

Modelado, control y aplicación de dispositivos FACTS basados en inversores fuente de tensión

P. García González y A. García Cerrada
Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
Universidad Pontificia Comillas

1. Introducción

La creciente demanda de energía eléctrica plantea nuevos retos en la explotación de los sistemas de energía eléctrica. Por ejemplo, cada vez es más necesario la utilización de dispositivos que permitan acercarse a los límites térmicos de las líneas sin problemas de estabilidad. Por otro lado, las interconexiones entre los grandes sistemas permiten aprovechar más los recursos existentes y reducir las reservas de energía de las áreas interconectadas, pero esto hace que cada vez sea más difícil conseguir que la energía siga el camino deseado y mientras algunas líneas están infrautilizadas otras se acercan a sus límites térmicos.

Con el nombre genérico de FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems* o sistemas flexibles para el transporte de energía en corriente alterna) se agrupan todos los equipos de electrónica de potencia que han sido concebidos para [1]: (a) Ampliar la capacidad de transporte de energía en los sistemas eléctricos aproximándose a sus límites térmicos, (b) aumentar el control sobre las potencias activa y reactiva de las líneas, (c) aumentar la seguridad en el transporte de energía entre diferentes áreas, (d) reducir los efectos de las faltas evitando que se produzcan faltas en cascada y (e) amortiguar oscilaciones de potencia, que pueden

producir daños en los equipos y reducen la energía que se puede transportar.

En la práctica estas acciones son posibles porque los dispositivos FACTS tienen la capacidad de controlar rápidamente los parámetros básicos del transporte de energía por las líneas (tensión en el punto de conexión, impedancia y ángulo de transporte) además de suministrar o absorber en régimen permanente potencia reactiva del sistema.

El UPFC (*Unified Power Flow Controller* o controlador unificado de flujo de potencia) [2] es el dispositivo FACTS teóricamente más completo y en él se ha concretado el mayor esfuerzo de este trabajo. Su potencial está sobradamente expuesto en la literatura [1] y [3].

En la figura 1 se muestra el circuito unifilar de un UPFC conectado en un punto de la red de transporte de energía eléctrica (*Point of Common Coupling* o PCC).

El UPFC se compone, fundamentalmente, de dos inversores fuente de tensión que están unidos por sus circuitos de corriente continua y comparten los condensadores (en adelante condensadores de acoplamiento). El inversor I_2 (inversor serie) está conectado en serie con la línea de transporte a través de los arrollamientos primarios del transformador T_2 (transformador serie) y

Se recoge en este artículo el resumen de la Tesis doctoral desarrollada por Pablo García González y que ha obtenido el Accésit AEE a la Tesis Doctoral de entre las que han concurrido a la convocatoria 2001. Figura como coautor el director de la Tesis Aurelio García Cerrada.

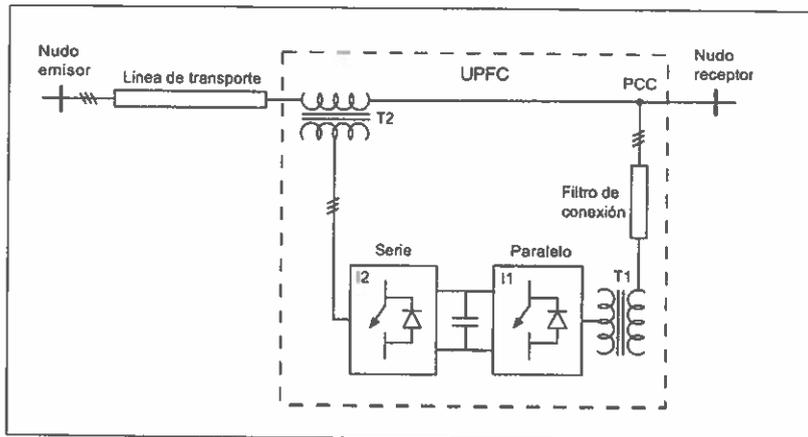


Figura 1. Esquema unifilar de un UPFC aplicado a una línea de transporte de energía eléctrica.

tiene como misión controlar el flujo de potencia activa y reactiva por la línea funcionando como una fuente de tensión completamente controlable. El inversor I_1 (inversor paralelo) está conectado en paralelo con la línea a través de los arrollamientos primarios del transformador T_1 (transformador paralelo) y de un filtro de conexión a red. Tiene como misión suministrar a los condensadores de acoplamiento la potencia activa que el inversor serie consume. El inversor paralelo también podría intercambiar potencia reactiva con el sistema en el punto de conexión y, como se verá más adelante, esta capacidad puede tener un gran interés en sí misma. El filtro de conexión se compone de una autoinducción trifásica conectada entre el PCC y el primario del transformador paralelo.

2. Control de dispositivos FACTS

Esta propuesta de separación fue hecha por el Prof. F. L. Pagola y de las Heras, Univ. Pontificia Comillas de Madrid.

El control de los dispositivos FACTS requiere el diseño coordinado de dos niveles de control (1): control en nivel aplicación y control en nivel fuente.

- *Control en nivel aplicación:* su objetivo es el control de los

(1): Esta propuesta de separación fue hecha por el Prof. F.L. Pagola y de la Heras, Univ. Pontificia Comillas de Madrid.

parámetros propios de los sistemas de transporte de energía eléctrica, generando las consignas para el control en nivel fuente.

- *Control en nivel fuente:* tiene como misión conseguir que el dispositivo FACTS siga, con precisión y rapidez suficientes, la consigna que requiere el control en nivel aplicación.

3. Modelado y control de un UPFC

Las aplicaciones teóricas de los UPFCs son muy numerosas y en cada caso requieren un control en nivel aplicación diferente. Sin embargo, las posibilidades para el control en nivel fuente son limitadas y el mismo control se puede utilizar en muchas aplicaciones. Aquí se ha utilizado el control en bucle cerrado del flujo de potencia en el punto donde se conecta el UPFC. Este control fuerza la potencia activa y la potencia reactiva que se consumen en ese punto mientras que la selección de estas potencias pertenece al control en nivel aplicación. El control de flujo de potencia en lazo cerrado es el que más interés ha despertado en la literatura especializada, porque permite seleccionar los caminos más apropiados para los flujos de potencia, limitar de forma natural la corriente que se transporta por determinadas líneas y, sin ninguna acción de control adicional, elimina las oscilaciones de potencia de la línea en la que está instalado.

Todos los controles propuestos anteriormente presentan, en régimen transitorio, importantes acoplamientos entre la potencia activa y la potencia reactiva controlada (2). Además, hay muy pocos autores que presenten resultados en los que se tienen en cuenta la tensión de los condensadores de acoplamiento y en todos los casos su control es deficiente. En este trabajo se ha conseguido:

- Obtener algoritmos de control de un UPFC que permiten el control rápido y desacoplado de las potencias real y reactiva instantánea que se consumen en el punto de conexión del UPFC.
- Estudiar en detalle el control de la tensión de los condensadores de acoplamiento.
- Caracterizar de forma exhaustiva el comportamiento en lazo cerrado de un UPFC con vistas a su utilización en el control nivel aplicación.
- Diseñar un prototipo de laboratorio que ha permitido validar los resultados principales e ilustrar el sistema de control global del UPFC.
- Ilustrar mediante un ejemplo de simulación la utilidad del UPFC en el campo del control dinámico de los sistemas de energía eléctrica.

Se utilizan los conceptos de potencia real y potencia reactiva instantánea en vez de los de potencia activa y potencia reactiva, respectivamente, porque aquellos son variables de carácter instantáneo. Nótese, que en un sistema trifásico y en régimen permanente senoidal la potencia activa y la potencia real coinciden y la potencia reactiva instantánea y la potencia reactiva, también.

La utilización de la transformada de Park permite describir el comportamiento dinámico de un UPFC usando las componentes "d" y "q" de las variables trifásicas. El diseño del control en nivel fuente se simplifica si se elige un sistema de referencia síncrono al

(2) Realmente, potencia real y potencia reactiva instantánea.

vector espacial de la tensión en el punto de conexión del UPFC. Se ha demostrado que el control desacoplado propuesto de las potencias real y reactiva instantánea es el más robusto entre todas las alternativas analizadas.

En la figura 2 se presenta un ejemplo de los resultados experimentales obtenidos. Otros resultados demuestran que se pueden seguir oscilaciones de potencia real (típicamente de hasta 2 Hz) sin retrasos ni atenuaciones significativas y sin perturbar al control de potencia reactiva instantánea. Finalmente se ha demostrado que es posible el control del dispositivo sin que se produzcan variaciones significativas en la tensión de los condensadores de acoplamiento, incluso durante el régimen transitorio.

4. Modelado y control de un STATCOM

Por otro lado, el Compensador Paralelo de un UPFC también se puede presentar como un dispositivo FACTS autónomo denominado STATCOM (*STATIC synchronous COMPensator*) [2] que tiene la capacidad de suministrar o absorber potencia reactiva del sistema eléctrico. Aprovechando la experiencia adquirida con el UPFC, también se ha investigado el sistema de control del STATCOM. Aunque el control rápido de la potencia reactiva instantánea era un problema resuelto anteriormente, el control de la tensión de los condensadores se había dejado en un segundo plano y los resultados que se presentan demuestran que en régimen transitorio su control era defectuoso. En relación con los STATCOMs, en esta tesis se ha conseguido:

- Obtener algoritmos de control que permiten el control rápido de la potencia reactiva instantánea y sin variaciones apreciables en la tensión del condensador de corriente continua.
- Validar estos algoritmos de

control en un prototipo a escala.

- Ilustrar mediante un ejemplo de simulación la utilidad del STATCOM como compensador de potencia reactiva.

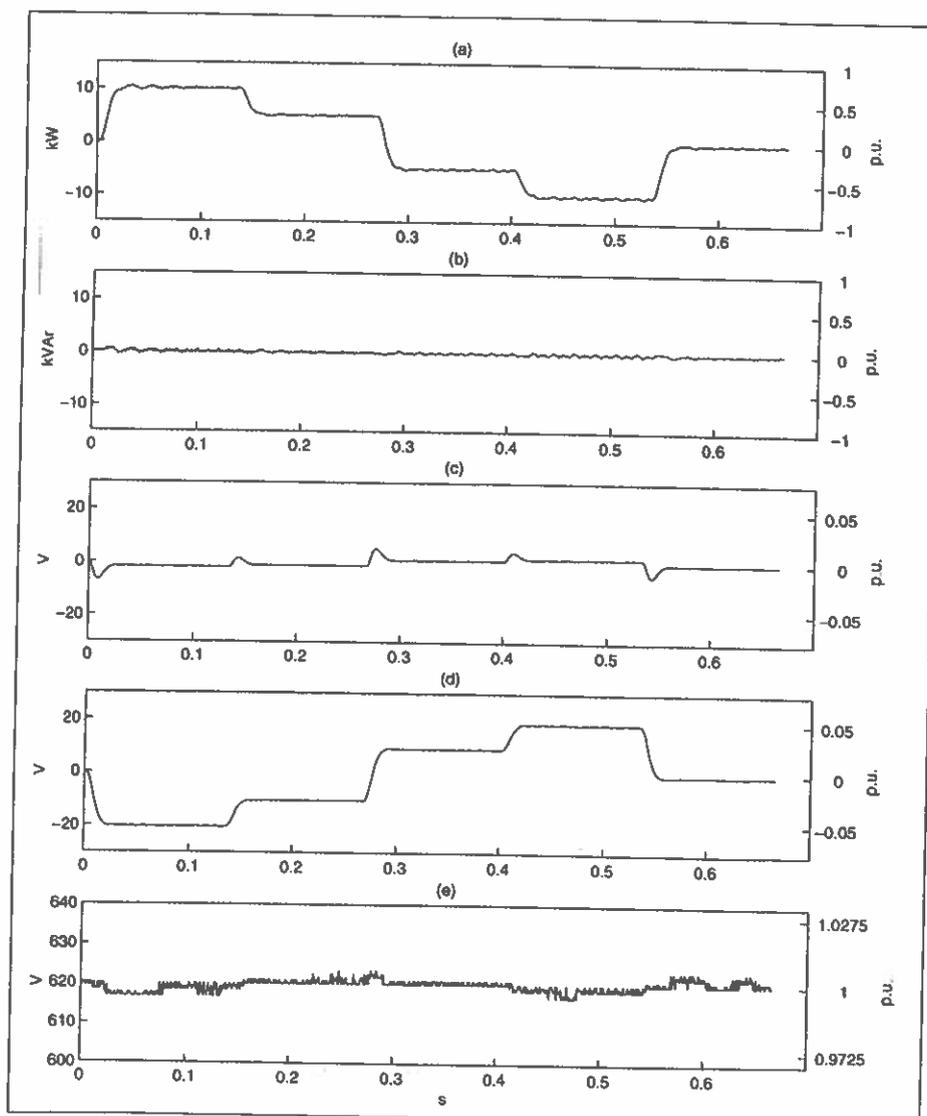
Si se desprecian las pérdidas en régimen permanente el STATCOM sólo intercambia potencia reactiva con el sistema. Sin embargo, durante los transitorios de la potencia reactiva instantánea la corriente en la autoinducción del filtro de conexión cambia, y por lo tanto su energía almacenada varía. Se ha demostrado que es necesario estimar este consumo de potencia real para conseguir extraerlo del sistema eléctrico y evitar que la tensión

en los condensadores del STATCOM varíe significativamente. La mejora alcanzada con este procedimiento en el control de la tensión de los condensadores permite disminuir sensiblemente el valor del condensador de corriente continua sin afectar la capacidad del STATCOM de intercambiar potencia reactiva.

Los resultados de simulación y experimentales demuestran que el control de potencia reactiva instantánea sigue perfectamente a su referencia, mientras que la tensión en los condensadores permanece constante si se prealimenta la estimación la potencia consumida en el filtro de conexión.

Figura 2.

Transitorios de "p" para referencias de 10 kW, 5 kW, -5 kW, -10 kW y 0 kW con una potencia reactiva instantánea $q=0$ kVAR. (a) potencia real, (b) potencia reactiva instantánea, (c) tensión del Compensador Serie en eje-d, (d) tensión de Compensador Serie en eje-q y (e) tensión de los condensadores de acoplamiento.



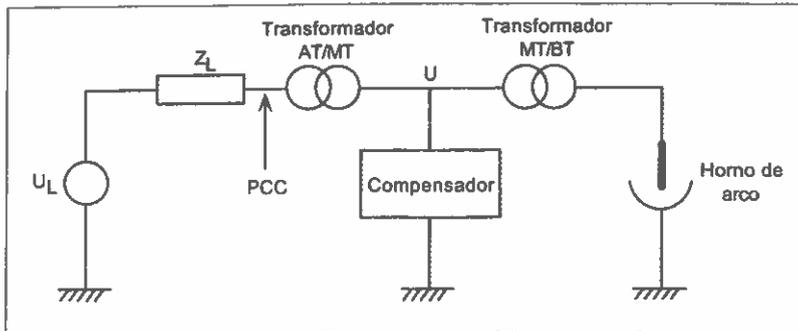


Figura 3. Esquema de la instalación de un horno de arco.

5. Ejemplos de aplicación

Se ha estudiado la capacidad del UPFC para amortiguar las oscilaciones electromecánicas que se producen en el sistema eléctrico al producirse una perturbación. Con el control de potencia en lazo cerrado propuesto a lo largo de esta tesis y con una frecuencia de conmutación de 750 Hz en los inversores, se ha comprobado que es posible amortiguar estas oscilaciones. Hay que resaltar que el control de potencia que se ha utilizado es exactamente el mismo que el de las pruebas experimentales. Por lo tanto, el control de potencia del UPFC necesario para amortiguar oscilaciones electromecánicas está validado experimentalmente.

Por otro lado, se ha estudiado la capacidad de un STATCOM para reducir el "flicker" produci-

do por un horno de arco y se ha comparado con lo que se consigue con un TCR (Reactancias Controladas por Tiristores)(3). Los resultados de simulación se han obtenido utilizando registros reales de las corrientes del horno y demuestran la superioridad del STATCOM frente al TCR. Para mitigar "flicker" el STATCOM debe de ser capaz de seguir referencias de potencia reactiva de hasta 20 Hz sin desfase ni atenuación apreciables. Esto ha obligado a trabajar con una frecuencia de conmutación de 2 kHz, que es factible en el rango de potencias de este tipo de instalaciones. El esquema unifilar de la instalación simulada con el STATCOM y con el TCR (en el lugar del compensador) se presenta en la figura 3. En la figura 4 se ha dibujado el valor instantáneo de "flicker" simulado en la fase de calentamiento inicial o taladrado usando ambos dispositivos de com-

(3) Nótese que un TCR es otro dispositivo FACTS.

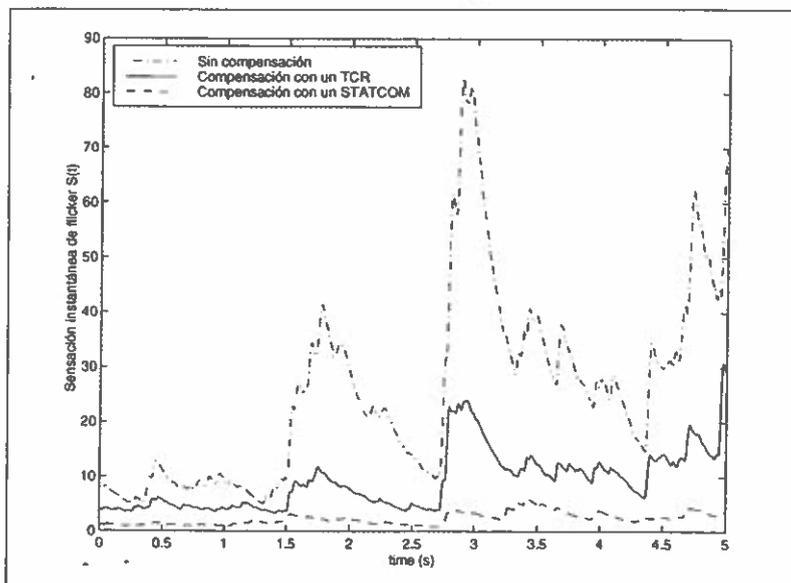


Figura 4. Nivel instantáneo de "flicker" en un horno de arco. Fase de inicial. (TCR y STATCOM)

pensación. Aunque los dos dispositivos producen una reducción de "flicker" muy significativa, la compensación usando un STATCOM se muestra mucho más efectiva.

6. Conclusiones

Las aportaciones fundamentales de esta tesis se han concentrado en el control en nivel fuente de un UPFC y de un STATCOM, aunque también se han revisado algunas aplicaciones. En el UPFC se ha investigado un sistema de control desacoplado y robusto de las potencias real y reactiva instantánea que, además, minimiza las variaciones de la tensión de los condensadores de acoplamiento. En el STATCOM, se ha investigado un algoritmo que permite el control rápido de la potencia reactiva intercambiada con el sistema eléctrico minimizando las variaciones de la tensión de los condensadores de corriente continua del inversor. Los dispositivos estudiados se han caracterizado exhaustivamente y las principales aportaciones se han validado en un prototipo experimental. La experiencia ganada es fundamental para estudiar las aplicaciones posibles, caracterizarlas, determinar el dispositivo más apropiado para abordar el problema y establecer su control en nivel aplicación. Esta experiencia también es importante para el desarrollo o la mejora de los modelos de dispositivos FACTS que utilizan los programas que se usan para el análisis de sistemas de energía eléctrica en régimen transitorio o en régimen permanente.

7. Bibliografía

- [1] Hingorani, N. "Flexible AC transmission" IEEE Spectrum, 30(4), pág.: 40-45 (1993).
- [2] Edris, A. A. y otros. "Proposed terms and definitions for flexible AC transmission systems (FACTS)". IEEE Transactions on Power Delivery, 12(4), pág.: 1848-1853.
- [3] Gyugyi, L. "Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems". IEE Proceedings-C, 139(4), pág.: 323-331 (1992).

