

Universidad de Cantabria
Facultad de Ciencias
Departamento de Electrónica y Computadores



Método de Control de Filtros
Activos de Potencia Paralelo
Tolerante a Perturbaciones de la
Tensión de Red

Tesis Doctoral
Alberto Pigazo López
Santander, junio de 2004

Universidad de Cantabria
Facultad de Ciencias
Departamento de Electrónica y Computadores



Método de Control de Filtros Activos de Potencia Paralelo Tolerante a Perturbaciones de la Tensión de Red

Memoria

presentada para optar al grado de
DOCTOR EN CIENCIAS (FÍSICAS)

por

Alberto Pigazo López

Licenciado en Ciencias, Sección Físicas,
Especialidad Electrónica

Universidad de Cantabria
Facultad de Ciencias
Departamento de Electrónica y Computadores

**Método de Control de Filtros
Activos de Potencia Paralelo
Tolerante a Perturbaciones de la
Tensión de Red**

El Director,

Dr. Víctor M. Moreno Sáiz
Profesor Titular de Universidad

Declaro que el presente trabajo ha sido realizado en el Departamento de Electrónica y Computadores de la Universidad de Cantabria, bajo mi dirección y reúne las condiciones exigidas a los trabajos de Doctorado.

Santander, Junio 2004

Memoria

presentada para optar al grado de Doctor en Ciencias (Físicas) por el Licenciado en Ciencias

Alberto Pigazo López

Fdo. Alberto Pigazo López

Fdo. Víctor M. Moreno Sáiz

Aún siendo complicado resumir en unas pocas líneas la gratitud por toda la ayuda recibida durante tanto tiempo, me gustaría dar las gracias:

a Víctor M. Moreno Sáiz por mostrarme el valor del trabajo de laboratorio, contagiarme su energía y entusiasmo y por llevar a buen puerto este trabajo,

a los compañeros del Grupo de Investigación en Instrumentación Electrónica, en especial a Julio Barros Guadalupe por esas charlas siempre enriquecedoras y a Ramón I. Diego García por su ayuda en monofásica.

a mis padres y hermanos por haberme apoyado incondicionalmente durante toda una vida, a Marga por una paciencia ilimitada... en no pocas ocasiones y a los amigos de siempre por estar ahí,

a los compañeros de la Escuela por tantos cafés y buenos momentos juntos,

a los alumnos por enseñarme tanto, en particular, a José A. Guerra García por su ayuda con el prototipo de laboratorio,

a todos los que, en uno u otro momento, de una u otra forma, me echaron un cabo.

A Marga

Índice general

1. Introducción	1-1
1.1. Mejora de la calidad de la energía eléctrica	1-2
1.2. Filtrado activo de potencia	1-3
1.3. Objetivo de la tesis	1-4
1.4. Estructura del documento	1-4
2. Definiciones y relaciones entre magnitudes en sistemas eléctricos de potencia desde el punto de vista de la compensación	2-1
2.1. Teorías generales sobre potencia	2-2
2.2. Consideraciones sobre las teorías de potencia en relación a la compensación	2-7
2.3. Definiciones y relaciones entre magnitudes eléctricas en régimen no sinusoidal	2-8
2.3.1. Corrientes instantáneas en un sistema polifásico	2-8
2.3.2. Definiciones de potencia	2-12
2.3.3. Medida de la eficiencia de un compensador	2-14
2.4. Aplicación de las definiciones y relaciones entre magnitudes a un sistema trifásico a tres hilos con señales periódicas	2-16
3. Compensación de armónicos de corriente y corrección del factor de potencia mediante filtros activos paralelo. Estado del conocimiento	3-1
3.1. Estructura básica del filtro activo de potencia	3-1
3.2. Convertidor de potencia	3-3
3.2.1. Topologías convencionales	3-3
3.2.2. Elementos para el almacenamiento de energía en continua	3-4
3.2.3. Dispositivos electrónicos de potencia	3-5
3.2.4. Conexión a la línea eléctrica	3-5
3.2.5. Topologías multinivel	3-6

3.2.6.	Topologías resonantes	3-7
3.3.	Control de la corriente de inyección	3-8
3.3.1.	Topologías básicas	3-8
3.3.2.	Modulación por histéresis	3-10
3.3.3.	Modulación con portadora triangular	3-11
3.3.4.	Modulación vectorial (SVM)	3-13
3.3.5.	Controlador Proporcional-Integral (PI)	3-16
3.3.6.	Modelo interno	3-17
3.3.7.	Control adaptativo	3-19
3.3.8.	Técnica <i>Deadbeat</i>	3-20
3.4.	Cálculo de la corriente de referencia para la compensación	3-21
3.4.1.	Método de la potencia reactiva instantánea (pq)	3-21
3.4.2.	Marco de referencia síncrono (SRF)	3-25
3.4.3.	Transformada discreta de Fourier	3-27
3.4.4.	Control de la tensión de continua	3-28
3.5.	Otros controladores	3-29
3.5.1.	Superficie de deslizamiento	3-29
3.5.2.	Controlador mediante integración a frecuencia constante	3-31
3.5.3.	Redes neuronales	3-32
3.5.4.	Lógica borrosa	3-33
3.6.	Filtros activos de potencia comerciales	3-34

4. Análisis y evaluación de las técnicas de control pq, SRF y DFT bajo tensiones de red distorsionadas **4-1**

4.1.	Descripción de las pruebas	4-2
4.1.1.	Pruebas de tolerancia a armónicos de tensión	4-2
4.1.2.	Pruebas de tolerancia a huecos de tensión	4-3
4.1.3.	Pruebas de tolerancia a desequilibrios de tensión	4-4
4.1.4.	Modelo de carga no lineal	4-5
4.1.5.	FAP paralelo trifásico a tres hilos	4-7
4.1.6.	Modelos de controladores <i>pq1</i> y <i>pq2</i>	4-8
4.1.7.	Modelos de controladores <i>pq3</i> y <i>pq4</i>	4-10
4.1.8.	Modelo de controlador <i>sr f1</i>	4-11

4.1.9.	Modelo del controlador <i>sr f2</i>	4-14
4.1.10.	Modelo del controlador <i>sr f3</i>	4-15
4.1.11.	Modelo del controlador <i>sr f4</i>	4-16
4.1.12.	Modelos de los controladores <i>dft1</i> y <i>dft2</i>	4-18
4.2.	Análisis comparativo de los resultados de la compensación	4-19
4.2.1.	Eficiencia en la corrección del factor de potencia (η_{FP})	4-20
4.2.2.	Eficiencia en la reducción de la corriente de exceso de la carga (η_I)	4-24
4.2.3.	Tiempo de respuesta ante transitorios en la tensión de la red (T_r)	4-26
4.3.	Requerimientos generales de un controlador tolerante a distorsiones de la tensión de la red	4-28

5. Algoritmo de control de filtros activos de potencia paralelo polifásicos tolerante a la distorsión de la tensión de la red **5-1**

5.1.	Filtrado de Kalman aplicado a señales eléctricas	5-1
5.1.1.	Filtrado de Kalman	5-1
5.1.2.	Detección de faltas en líneas	5-5
5.1.3.	Caracterización de la distorsión armónica en la red	5-5
5.1.4.	Medida de la frecuencia fundamental de la red	5-7
5.1.5.	Modelado de máquinas eléctricas	5-8
5.1.6.	Cálculo de las señales de referencia para la compensación activa de perturbaciones conducidas de baja frecuencia	5-10
5.2.	Método propuesto para el control de filtros activos de potencia paralelo	5-11
5.2.1.	Cálculo de la corriente de referencia para la compensación	5-13
5.2.2.	Control de la corriente de inyección	5-19
5.2.3.	Modulador para el control de un inversor de un FAP polifásico	5-25
5.3.	Resultados de simulación de la aplicación del algoritmo de control propuesto a un FAP trifásico a tres hilos	5-28
5.3.1.	Modelo de simulación del método propuesto	5-28
5.3.2.	Eficiencia en la corrección del factor de potencia (η_{FP})	5-30
5.3.3.	Eficiencia en la reducción de la corriente de exceso de la carga (η_I)	5-34
5.3.4.	Tiempo de respuesta ante transitorios en la tensión de la red (T_r)	5-37

6. Resultados experimentales de la aplicación del algoritmo de control propuesto a un filtro activo de potencia paralelo trifásico a tres hilos	6-1
6.1. Prototipo de laboratorio del FAP	6-1
6.1.1. Generador de potencia y carga no lineal	6-2
6.1.2. Instrumentación	6-2
6.1.3. Prototipo de filtro activo de potencia paralelo	6-3
6.1.4. Tarjeta de interfaz inversor-controlador	6-3
6.1.5. Tarjeta de conexión y acondicionamiento de señales	6-5
6.1.6. Tarjeta procesadora basada en DSP	6-6
6.1.7. Interfaz gráfica de usuario	6-7
6.2. Resultados experimentales de la utilización del algoritmo de control propuesto . . .	6-8
6.2.1. Eficiencia en la corrección del factor de potencia (η_{FP})	6-9
6.2.2. Eficiencia en la reducción de la corriente de exceso de la carga (η_I)	6-12
6.2.3. Tiempo de respuesta ante transitorios en la tensión de la red (T_r)	6-14
6.3. Análisis de los resultados experimentales	6-15
7. Conclusiones	7-1
Bibliografía	8-1