

A Margui y Pablo

Resumen

Este trabajo se dedica a la búsqueda de soluciones que permitan mejorar el comportamiento de los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de cuatro hilos, incluso cuando se den condiciones adversas en las tensiones de la red, o en las corrientes solicitadas por la carga.

En el análisis de los acondicionadores de potencia, el cálculo de la potencia instantánea en condiciones no sinusoidales es una materia fundamental. A día de hoy, no existe una teoría universal que unifique el cálculo de las componentes de la potencia instantánea y de la corriente. En este trabajo, se realiza un estudio detallado en este campo, evidenciando la relación entre las diferentes teorías existentes, y proponiendo una nueva formulación que ofrece un mayor significado físico a las componentes de potencia y de corriente resultantes.

En la sincronización de sistemas electrónicos de potencia que trabajan conectados a líneas de potencia, el conocimiento de la componente de secuencia positiva y frecuencia fundamental de la tensión de red es una cuestión de vital importancia. Este trabajo presenta un nuevo sistema de detección que obtiene, de forma rápida y precisa, la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión de red, incluso cuando esta tensión se encuentre fuertemente distorsionada y desequilibrada.

Un convertidor estático, conocido como inversor, constituye el núcleo de un filtro activo de potencia. Las prestaciones finales del sistema de filtrado vienen determinadas en gran medida por la tecnología empleada en este inversor, por su topología, por la técnica de modulación implementada, y por las características del sistema de control que regula las variables de salida del mismo. Este trabajo propone una topología alternativa para el inversor, aplicable a acondicionadores activos de redes trifásicas de cuatro hilos, que permite un control sencillo, y que elimina los problemas que presentan otras topologías cuando inyectan corrientes de secuencia homopolar en la red. Así mismo, se propone un nuevo enfoque en la modulación vectorial de los inversores en puente completo, de tres y cuatro ramas. La técnica propuesta aporta mayor significado físico en la síntesis de las tensiones de salida del inversor, y permite obtener un algoritmo de modulación sumamente eficiente que puede ser implementado en un procesador de bajo coste.

Finalmente, este trabajo ofrece un nuevo punto de vista en el cálculo de las corrientes de referencia del filtro activo de potencia. Un análisis de las solicitaciones de potencia que se realizan sobre el filtro activo, cuando trabaja bajo condiciones genéricas de tensión de red y corriente de carga, permite diseñar un sistema de control que emplea un enfoque energético para el cálculo de las referencias de corriente del mismo. Este control energético aumenta la robustez del filtro activo de potencia cuando se producen súbitas variaciones en las condiciones del entorno.

Abstract

The aim of this work is to find solutions in order to improve the behavior of shunt active power filters in three-phase four-wire power systems, even if adverse conditions are present in the utility voltages or in the load currents.

The calculation of the instantaneous electrical power under non-sinusoidal conditions is the basis in the analysis of power conditioners. At present, there is not a universal theory that unifies the calculation of the instantaneous power and current components. In this work, a detailed study on this field is conducted, showing the relationship between the different conventional theories, and proposing a new formulation, which offers a greater physical meaning for the calculated power and current components than in previous theories.

Knowledge about the positive-sequence fundamental-frequency component of the utility voltage is a crucial matter in the synchronization of power electronics systems connected to the utility. This work presents a new detection system, which obtains, quickly and accurately, the positive-sequence fundamental-frequency utility voltage, even if the utility voltage is severely distorted and unbalanced.

A static converter, known as inverter, is the core of an active power filter. The potentialities of the filtering system are greatly affected by the technology of this inverter, by its topology, by the modulation technique, and by the characteristics of the control system that regulates the output variables of the inverter. This work proposes an alternative inverter topology, suitable for active conditioners working in three-phase four-wire systems, which allows a simple control and solves the problems shown by other topologies when zero-sequence currents are injected in the utility. Also, a new approach on the space vector modulation of three- and four-leg full-bridge inverters is proposed. This technique offers more physical meaning than previous techniques in the synthesis of the inverter output voltages, and gives rise to a very efficient algorithm, which can be implemented in a low-cost processor.

Finally, this work offers a new standpoint in the calculation of the reference currents of the active power filter. When the active power filter operates under generic utility voltages and load currents, an analysis of the instantaneous power flow gives rise to a new control system, which employs an energy approach in the reference currents calculation. This energy control increases robustness of the active power filter when sudden variations appear in the contour conditions.

Agradecimientos

Los trabajos que han dado lugar a esta Tesis doctoral en Ingeniería comenzaron allá por el año 1996. En todo este tiempo, ha habido momentos de entusiasmo y de apatía, de dedicación y de abandono, de lucidez y de obcecación, sin embargo, siempre ha existido alguna persona que, mediante sus sabios consejos, o su inestimable colaboración, ha permitido que este trabajo pueda ser finalmente presentado.

No es posible citar a todas esas personas en esta pequeña reseña, lo cual no implica que su ayuda haya caído en el olvido. A todas ellas, mi más sincero agradecimiento.

Quiero expresar mi gratitud al director de esta Tesis, el Dr. Joan Bergas Jané, quién asumió la dirección de este trabajo en los últimos tres años. Su correcta orientación y planificación han garantizado la satisfactoria conclusión de esta Tesis.

Debo dar especialmente las gracias al Dr. Rafael Pindado Rico y al Dr. Josep Pou Felix. Las prolongadas discusiones técnicas, la búsqueda de nuevos planteamientos, y los buenos ratos, han marcado la tónica de nuestra relación en este trabajo.

Cómo no dar las gracias a mi colega y compañero de despacho, Iñaki Candela García. Sus críticas constructivas y sus valiosas ideas han permitido solventar más de un problema en el trabajo que aquí se presenta.

No podría acabar esta escueta lista de agradecimientos sin citar a mi esposa y a mi hijo, Margui y Pablo. Ellos han padecido mis ausencias, presenciales y no presenciales, y difícilmente han podido disfrutar de las conclusiones obtenidas en este trabajo. Sin embargo, siempre han estado ahí para compartir una sonrisa y llenar mi taza de café en las noches de estudio. A los dos, un fuerte beso.

Pedro Rodríguez Cortés
Barcelona, Enero de 2005

*¿Por qué esta magnífica tecnología científica,
que ahorra trabajo y nos hace la vida más fácil,
nos aporta tan poca felicidad?*

La respuesta es simple:

*Porque aún no hemos aprendido a
usarla de forma sensata.[§]*

Albert Einstein (1879-1955)

Físico alemán, nacionalizado
suizo y luego estadounidense.

[§] En un discurso en el California Institute of Technology, Febrero de 1931.

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Motivación, objetivos y sumario de esta Tesis	1
Motivación.....	2
Objetivos.....	4
Sumario.....	5
1. Introducción	9
1.1. El creciente interés en la calidad de potencia.....	11
1.2. Clasificación de las perturbaciones en la tensión y en la corriente.....	14
1.3. Efectos y origen de los armónicos de corriente	17
1.3.1. Efectos de los armónicos de corriente en sistemas de potencia	19
1.3.2. Elementos generadores de armónicos	21
1.3.3. Dos tipos de fuentes de armónicos.....	23
1.4. Normativa reguladora de la emisión de armónicos de corriente.....	24
1.4.1. Estándar IEC-61000-3-2.....	25
1.4.2. Estándar IEC-61000-3-4.....	27
1.4.3. Estándar IEEE 519-1992.....	30
1.5. Mitigación de los armónicos de corriente	32
1.5.1. Modificar la respuesta frecuencial del sistema de potencia	32
1.5.2. Reducir las corrientes armónicas generadas por la carga	33
1.5.3. Utilización de filtros de armónicos	38
1.6. Síntesis de conceptos fundamentales	55
1.7. Referencias del Capítulo 1	57
2. Potencia instantánea en sistemas trifásicos de cuatro hilos.....	59
2.1. Descomposición de corrientes y potencias.....	62
2.1.1. Origen de las definiciones de potencia en el dominio frecuencial.....	62
2.1.2. Origen de las definiciones de potencia en el dominio temporal	63
2.1.3. Origen de las corrientes activas en sistemas polifásicos	64

2.1.4. Origen del cálculo instantáneo de corrientes activas en sistemas polifásicos	66
2.1.5. Enfoque vectorial del sistema trifásico	68
2.1.6. Teoría $p-q$	70
2.1.7. Generalización de la teoría $p-q$ a sistemas con cualquier número de fases.	73
2.1.8. Teoría $p-q$ modificada	74
2.1.9. Teoría generalizada de la potencia reactiva instantánea en sistemas trifásicos.....	75
2.1.10. Teoría $p-q$ en coordenadas polares	77
2.1.11. Teoría $p-q-r$	79
2.2. Estudio de potencia instantánea en un sistema trifásico genérico	82
2.2.1. Corrientes de carga sin secuencia homopolar	83
2.2.2. Corrientes de carga exclusivamente homopolares.....	92
2.2.3. Corrientes de carga genéricas	94
2.3. El sistema de coordenadas $d-q-z$	100
2.4. Potencia instantánea en el dominio $d-q-z$	104
2.5. Estrategias de compensación en el dominio $d-q-z$	114
2.5.1. Valor colectivo de corriente asociado con cada estrategia de compensación.....	130
2.6. Influencia del conductor de neutro en las corrientes activas	132
2.7. Sistema trifásico equivalente en el dominio $a-b-c$	139
2.7.1. Compensación de corrientes en el lado de carga.....	146
2.8. Actualización de las estrategias de compensación en el dominio $d-q-z$	150
2.8.1. Valor colectivo ponderado de corriente en cada estrategia de compensación.....	162
2.9. Conclusiones.....	164
2.10. Referencias del Capítulo 2	167
3. Detección de tensiones de frecuencia fundamental y secuencia positiva	171
3.1. Caracterización de las tensiones de red	173
3.2. SRF-PLL frente a desequilibrios en la red.....	176
3.3. Detector basado en un DSRF-PLL.....	182
3.3.1. Desacoplo de señales en el DSRF.....	184
3.3.2. Estructura y comportamiento del DSRF-PLL.....	189
3.4. Detector basado en un MSRF-PLL	198
3.5. Conclusiones.....	202
3.6. Referencias del Capítulo 3.....	204
4. Convertidor estático del filtro activo de potencia	207
4.1. Topología del convertidor estático.....	209
4.2. Controlador de corriente.....	222
4.3. Inversor de cuatro ramas con condensador repartido	226
4.4. Modelo promediado en espacio de estado del SAPF.....	230
4.4.1. Control de la corriente inyectada en el modelo promediado	238
4.5. Control de corriente por histéresis de banda adaptativa en el inversor FLSC	244

4.6.	Control de tensión diferencial en el bus de continua del inversor FLSC.....	249
4.6.1.	Evolución de la tensión diferencial del bus de continua	250
4.6.2.	Controlador proporcional de la tensión diferencial del bus DC....	255
4.6.3.	Controlador proporcional-integral de la tensión diferencial del bus DC	257
4.6.4.	Simulación de los controladores de la tensión diferencial del bus DC	259
4.7.	Conclusiones	263
4.8.	Referencias del Capítulo 4	266
5.	Modulación vectorial tridimensional de inversores en puente completo.....	271
5.1.	PWM basado en portadora	273
5.2.	Modulación vectorial	278
5.3.	Sobremodulación.....	285
5.3.1.	Sobremodulación linealizada en Modo I	287
5.3.2.	Sobremodulación linealizada en Modo II	292
5.4.	El uso de las coordenadas $\alpha\text{-}\beta\text{-}\gamma$ en la modulación vectorial	297
5.5.	3D-SVM en coordenadas $a\text{-}b\text{-}c$ aplicada al inversor TLFB.....	299
5.5.1.	Algoritmo 3D-SVM aplicado al inversor TLFB.....	304
5.6.	3D-SVM en coordenadas $a\text{-}b\text{-}c$ aplicada al inversor FLFB.....	317
5.6.1.	Algoritmo 3D-SVM aplicado al inversor FLFB.....	322
5.7.	Modulación DPWM del inversor FLFB.....	326
5.8.	Control de corriente en el inversor FLFB utilizando 3D-SVM	328
5.9.	Conclusiones	332
5.10.	Referencias del Capítulo 5	336
6.	Control de la energía en el bus de continua.....	339
6.1.	Evolución de la tensión absoluta del bus de continua	341
6.2.	Evolución de la energía almacenada en el bus de continua.....	343
6.3.	Solicitaciones de potencia sobre el SAPF	345
6.4.	Control convencional del SAPF basado en la potencia de la carga	350
6.5.	Control energético del SAPF	354
6.5.1.	Mejora del controlador energético del SAPF	360
6.6.	Control de la máxima variación de energía en el bus DC.....	373
6.7.	Conclusiones	391
6.8.	Referencias del Capítulo 6	393
7.	Conclusiones, aportaciones y trabajos futuros	395
7.1.	Conclusiones generales de la Tesis	396
7.2.	Aportaciones.....	399
7.3.	Trabajos futuros.....	401
7.4.	Referencias del Capítulo 7	403
	Índice de figuras.....	407
	Índice de tablas	417

Motivación, objetivos y sumario de esta Tesis

La evolución de los dispositivos semiconductores de potencia, unida al avance de los procesadores digitales de señal, ha permitido, entre otras cosas, el desarrollo de una nueva generación de sistemas electrónicos de potencia, denominados genéricamente *acondicionadores activos*, que tienen como objetivo la mejora de la *calidad de potencia* en los sistemas eléctricos. La calidad de potencia es un concepto amplio que permite evaluar la idoneidad de las formas de onda de tensión y corriente de un sistema eléctrico para conseguir un funcionamiento compatible de todos los equipos que lo constituyen.

Una de las aplicaciones de los acondicionadores activos es la compensación armónica de la corriente solicitada por la carga, apareciendo diferentes tipos de sistemas, entre los que destacan los *filtros activos de potencia en derivación* (SAPF – *Shunt Active Power Filters*). El SAPF se conecta en paralelo a la carga, y su principio de funcionamiento es relativamente simple, debiendo inyectar en la red aquellas componentes de corriente que hagan que la corriente resultante en el lado de fuente sea óptima. Como demuestran los sucesivos trabajos que aparecen en las publicaciones técnicas relacionadas con este tema, esta aparente simplicidad se desvanece cuando se consideran condiciones generales en las tensiones de red y en la composición de la carga, sobre todo en sistemas de cuatro hilos, o cuando se persigue mejorar la respuesta estática y dinámica del SAPF.

Este trabajo aborda varios aspectos clave del diseño y control de SAPF's que trabajan en redes trifásicas de cuatro hilos. En él se profundiza en la definición de la teoría de potencia instantánea que sirve como fundamento de la estrategia de compensación armónica; se exploran las posibilidades de los inversores en fuente de tensión aplicables a redes trifásicas de cuatro hilos, estudiando tanto su topología, como su modulación; y se replantea el sistema de control del SAPF desde un punto de vista energético. Las conclusiones obtenidas en este trabajo no sólo son aplicables a SAPF's, sino que pueden ser extendidas a otros tipos de acondicionadores activos.

Motivación

La principal motivación que da pie a este trabajo es la necesidad de encontrar soluciones que permitan optimizar el diseño y control de los acondicionadores activos de potencia en sistemas trifásicos de cuatro hilos para que resulten más eficientes, incluso cuando trabajan bajo condiciones adversas de tensión y corriente.

En un sistema trifásico de cuatro hilos, donde exista distorsión y desequilibrio tanto en las tensiones de red, como en las corrientes solicitadas por las cargas, la obtención de un juego de corrientes sinusoidales y equilibradas en el lado de fuente, que además se encuentren en fase con las correspondientes tensiones de red de secuencia positiva, requiere la utilización de un filtro activo de potencia cuyo control se apoye, directa o indirectamente, en la aplicación de lo postulado en alguna teoría de potencia instantánea. Una revisión de las diferentes teorías de potencia instantánea en condiciones no sinusoidales revela una apreciable disparidad en la definición de las componentes no activas de la potencia, no existiendo una explicación clara acerca del significado físico de cada una de estas componentes. Adicionalmente, la falta de un criterio unificado acerca del papel que debe desempeñar el conductor de neutro en un sistema trifásico de cuatro hilos, hace que el cálculo de las componentes activas de la corriente de carga varíe en función de la teoría que se aplique. Esta disparidad motiva al Autor a emprender un estudio detallado de las diferentes teorías de potencia instantánea, intentando encontrar la relación existente entre ellas, para así poder plantear una teoría de potencia instantánea generalizada.

Para conseguir que la corriente acondicionada se encuentre en fase con la componente de tensión de secuencia positiva, es necesario disponer de un sistema de detección que extraiga dicha componente de las tensiones de red. Una técnica convencionalmente utilizada en la obtención de esta componente de tensión consiste en el uso de un lazo de enganche de fase apoyado en un sistema de referencia síncrono (SRF-PLL – *Synchronous Reference Frame - Phase Locked Loop*). Cuando en las tensiones de red aparecen desequilibrios de frecuencia fundamental, la calidad de la señal detectada mediante este sistema es francamente pobre. Este hecho anima al Autor en la búsqueda de algún procedimiento que permita mejorar la respuesta estática y dinámica del SRF-PLL convencional, incluso cuando en las tensiones de red se encuentren distorsionadas y desequilibradas.

Uno de los elementos clave de un SAPF es el convertidor estático que actúa como fuente de corriente controlable. Generalmente, este convertidor se implementa mediante un inversor en fuente de tensión controlado por corriente. Las prestaciones finales del sistema de filtrado activo dependen en gran medida de las características de este inversor. En sistemas trifásicos de cuatro hilos, las dos topologías de inversor más utilizadas son la de tres ramas con condensador repartido (TLSC – *Three-Leg Split Capacitor*) y la de cuatro ramas en puente completo (FLFB – *Four-Leg Full Bridge*). La modulación del inversor TLSC es bastante simple, ya que el punto medio de su bus de continua se encuentra unido al neutro de la red, por lo que muchos investigadores y fabricantes utilizan este tipo de inversor en sus diseños. Sin embargo, cuando este inversor inyecta en la red corrientes de secuencia homopolar, se produce un desequilibrio indeseable en las tensiones de los condensadores del bus

de continua. Para evitar que este desequilibrio provoque disfunciones en el inversor, es necesario sobredimensionar los condensadores del bus de continua. Sin embargo, esta solución no garantiza que el convertidor resulte operativo en todas las condiciones de funcionamiento. Este problema incita a la búsqueda de una topología alternativa a la del inversor TLSC, que permita un correcto funcionamiento en cualquier situación, y que a su vez, mantenga la facilidad de control del inversor original.

El inversor FLFB presenta mejores características que el TLSC, sin embargo, el hecho de que su bus de continua se encuentre flotante respecto al neutro de la red, hace necesario el uso de técnicas de modulación vectorial (SVM – *Space Vector Modulation*) para conseguir un aprovechamiento óptimo del mismo. Una búsqueda bibliográfica revela que este tipo de modulación utiliza complejos algoritmos en tiempo real, haciéndose necesario el uso de potentes procesadores digitales de señal para su implementación. Además, existen muy pocos trabajos que aborden la SVM del inversor de cuatro ramas, y en ellos se proponen unos algoritmos de modulación realmente sofisticados. Ambos factores desaniman a la mayoría de los fabricantes de equipos en el uso de la SVM sobre SAPF's que trabajen en redes trifásicas de cuatro hilos. Esta circunstancia incita al Autor a revisar las técnicas de modulación desde sus orígenes, para así poder localizar la clave conceptual que permita simplificar el proceso de modulación, y consiguientemente, poder proponer un algoritmo de SVM que sea fácilmente implementable mediante un procesador de bajo coste.

Finalmente, una revisión de los sistemas de control empleados en los SAPF's muestra que suelen existir dos lazos de control fundamentales. Uno de ellos determina las componentes de la corriente de carga que deben ser compensadas, y el otro, se encarga de mantener el valor de la tensión del bus de continua del inversor en torno a un valor de referencia. La acción combinada de ambos lazos de control da lugar a un sistema complejo, generalmente no lineal, que dificulta el análisis de la respuesta dinámica del mismo. Por este motivo, el dimensionamiento de los elementos del SAPF, como pueden ser los condensadores del bus de continua, se suele realizar bajo condiciones de régimen permanente. Según el principio de funcionamiento de un filtro activo de potencia, el valor medio de la energía acumulada en el bus de continua del inversor debe permanecer constante. Este principio básico de funcionamiento anima al Autor a diseñar un sistema de control que se base en el mantenimiento del estado energético del bus de continua. Este nuevo sistema de control se apoya en la relación lineal existente entre la energía acumulada en el SAPF y la potencia activa instantánea desarrollada por el mismo, con lo que la respuesta dinámica del SAPF resulta fácilmente analizable. Teniendo en cuenta que la variable fundamental de este sistema de control es una magnitud intrínseca del convertidor (la energía acumulada en el bus de continua), será posible regular la máxima variación de la misma para asegurar el correcto funcionamiento del SAPF ante súbitas variaciones en las condiciones de contorno.

Los problemas aquí expuestos dieron lugar al planteamiento innumerables preguntas, a la búsqueda de posibles soluciones, y a la evaluación de la viabilidad de éstas ante condiciones adversas. Como resultado de estas reflexiones, se establecieron una serie de objetivos a cubrir que constituyen la base estructural de este trabajo.

Objetivos

Para el desarrollo de este trabajo se han establecido los siguientes objetivos:

- i)* Identificar las causas y efectos de los problemas relacionados con un bajo nivel de calidad de potencia en las redes eléctricas, revisando las principales normativas reguladoras de la polución armónica, y evaluando las soluciones disponibles en la materia.
- ii)* Revisar las principales teorías de potencia instantánea en condiciones no sinusoidales, analizando sus ventajas y limitaciones, con el fin de proponer una teoría de potencia instantánea generalizada.
- iii)* Comparar las estrategias de compensación que pueden ser utilizadas en un SAPF en base a las diferentes teorías de potencia instantánea.
- iv)* Diseñar un sistema que permita una detección rápida y precisa de la componente de tensión de secuencia positiva y frecuencia fundamental, incluso cuando las tensiones de red se encuentren severamente distorsionadas y desequilibradas.
- v)* Revisar las principales topologías de los inversores utilizados en los SAPF's para la inyección de corriente en redes trifásicas de cuatro hilos, analizando sus ventajas y limitaciones en la compensación armónica.
- vi)* Proponer una topología alternativa a la del inversor TLSC, que aproveche las ventajas del mismo, y que permita solventar los problemas que éste presenta cuando inyecta corrientes de secuencia homopolar en la red.
- vii)* Desarrollar un prototipo físico de un SAPF para redes de cuatro hilos que se base en la topología no convencional propuesta, y que permita la posterior validación experimental de diferentes algoritmos de control.
- viii)* Mejorar las características de la corriente de salida del inversor propuesto mediante la utilización de un controlador que trabaje por banda de histéresis de amplitud variable.
- ix)* Obtener el modelo promediado en espacio de estado del SAPF que permita diseñar y simular los sistemas de control de la corriente a inyectar en aplicaciones de filtrado activo.
- x)* Aplicar diferentes controladores para evaluar la respuesta de la topología de inversor propuesta en el equilibrado de las tensiones del bus de continua.
- xi)* Revisar las técnicas de modulación de inversores en puente completo, analizando las ventajas y limitaciones de cada una de ellas.
- xii)* Obtener un algoritmo eficiente de SVM para inversores en puente completo de tres y cuatro ramas.
- xiii)* Verificar experimentalmente el algoritmo propuesto de SVM sobre unos inversores diseñados expresos.
- xiv)* Estudiar los flujos de potencia asociados al SAPF cuando trabaja bajo condiciones genéricas de tensión de red y de corriente de carga, y plantear el sistema de control del SAPF bajo un punto de vista energético.
- xv)* Controlar la máxima variación de energía admisible en el bus de continua del inversor para que éste resulte robusto ante súbitas variaciones en las condiciones de contorno.

Sumario

El Capítulo 1 expone el concepto de calidad de potencia. En él se comentan las causas y efectos de los armónicos de corriente, y se muestran los aspectos fundamentales de las normativas que regulan los niveles de los armónicos de corriente en las redes eléctricas. Así mismo se revisan las medidas a adoptar para la limitación de los armónicos de corriente en la red.

El Capítulo 2 revisa las principales teorías de potencia instantánea en condiciones no sinusoidales. Tras el estudio de las potencias puestas en juego en un sistema trifásico de cuatro hilos genérico, se propone una nueva teoría de potencia instantánea que aporta significado físico a las diferentes componentes de potencia imaginaria. La consideración de la resistencia del conductor de neutro del sistema de distribución permite introducir el concepto de *sistema trifásico equivalente*, el cual origina una nueva formulación de las componentes activas de las corrientes de la carga. Este Capítulo concluye con la propuesta de diferentes estrategias de compensación de corriente en sistemas trifásicos de cuatro hilos, comparándose los resultados obtenidos con cada una de ellas.

El Capítulo 3 está dedicado al diseño de un sistema de detección de la componente de frecuencia fundamental y secuencia positiva de las tensiones de red. Tras la exposición de las limitaciones que presenta un sistema convencional basado en un SRF-PLL, se propone la utilización de un doble sistema de referencia síncrono en el lazo de enganche de fase, lo que da lugar a un sistema denominado DSRF-PLL (*Double Synchronous Reference Frame PLL*). El comportamiento de este sistema se evalúa ante diferentes condiciones de tensión en la red. La utilización de múltiples ejes de referencia síncronos permite proponer un nuevo sistema de detección denominado MSRF-PLL (*Multiple Synchronous Reference Frame PLL*) que aísla, de manera selectiva, el efecto de determinados armónicos en la estimación de la componente fundamental de secuencia positiva de la tensión de red.

El Capítulo 4 revisa las diferentes topologías habitualmente utilizadas en el inversor de los SAPF's que trabajan sobre redes trifásicas de cuatro hilos, así mismo, se exponen los métodos usualmente empleados para el control de la corriente de salida de dicho inversor. Un análisis de las ventajas e inconvenientes de cada topología del inversor permite proponer una topología alternativa, denominada FLSC (*Four-Leg Split Capacitor*), que presenta un control sencillo, y que resuelve el problema del desequilibrio de tensión en los condensadores del bus de continua del inversor de tres ramas (TLSC) cuando éste inyecta corrientes de secuencia homopolar. En este Capítulo, se obtiene un modelo promediado en espacio de estado del SAPF que contempla las diferentes topologías posibles para el inversor. Un análisis detallado de las ecuaciones que dan lugar a este modelo permite la deducción de una técnica de control de la corriente de salida del inversor, de gran sencillez, y que consigue una frecuencia de conmutación constante mediante el uso de una banda de histéresis adaptativa. El modelo promediado del SAPF, además de constituir una poderosa herramienta para la simulación de eventos de larga duración, permite la obtención de las ecuaciones que relacionan las corrientes en el bus de continua con el resto de variables del sistema. Estas ecuaciones constituirán la base del control del SAPF.

El Capítulo 4 también aborda el control del desequilibrio de tensión en los condensadores del bus de continua del inversor FLSC. En este Capítulo, haciendo uso de las ecuaciones anteriormente mencionadas, se obtiene la expresión que determina el desequilibrio de tensión en los condensadores de dicho bus. Mediante la cuarta rama del inversor FLSC, se proponen dos controladores simples para la regulación de la tensión diferencial del bus. Este Capítulo concluye con la evaluación de ambos controladores ante diferentes condiciones de inyección de corriente.

El Capítulo 5 aborda la modulación vectorial de convertidores en puente completo. Tras una revisión detallada de las diferentes técnicas de modulación existentes, comenzando en sus orígenes, y abordando los diferentes modos de modulación posibles, se propone un enfoque tridimensional de la modulación vectorial, 3D-SVM (*Three-Dimensional Space Vector Modulation*). Un análisis detallado del proceso de modulación bajo el enfoque de 3D-SVM, además de ofrecer mayor significado físico acerca de dicho proceso, conduce a un algoritmo de modulación sumamente sencillo y eficiente. La simplicidad conceptual de la técnica aquí presentada permite abordar, de manera natural, la modulación vectorial del inversor en puente completo de cuatro ramas (FLFB). Tras la presentación y evaluación de la técnica 3D-SVM sobre el inversor FLFB, se procede a la utilización de las técnicas de modulación discontinua en dicho inversor. Esto conduce a una nueva técnica de modulación, en la que la cuarta rama se modula en modo discontinuo. Este Capítulo concluye exponiendo y evaluando la estructura del bucle de control de la corriente de salida de un inversor FLFB que utiliza 3D-SVM.

El Capítulo 6 propone un nuevo enfoque en la determinación de las corrientes de referencia del SAPF. Haciendo uso nuevamente de las ecuaciones de las corrientes en el bus de continua, se obtienen las expresiones que determinan la tensión absoluta y la energía almacenada en dicho bus. Seguidamente, se analizan las solicitaciones de potencia experimentadas por el SAPF cuando trabaja bajo condiciones totalmente genéricas en las tensiones de red y en las corrientes de carga. Partiendo de la estructura de un controlador convencional del SAPF, basado en la medida de la potencia instantánea asociada a la carga, se evoluciona hacia un nuevo planteamiento del sistema de control que se basa en la regulación de la energía almacenada en el bus de continua del inversor. Tras evaluar el correcto funcionamiento del sistema de control propuesto, se aborda el diseño de una estructura de control predictiva-adaptativa que regula la máxima variación de la energía en el bus de continua. Mediante esta modificación en la estructura del sistema de control, se consigue que el SAPF presente un funcionamiento robusto ante súbitas variaciones en las tensiones de red o en las corrientes de carga.

Finalmente, el Capítulo 7 recoge las principales conclusiones obtenidas en esta Tesis, expone las aportaciones más relevantes, y plantea las futuras líneas de investigación que surgen a raíz de este trabajo.

