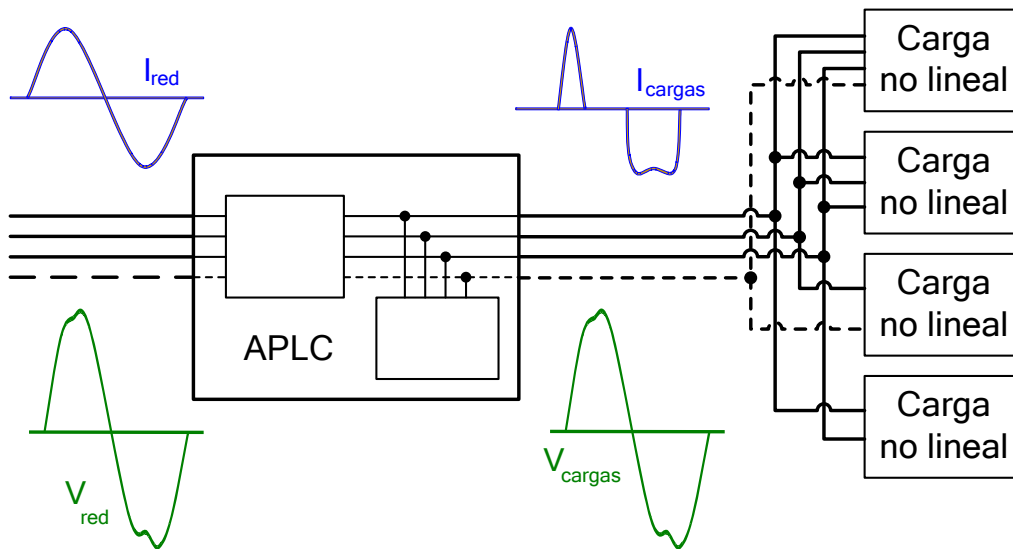


Figura 1-1 Acondicionador activo de líneas de alimentación (APLC)

Un par de ejemplos de aplicación donde se puede mantener la carga perturbadora y se aplican filtros externos son: Primer caso, un rectificador controlado para un sistema de alimentación en CC de una planta. Esta red de CC alimenta diversas cargas, entre ellas, onduladores conectados a motores asíncronos. La potencia de la red de CC puede ser del orden de 2MW. Este proceso de rectificación controlada se puede realizar mediante SCR (tiristores) o mediante rectificadores PWM a base de IGBT. Si se utilizan los tiristores clásicos, el control del ángulo de disparo por control de fase genera una gran cantidad de armónicos de corriente; en cambio si se utilizan IGBT, con técnicas de control y estructuras del convertidor adecuadas, se puede conseguir que la corriente absorbida de la red sea prácticamente senoidal. Los pros y contras son que los sistemas basados en tiristores tienen una alta fiabilidad y soportan mejor las sobrecargas, pero generan gran cantidad de armónicos, mientras que los sistemas basados en rectificadores conmutados son menos robustos y más caros, pero prácticamente no generan armónicos. Por ello, algunos fabricantes aconsejan instalar rectificadores basados en tiristores y añadir un elemento externo de filtrado. De esta forma se garantizaría la robustez; y gracias al filtro se reducirían los armónicos de corriente generados. Pese a que estos fabricantes proponen la instalación de un FA, al tratarse de una sola carga (un único motor), sería más fácil y fiable dimensionar e instalar un filtro pasivo LCL adaptado a esta carga.

Un segundo caso sería el de varias cargas (rectificadores) conectadas a una misma línea. En este caso se podría optar por rectificadores PWM con IGBT o puentes rectificadores con diodos. Al igual que en el ejemplo anterior para garantizar la máxima

robustez y fiabilidad sería más adecuado la segunda alternativa, añadiendo elementos de filtrado adicionales en la línea. Pero en este caso, al tratarse de varias cargas sería más adecuado utilizar un FA único en lugar de diversos filtros LCL (uno por carga). El FA se puede adaptar a las distintas condiciones de consumo de las distintas cargas y a la vez se mantiene la robustez y fiabilidad de los rectificadores con diodos. La fiabilidad estaría garantizada ya que el componente menos robusto, en este caso el FA, incluso si se produjera un fallo eventual, no provocaría una parada del sistema, simplemente solamente se estaría ensuciando la red mientras no se procediera a su reparación/sustitución.

Si se toma como objetivo principal la reducción de los armónicos, y básicamente los armónicos de baja frecuencia, el sistema que presenta una mejor relación entre sus ventajas (mejora de eficiencia energética en el transporte, reducción de perturbaciones, ...) e inconvenientes (coste, complejidad, fiabilidad, ...) es el filtro activo paralelo.

Cuando se pretende reducir perturbaciones mediante un Filtro Activo Paralelo, además de tener en cuenta el propio Filtro (su estructura, algoritmos de control, ...) es importante analizar los problemas que presenta su instalación en un punto de la red y cómo interaccionará el filtro con la red y con los distintos elementos que estén conectados a la misma.

1.2 Objetivos de la tesis

En esta tesis se pretende investigar sobre topologías de filtros activos híbridos tipo paralelo. Se pretende hacer aportaciones para conseguir una estructura de FA con un bajo coste relativo, pero que a su vez permita que sus prestaciones no se vean comprometidas y solucionar el problema de exceso de inyección de reactiva a baja carga, inherente a este tipo de filtros.

En el estudio de los filtros activos paralelo hay varios puntos clave, en los cuales esta tesis pretende hacer algunas aportaciones y que se indican a continuación:

1. Estructura del propio filtro. En particular se estudiarán distintas alternativas de acoplo a la red y distintos métodos de regulación de la potencia reactiva inyectada a la misma.
2. Obtención de la consigna de corriente. Estudiar distintas técnicas de obtención de las consignas de corriente necesarias para el funcionamiento del filtro activo, analizando los pros y contras de distintas técnicas frecuenciales y

temporales y la posibilidad o no de que el filtro activo elimine los armónicos de forma selectiva.

3. Diseño del regulador de corriente. 'Para un filtro activo, el regulador de corriente debe ser capaz de seguir perturbaciones de alto di/dt . En general para las frecuencias habituales de conmutación, el regulador de corriente debe responder en tiempos inferiores a los $100\mu s$. Todo esto hace que el diseño del regulador de corriente suele ser otra parte crítica del Filtro Activo. En este punto se propone una nueva técnica de modulación para seguimiento rápido de la consigna de corriente; desarrollada para trabajar con redes de 3 y 4 hilos.
4. Finalmente, en esta tesis se dedicará también una especial atención a los problemas de aplicación trabajando en el análisis del comportamiento del sistema compuesto por el propio filtro activo y la red de distribución donde se encuentra conectado. En particular se pretende prestar atención al problema de aumento de armónicos absorbidos por la carga cuando se filtran dichos armónicos con un filtro paralelo. El problema es especialmente importante, cuando se conecta un filtro activo en una parte de la red de distribución con una impedancia de cortocircuito elevada (lo que se ha venido en llamar una red "blanda").

1.3 Topologías de filtros. Híbridos no híbridos

Los FA se pueden clasificar en filtros serie y filtros paralelos [Akagi 2005]. Los filtros serie son más adecuados para mejorar la forma de onda de la tensión en el lado de la carga. La principal función de un filtro paralelo es mejorar la forma de la onda de la corriente en el lado de la red (Figura 1-2), lo que implica aumentar el factor de potencia y reducir las pérdidas en los sistemas de distribución.

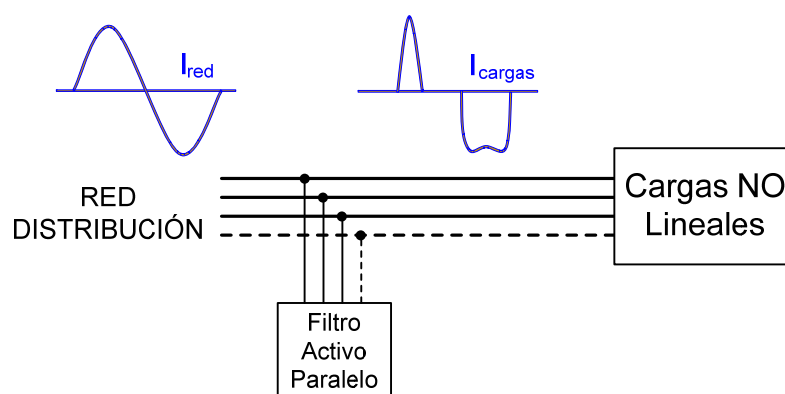


Figura 1-2 Conexión de un Filtro Activo Paralelo

Evidentemente se pueden combinar las dos estructuras (serie y paralelo) para obtener ambas mejoras. Sin embargo, a topología más utilizada a nivel práctico es la de FA paralelo. Sus prestaciones adaptabilidad y tamaño los hacen claramente superiores a los Filtros Pasivos, formados por circuitos LC sintonizados a frecuencias concretas. Estos FA paralelo, además de eliminar los armónicos, permiten también eliminar el desequilibrio entre fases y compensar el $\cos \varphi$.

Otra posibilidad es la combinación de filtros activos y pasivos, normalmente denominados híbridos. Existe un amplio abanico de estas combinaciones. A modo de ejemplo se muestran diversos ejemplos en las figuras: Figura 1-3 a Figura 1-5. Las topologías más representativas y empleadas son la de un filtro pasivo paralelo más un filtro activo serie o paralelo.

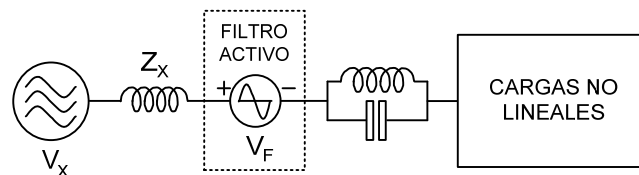


Figura 1-3 Filtro híbrido serie formado por la combinación de dos filtros serie, uno activo y uno pasivo

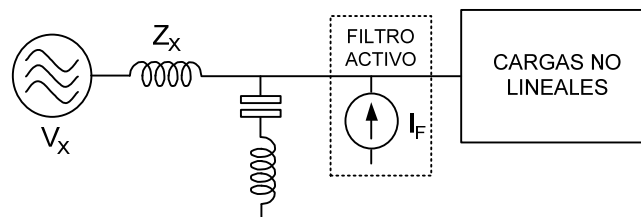


Figura 1-4 Filtro híbrido paralelo, formado por la combinación de dos filtros paralelos, uno activo y uno pasivo.

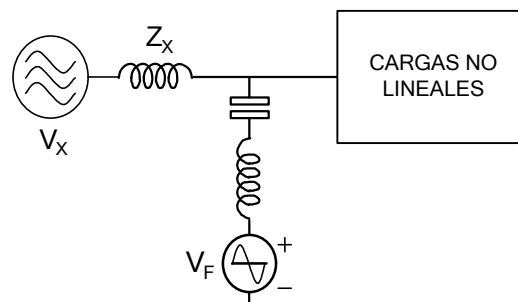


Figura 1-5 Filtro híbrido paralelo, formado por la combinación de un activo y un pasivo en serie

Atendiendo al tipo de inversor utilizado, los FA paralelo se pueden implementar a partir de un circuito inversor en forma de fuente de corriente (CSI “Current Source Inverter”) [Salo y Tuusa 2005] (Figura 1-6) o en forma de fuente de tensión (VSI “Voltage Source Inverter”) (Figura 1-7). En el primer caso la energía se almacena en bobinas mientras que en el segundo se almacena en condensadores. El almacenamiento de energía en bobinas no es muy eficiente, salvo en el caso de bobinas superconductoras. La

utilización de bobinas superconductoras implica un coste elevado de fabricación y de operación (temperaturas cercanas al cero absoluto), por lo que la estructura más habitual de un FA paralelo está basada en los Inversores de tensión VSI.

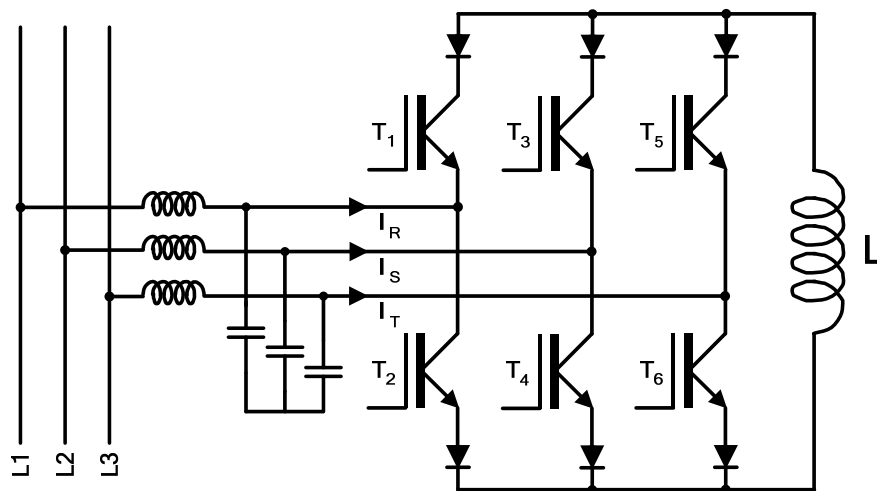


Figura 1-6 Filtro activo trifásico con un Inversor corriente CSI

Para que trabajen como fuente de corriente, estos VSI, se conectan a la red a través de unas inductancias (Figura 1-7) y se recurre al control en lazo cerrado para que se comporten como fuente de corriente controlada o como una impedancia variable en función de la frecuencia.

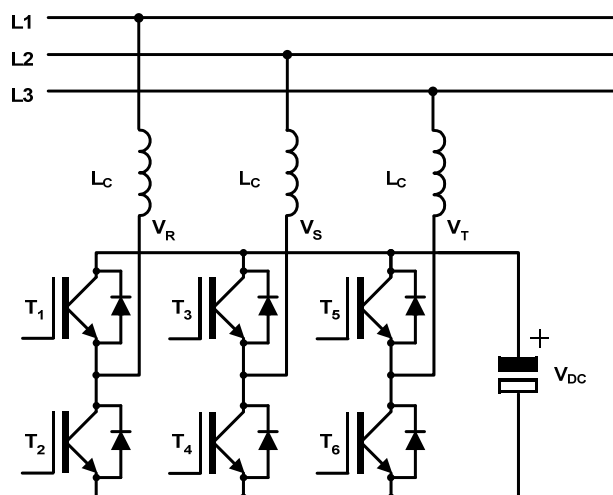


Figura 1-7 Filtro activo trifásico con un Inversor de Tensión VSI

Para permitir la eliminación de las perturbaciones en una red trifásica con neutro la solución más genérica es emplear VSI de cuatro ramas (Figura 1-8). Este tipo de solución es relativamente cara ya que los convertidores habituales (utilizados en sistemas de control de motores), son de tres ramas. Por tanto un VSI de cuatro ramas se debe construir a medida con un incremento de coste considerable. Además si se pretende compensar el tercer armónico; donde la mayor parte de las cargas son

monofásicas; la cuarta rama (T_7 y T_8) debe dimensionarse para controlar más corriente que las otras tres. En redes domésticas y de oficinas el tipo de carga más habitual son las cargas monofásicas conectadas entre una fase y el conductor neutro.

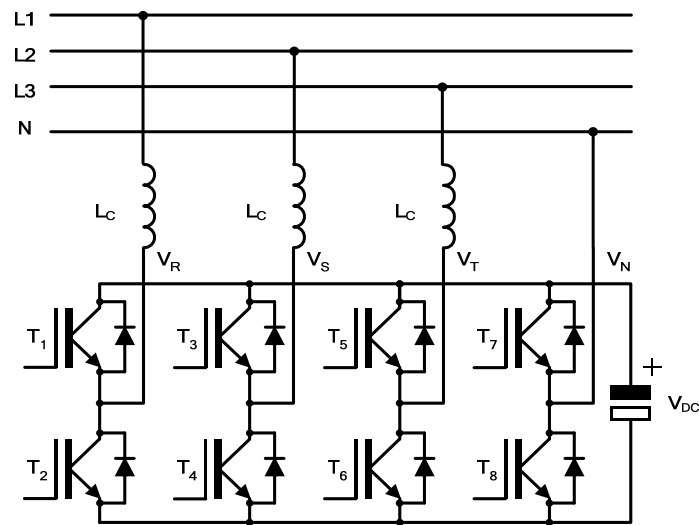


Figura 1-8 Filtro activo basado en un VSI de cuatro ramas

Para resolver el problema del convertidor de cuatro ramas, se han propuesto diversas soluciones como por ejemplo:

1) Bus de continua con condensador partido, y con la conexión del neutro en el punto medio del bus (Figura 1-9). De esta forma se pueden utilizar inversores de tres ramas de tipo estándar.

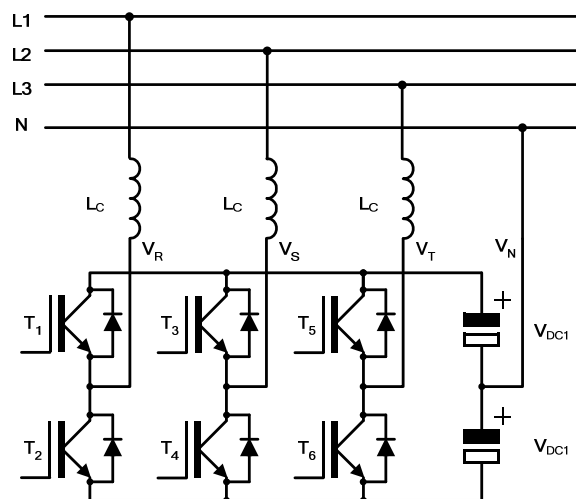


Figura 1-9 Filtro activo basado en un VSI de tres ramas y condensador partido

2) Convertidor de cuatro ramas y condensador partido [Rodríguez 2005]. Donde la función de la cuarta rama es el equilibrado de las tensiones de ambos condensadores (Figura 1-10). Utilizando esta estructura las cuatro ramas pueden ser del mismo tipo. La función de la cuarta rama es el equilibrado de la tensión de los condensadores.

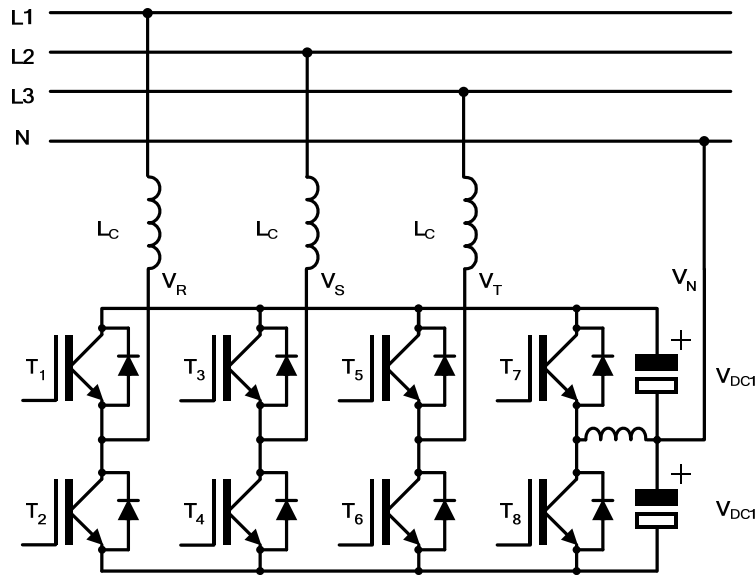


Figura 1-10 Filtro activo basado en un VSI de cuatro ramas y condensador partido

Si el FA solo debe eliminar los armónicos, sin corregir el $\cos \phi$ ni equilibrar las fases, habitualmente es posible utilizar convertidores de menor potencia y costo. En este caso la solución formada por un puente de tres ramas y la conexión del neutro al punto medio del bus de continua (Figura 1-9) es la más adecuada desde un punto de vista económico y existen varios FA comerciales basados en ella.

Sin embargo, si se utiliza esta estructura, se deben tener en cuenta ciertas limitaciones. En primer lugar el circuito de control debe garantizar que la tensión en ambos condensadores permanece equilibrada; y en ciertos momentos, esta condición, puede oponerse a la necesidad de inyección de armónicos del APF. En segundo lugar, cuando la tensión del VSI no incorpora componente homopolar, el puente no aprovecha totalmente la tensión del bus DC [Rodríguez 2005]. Y por último, la tensión homopolar no es independiente de la tensión de salida de las tres fases. Por ejemplo, si se pretende obtener la máxima tensión homopolar, la tensión entre fases del convertidor deberá ser nula.

Un problema importante que presenta la utilización de estructuras formadas por un VSI acoplado a la línea mediante bobinas, es que la tensión del bus de continua de este, ha de ser superior a la tensión de pico máxima de la red a la que está conectado. Esto es necesario para poder inyectar corriente hacia la red en cualquier instante del ciclo. Se puede justificar también esta necesidad, teniendo en cuenta que el sistema actúa como un convertidor elevador y que por lo tanto solo se puede controlar la corriente, si la tensión del bus es superior a la de red. También debe tenerse en cuenta que para permitir elevadas pendientes en la corriente inyectada por el FA (situación muy normal si se deben inyectar armónicos) es necesario que la tensión del bus sea bastante

mayor que la máxima en la red. En consecuencia la tensión del bus, desde un punto de vista práctico, debe ser del orden de un 40-50% mayor que el pico de red; y por tanto los semiconductores del puente han de soportar tensiones superiores a las utilizadas en aplicaciones habituales de control de motores (“drivers”). Es decir, mientras que en un driver para motores, el bus de continua del VSI trabaja con una tensión inferior a los 600V, en el caso de un FA aplicado a redes de alimentación de baja tensión (380/400V), esta tensión debe ser de al menos 800/850V. Esto implica la utilización de semiconductores que soporten tensiones de ruptura superiores a los que se utilizan habitualmente en el control de motores, y por lo tanto de peor relación precio/prestaciones.

Esta necesidad de trabajar con elevadas tensiones del bus de continua ha llevado a que se propongan diversas alternativas como son:

- 1) La conexión de varios convertidores en serie, de forma que la tensión total necesaria se divida por el número de convertidores [Ortuzar et al. 2006] (Figura 1-11). Esta solución plantea diversos problemas en primer lugar desde un punto de vista económico: el coste y desde un punto de vista técnico: mantener el equilibrado de la energía almacenada por cada convertidor.

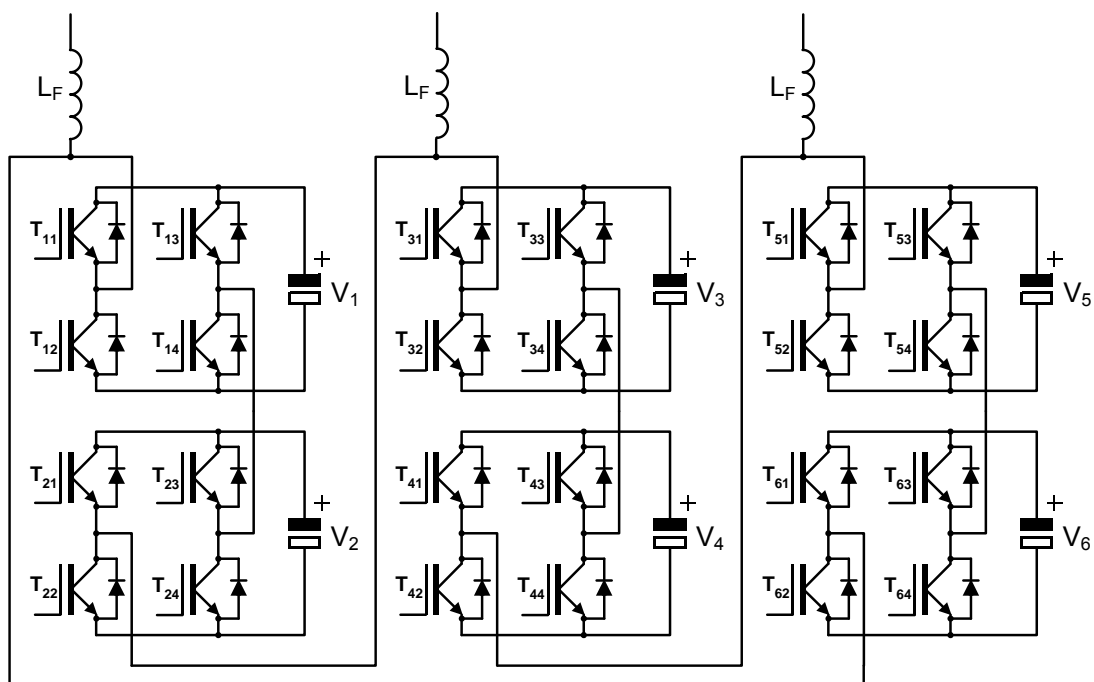


Figura 1-11 Filtro activo multinivel formado por la combinación de múltiples inversores monofásicos

- 2) Conexión a la red a través de un transformador elevador [Changzheng et al. 2005] (Figura 1-12). Esta solución implica un incremento de volumen, peso y precio considerables.

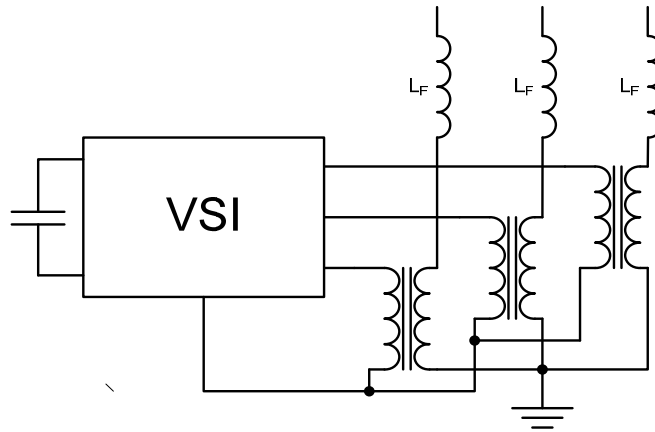


Figura 1-12 Filtro paralelo con VSI acoplado mediante transformador

- 3) Soluciones basadas en la utilización de VSI multinivel [Lin y Yang 2005], como los del tipo “diode clamped” de tres niveles de la Figura 1-13; o del tipo “flying capacitor” [Lin y Huang 2006]. Esta solución, permite utilizar semiconductores con tensiones de ruptura de valor mitad (en el caso del VSI de tres niveles) que en el caso de los VSI clásicos de dos niveles y a su vez permite reducir el rizado de la corriente del filtro y/o reducir el tamaño de las bobinas de acoplamiento. A cambio, aumenta significativamente el número de dispositivos de potencia utilizados y complica el sistema de modulación del puente; encareciendo el APF resultante.

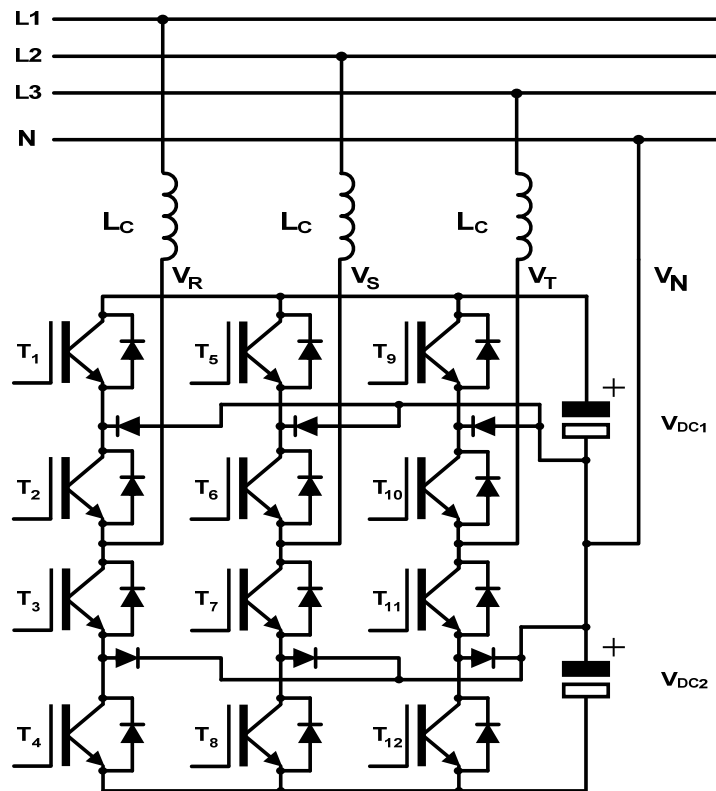


Figura 1-13 Filtro paralelo con VSI multinivel del tipo "diode clamped"

En algunas propuestas de APF para líneas de media tensión, donde las tensiones de bus deberían ser muy superiores, se han presentado soluciones de FA híbridos [Inzunza y Akagi 2005] [Srianthumrong y Akagi 2003], donde se combinan filtros activos y pasivos. En estos FA híbridos se intenta obtener unas prestaciones similares a las de un FA convencional; reduciendo la tensión del bus en el VSI y por lo tanto reduciendo el coste final del sistema. En la referencia [Akagi, Srianthumrong y Tamai 2003] se comparan las prestaciones de un FA de tres hilos, “puro” con uno híbrido en aplicaciones de media tensión.

1.4 Discusión y elección del tipo de filtro

Al ser el objetivo principal de esta tesis el estudiar cómo reducir los armónicos de corriente de baja frecuencia la mejor opción es la utilización de un filtro activo paralelo. Este tipo de FA deberá trabajar como una fuente de corriente y debe poder inyectar corriente a la red en cualquier instante de un ciclo de tensión; incluso cuando esta pasa por el máximo positivo o negativo. Es más, con las cargas no lineales que habitualmente se conectan a la red (rectificadores con diodos) el FA paralelo deberá inyectar la mayor parte de la corriente precisamente cuando la tensión de la red es máxima.

Los inversores de corriente, Figura 1-6, pueden, en teoría, inyectar corriente sea cual sea la tensión de la línea; sin embargo, la necesidad de utilizar bobinas como elemento de almacenamiento de corriente hace que sean inviables desde un punto de vista práctico. Por otro lado los inversores de tensión, como se ha explicado en el apartado anterior, presentan el problema de la tensión necesaria en el bus de continua.

Si se combina un inversor de tensión con un filtro pasivo, en ciertos casos, es factible reducir la tensión del bus de continua del inversor y mantener la posibilidad de inyectar corriente, incluso cuando la tensión de red pasa por su valor máximo. La estructura seleccionada es la conexión en serie de un filtro activo y uno pasivo que a su vez estarán conectados en paralelo a las cargas perturbadoras (Figura 1-5). Esta estructura permite que parte de la tensión de red caiga en el filtro pasivo y por tanto la tensión máxima que debe presentar el inversor de tensión pueda ser inferior a la tensión máxima de red.

Los únicos inconvenientes importantes que presenta la utilización del filtro híbrido mencionado anteriormente [Akagi, Srianthumrong y Tamai 2003], es que no permite la compensación del $\cos \varphi$, y que inyecta una corriente capacitiva constante. Sin

embargo, tal como se justifica en otras referencias [Dixon et al. 2003] es más ventajoso (económicamente hablando) compensar el $\cos \varphi$ utilizando otras soluciones, tales como, bancos de condensadores.

En adelante con la denominación de filtro híbrido, se hará referencia exclusivamente a la combinación de filtros activo y pasivo conectados entre sí en serie y conectados a su vez en paralelo con la carga (Figura 1-5).

1.5 Resumen

La topología más habitual para la reducción de armónicos en la red es el filtro paralelo. La implementación de este tipo de filtros presenta algunos obstáculos/problemas. Desde un punto de vista del convertidor de potencia, la tensión del bus de continua del convertidor tiene que ser bastante superior a la tensión de pico de la red y por otro lado, en redes trifásicas con neutro, no existe una solución ideal para la conexión de este último al convertidor. Desde el punto de vista del control, existen distintos criterios sobre cuál debe ser la corriente entregada por el filtro y como obtenerla. Por último al introducir el filtro activo en una instalación, este puede alterar la generación de armónicos en las cargas alterando el funcionamiento previsto de la instalación.

Puntos Clave en donde esta tesis pretende hacer algunas aportaciones;

1. Estructura o topología del propio filtro. En particular se estudiarán distintas alternativas de acoplo a la red y distintos métodos de regulación de la potencia reactiva inyectada a la misma.
2. Obtención de la consigna de corriente. Distinguiendo entre métodos temporales y frecuenciales y aquellos que permiten eliminación selectiva de armónicos frente a los que no lo permiten.
3. Diseño del regulador de corriente. Para un filtro activo, el regulador de corriente debe ser capaz de seguir perturbaciones de alto di/dt . En este punto se propone una nueva técnica de modulación para seguimiento rápido de la consigna de corriente, desarrollada para trabajar con redes de 3 y 4 hilos.
4. Finalmente, en esta tesis se dedicará también una especial atención a los problemas de aplicación trabajando en el análisis del comportamiento del sistema compuesto por el propio filtro activo y la red de distribución donde se encuentra conectado. El problema es especialmente importante en las

denominadas "redes blandas", es decir aquellas con una impedancia interna apreciable.