

Desarrollo de nuevas estrategias de control del UPFC en redes de media y alta tensión

Rogelio Orizondo y Roberto Alves Baraciarte

Grupo de Sistemas Industriales de Electrónica de Potencia (SIEP)
Departamento de Conversión y Transporte de Energía – Universidad Simón Bolívar.
Apartado Postal 89000 – Caracas 1080-A, Venezuela. Tel:+58 212 9063722
e-mail: 01-81626@usb.ve, robert@usb.ve

Resumen. Las redes de transmisión de media y alta tensión han experimentando (y continuarán haciéndolo) grandes cambios debido al aumento en la demanda de energía eléctrica, las nuevas formas de gestión (mercados eléctricos, interconexión de sistemas) y también debido al aumento de cargas y/o equipos que emplean la electrónica de potencia. Los denominados Sistemas de Transmisión Flexibles en Corriente Alterna (FACTS) son una variedad de equipos basados en electrónica de potencia que pueden otorgar una amplia flexibilidad a los modernos sistemas de transmisión de energía [1]. En este trabajo se estudia un nuevo sistema de control, basado en lógica difusa, del Controlador Unificado de Potencia (UPFC). En primer lugar se describe el UPFC así como los sistemas de control convencionales. Los modelos han sido desarrollados usando el programa ATP/EMTP ([2], [3]) y también bajo la plataforma MATLAB-Simulink. Se describe de forma detallada el sistema de control propuesto, basado en lógica difusa y se analizan sus ventajas y desventajas. Se concluye que el controlador propuesto presenta ventajas comparativas sobre los controladores convencionales.

Palabras llave: UPFC, simulación, transitorios, control.

1. Introducción

Los Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna (FACTS) son capaces de modificar el flujo de potencia (y otras muchas variables) en los sistemas eléctricos de potencia (en líneas de transmisión, nexos entre sistemas, etc.). En general el control se puede hacer de forma rápida, continua y segura, en contraste con otras estrategias convencionales de control ([1] y [4] a [7]).

Uno de los dispositivos FACTS más completos y prometedores, que muestra mayores posibilidades de regulación, es el Controlador Unificado de Potencia (UPFC) [1]. En este trabajo, en primer lugar, se describe el UPFC y se presentan los modelos de régimen permanente y transitorio del mismo, conectado a al sistema eléctrico. En segundo lugar se describen los modelos de los sistemas de control convencionales del UPFC. A continuación se propone y analiza un nuevo controlador difuso para esta aplicación. Los modelos del sistema se han desarrollado en variables transformadas

(DQ) y se han probado tres estrategias convencionales de control: control de potencia directo, cruzado y desacoplado (Direct, Decoupling and Cross Control) ([1] y [4] a [7]). Se describe el controlador difuso propuesto con la finalidad de mejorar las respuestas dinámicas de los controladores convencionales. Los modelos han sido desarrollados en MATLAB-Simulink y también usando el programa ATP/EMTP ([2], [3]). Finalmente, se analizan los resultados para luego presentar las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

Por comodidad en la redacción se describen las siglas que más comúnmente se emplean en el texto:

FACTS	→ Sistemas de Transmisión Flexibles en CA
UPFC	→ Controlador Unificado de Potencia
CA	→ Corriente alterna
CD	→ Corriente directa
C1	→ Convertidor #1 del UPFC
C2	→ Convertidor #2 del UPFC
PID	→ Controlador proporcional-integral-derivativo
SC	→ Sistema(s) de control

2. Descripción del UPFC

El UPFC consiste de dos puentes convertidores controlados, uno conectado a través de un transformador en serie con la línea de transmisión (SSSC) y el otro conectado al sistema (STATCOM). Ambos convertidores se interconectan en CD, en general, a través de un banco de condensadores. Dependiendo de la tecnología y la potencia, los puentes pueden ser de IGBT's o GTO's. La configuración clásica se muestra a continuación en la Figura 1.

Un modelo sencillo, de un sistema de tres barras se presenta en la Figura 2 y su diagrama fasorial en la Figura 3. El UPFC actúa como una fuente de tensión (\vec{V}_{pq}) sincronizada con la frecuencia del sistema, donde:

$$\begin{aligned} \text{magnitud de } \vec{V}_{pq} &\Rightarrow 0 \leq |\vec{V}_{pq}| \leq V_{pq}^{\text{máx}} \\ \text{ángulo de } \vec{V}_{pq} &\Rightarrow 0 \leq \rho \leq 2\pi \end{aligned} \quad (1.)$$

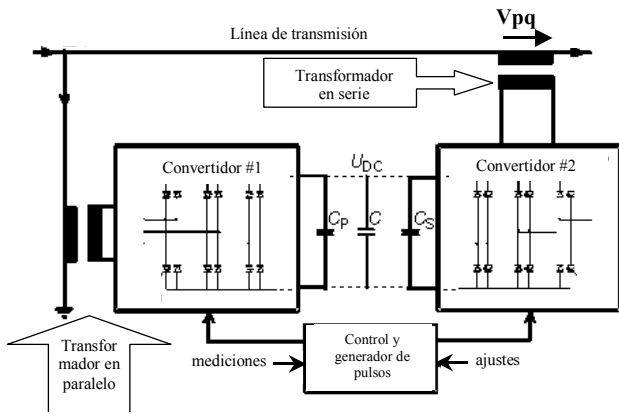


Figura 1: Configuración del UPFC

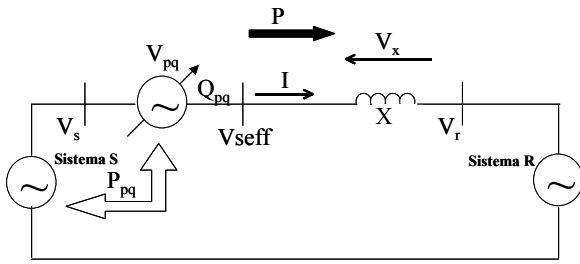


Figura 2: Diagrama unifilar del sistema con el UPFC.

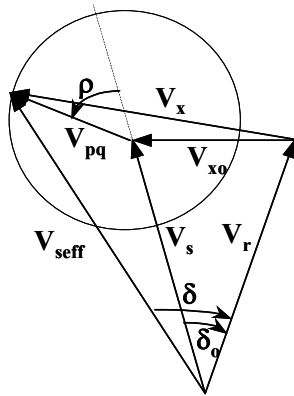


Figura 3: Diagrama fasorial del sistema.

La función principal del **C2** es suministrar una tensión variable en magnitud y ángulo. Si la tensión V_{pq} está a $\pm 90^\circ$ de la corriente de la línea (I), el convertidor suministra solamente potencia reactiva al sistema (en este caso solamente sería suficiente el **C2** con un control de potencia reactiva). Si se requiere variar V_{pq} tanto en magnitud como en ángulo se necesita el **C1** para mantener la tensión en el banco de condensadores del nexo de corriente directa. La función básica del **C1**, conectado en derivación a la línea de transmisión, es suplir la potencia activa demandada por el **C2** (y también puede actuar controlando la tensión de la barra donde está conectado).

En general, se emplea en ambos convertidores la técnica de Modulación por Ancho de Pulso Senoidal (SPWM). Se puede decir que para un funcionamiento correcto del sistema, el **C1** debe mantener constante la tensión del enlace CD; y el **C2** aplicar la tensión V_{pq} necesaria según la estrategia de control deseada. La magnitud y el ángulo de V_{pq} están controlados mediante las consignas del sistema de regulación. Cada convertidor absorbe o genera reactivos de forma independiente en sus terminales. El flujo de potencia por la línea puede ser en cualquier

sentido y la potencia necesaria en el UPFC es suministrada por el mismo sistema de potencia (sistema equivalente S).

Como se ha descrito, el UPFC es capaz de aplicar una tensión V_{pq} variable en módulo y ángulo. Si el ángulo de V_{pq} se mantiene siempre a $\pm 90^\circ$ de la corriente de línea el sistema puede verse como una reactancia variable (capacitiva o inductiva) (Figura 4).

Se puede controlar al mismo tiempo la magnitud de la tensión y su fase (o la impedancia de la línea, si se mantiene un ángulo de $\pm 90^\circ$ con relación a I) según se deduce de los diagramas de la Figura 4.

El módulo de control funcional (Figura 5) se encarga de construir las consignas apropiadas para satisfacer los valores deseados (constantes). La estrategia de control determinará la naturaleza del módulo de control funcional. Las estrategias de control empleadas están basadas en la propuesta de control vectorial de Mehta-Schauder.

Las variables a controlar se descomponen mediante la transformada DQ. El módulo interno de control (Figura 6) se encarga de generar el patrón de disparos requeridos por los dispositivos semiconductores de ambos convertidores. La operación apropiada produce la tensión serie mediante el **C2** y la corriente en derivación mediante el **C1**.

3. Simulación del UPFC

El sistema eléctrico de potencia y el UPFC se modelaron en variables primitivas y también, mediante el uso de la transformada vectorial DQ. La transformada DQ tiene la ventaja de convertir un sistema trifásico de tensiones o corrientes, en un sistema bifásico ortogonal solidario con la frecuencia de operación del sistema. En el sistema transformado las variables fasoriales se transforman en vectores constantes e independientes del tiempo. Como se sabe, la matriz de transformación de Park es:

$$[\mathbf{T}]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.)$$

$$\theta = \omega t + \varphi$$

$\omega \rightarrow$ frecuencia angular del sistema

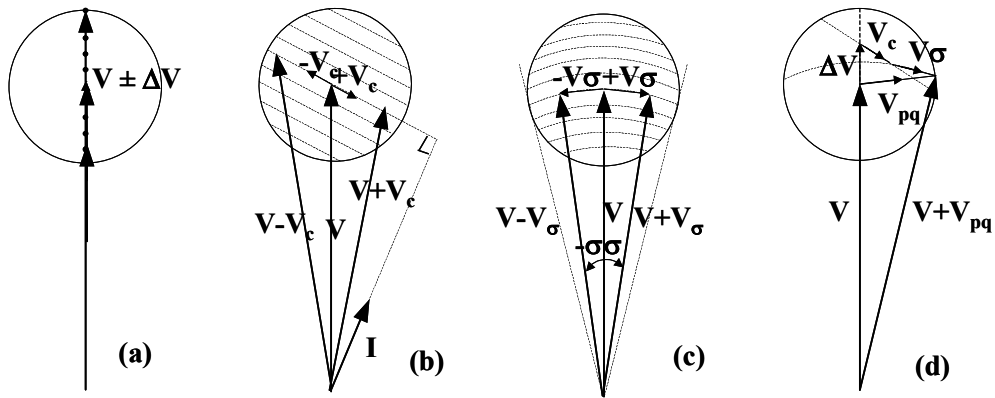
$\varphi \rightarrow$ ángulo arbitrario

Donde el ángulo φ lo determina el sistema de control mediante un seguidor de fase (PLL). Las magnitudes definidas en la Figura 8, se pueden expresar en el dominio transformado como se indica a continuación.

$$\begin{aligned} [\mathbf{i}_{dgo}] &= [\mathbf{T}]^{-1} [\mathbf{i}_{abc}] \\ [\mathbf{v}_{dgo}] &= [\mathbf{T}]^{-1} [\mathbf{v}_{abc}] \end{aligned} \quad (3.)$$

Usando las variables primitivas (Figura 8), las ecuaciones que modelan el UPFC son las siguientes:

$$\overline{v_s} - \overline{v_r} = \chi([\mathbf{z}])\overline{i_s} \quad (4.)$$



- (a) Regulación de voltaje
- (b) Compensación de la impedancia de línea
- (c) Cambiador de fase
- (d) Control simultáneo del voltaje, impedancia y ángulo

Figura 4: Diagramas fasoriales para distintos casos.

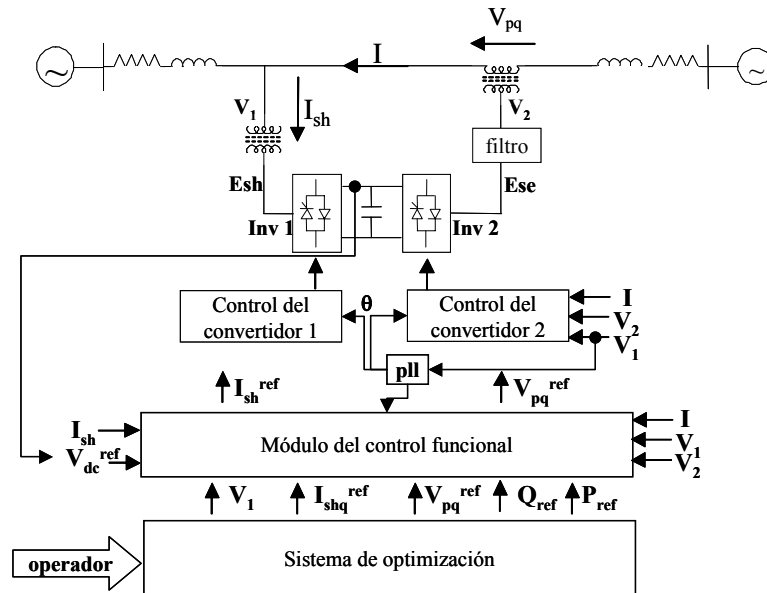


Figura 5: UPFC y sistema de control (SC).

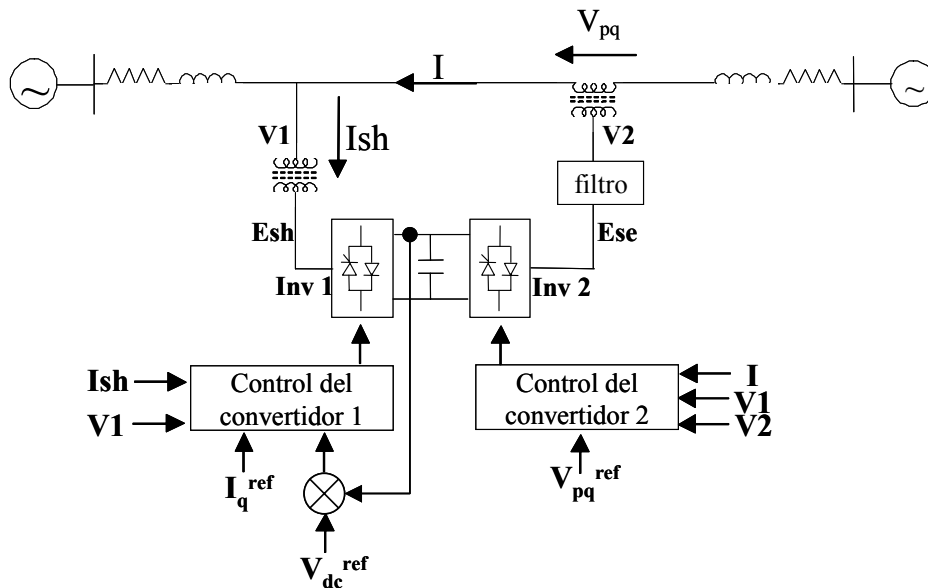


Figura 6: UPFC y modulo de control interno.

$$[z] = \begin{bmatrix} R + Lp & 0 & 0 \\ 0 & R + Lp & 0 \\ 0 & 0 & R + Lp \end{bmatrix} \quad (5.)$$

$p = d/dt \rightarrow$ operador derivada

$$\bar{v}_T - \bar{v}_C - \bar{v}_R = (1 - \chi)([z])\bar{i}_R \quad (6.)$$

$$\bar{v}_P - \bar{v}_T = ([z_p])\bar{i}_S \quad (7.)$$

Reordenando convenientemente el sistema de ecuaciones del sistema es el siguiente:

$$\begin{cases} [L_p + \chi(1-\chi)L](\bar{p}\bar{i}_p) = [-R_p - \chi(1-\chi)R](\bar{i}_p) + (\chi-1)\bar{v}_S + (-\chi)\bar{v}_R \\ \quad + \bar{v}_P + (-\chi)\bar{v}_C \\ [(L(L_p + \chi(1-\chi)L))](\bar{p}\bar{i}_R) = [-(L_p + \chi(1-\chi)L)R](\bar{i}_R) \\ \quad + [\chi(L_p R - L R_p)](\bar{i}_p) \\ \quad + [-(L_p + \chi L)](\bar{v}_C + \bar{v}_R) + [\chi L]\bar{v}_P + [L_p]\bar{v}_S \end{cases} \quad (8.)$$

En el caso particular donde el UPFC está ubicado al final de la línea de transmisión, se tiene:

$$\begin{cases} \bar{p}\bar{i}_p = \left[-\frac{1}{L_p}R_p\right](\bar{i}_p) + \left(-\frac{1}{L_p}\right)\bar{v}_R + \left(\frac{1}{L_p}\right)\bar{v}_P + \left(-\frac{1}{L_p}\right)\bar{v}_C \\ \bar{p}\bar{i}_R = \left[-\left(\frac{1}{L}\right)R\right](\bar{i}_R) + \left[\left(\frac{1}{L}\right)R - \left(\frac{1}{L_p}\right)R_p\right](\bar{i}_p) \\ \quad + \left[-\left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L_p}\right)\right](\bar{v}_C + \bar{v}_R) + \left[\frac{1}{L_p}\right]\bar{v}_P + \left[\frac{1}{L}\right]\bar{v}_S \end{cases} \quad (9.)$$

En todos los modelos desarrollados (MATLAB-Simulink y ATP/EMTP) se incluyeron los dos convertidores, uno para el STATCOM (rama en derivación del UPFC) y otro idéntico para el SSSC (rama serie del UPFC).

En el caso del programa ATP/EMTP, se trabajó con el dispositivo N° 13, para el transistor de potencia con diodo en anti-paralelo.

Para el caso del modelo en MATLAB-Simulink, se trabajó con la librería de semiconductores, empleando el dispositivo *IGBT*.

Como es sabido, el programa ATP/EMTP ([2], [3]) dispone de una amplia variedad de modelos de generadores y demás elementos del sistema eléctrico de potencia (fuentes, líneas largas y cortas, cargas, etc.). Por otra parte, el módulo TACS (y también MODELS) permiten la representación de los diferentes circuitos que conforman el SC. En este módulo se miden las variables, se transforman, se estructura el módulo de control interno y el módulo de control funcional, se implementa el SPWM y se generan los patrones de disparos de los elementos semiconductores.

El diagrama unifilar del sistema eléctrico y del UPFC se muestran en la Figura 7 y Figura 8.

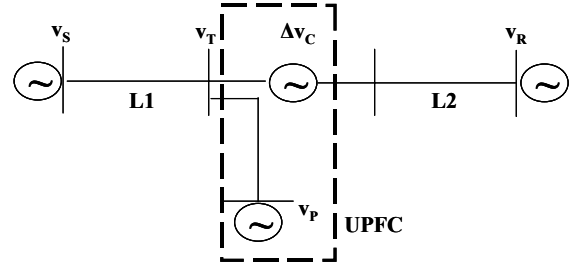


Figura 7: Diagrama unifilar del sistema eléctrico y UPFC.

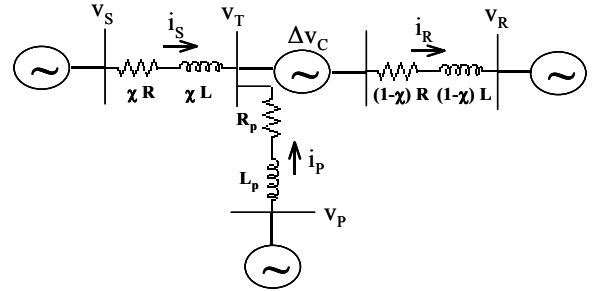


Figura 8: Detalle del diagrama unifilar y UPFC.

4. Controladores clásicos del UPFC

La regulación del convertidor paralelo se garantiza mediante dos lazos de control. El lazo de potencia activa (**P**) tiene como salida la corriente directa. Un controlador Proporcional-Integral (PI) tiene como entrada el error entre la tensión del condensador de CD y su referencia.

El lazo de potencia reactiva (**Q**) tiene como salida la corriente en cuadratura. Otro controlador PI tiene como entrada el error entre las tensiones de referencia y de la Barra 1 (V_T). Además se calcula la potencia inyectada por el **C1** al sistema de potencia en la Barra 1 (V_T). Adicionalmente se representa el transformador del **C1** mediante la impedancia z_p .

El subsistema control del **C2** se encarga de inyectar las potencias (**P, Q**) necesarias a la línea de interconexión. Esta inyección se logra con la magnitud y fase apropiadas de la tensión V_{pq} (ΔV_c). Las entradas a este subsistema son la potencia activa de referencia (P_{REFS}) y la tensión de referencia (V_{REFS}), en la Barra 2 (V_R). Dos controladores PID se encargan de producir las corrientes de referencias de eje directo y eje cuadratura. Estas corrientes son comparadas con las corrientes de la línea y los errores permiten calcular las tensiones de referencia. Una vez obtenida la tensión necesaria para cumplir las referencias, se calcula la tensión V_R , las potencias que se inyectan en esta barra y la contribución del **C2**. La Figura 9 muestra una forma de implementar la estrategia de control vectorial DQ (convencional), aplicada al **C1**, y la Figura 10 lo muestra para el **C2**.

La Figura 11 y la Figura 12 muestran otra forma de implementar la estrategia de control vectorial DQ. En esta versión, los controladores proporcionales son sustituidos por controladores tipo PI. Un primer ajuste de los parámetros proporcional e integral se logra mediante la técnica de Ziegler-Nichols [8].

funciones de pertenencia para la entrada y otras siete (7) para el proceso de de-fuzificación. Los valores del vector $[a \ b \ c \ d]$ se obtienen mediante un algoritmo heurístico, cuyo criterio de convergencia es el error en régimen permanente para diversas consignas de potencia.

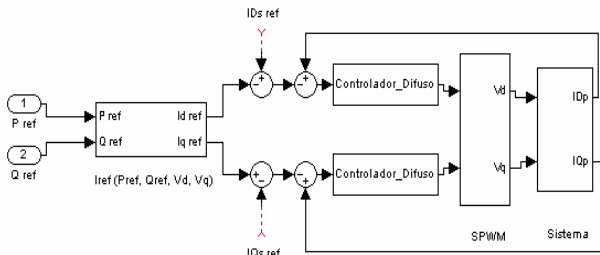


Figura 13: Detalles del SC propuesto para el C1.

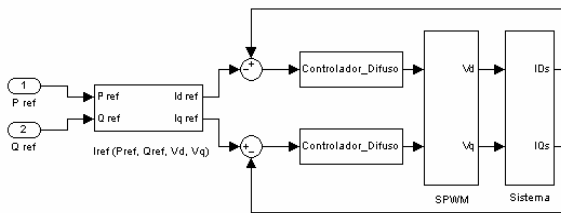


Figura 14: Detalle del SC propuesto del C2.

El proceso de de-fuzificación se lleva a cabo empleando el método del promedio ponderado, que tiene menor costo computacional que otros métodos más conocidos como el de Mamdani o Takagi Sugeno [10].

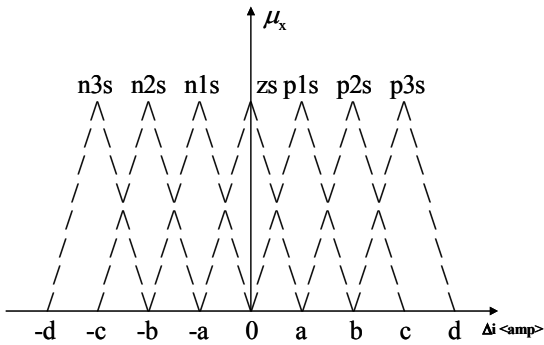


Figura 15: Funciones de pertenencia para la entrada y la salida, de cada uno de los cuatro controladores difusos.

6. Resultados obtenidos

Con la finalidad de evaluar el sistema de control propuesto, se analizan a continuación los resultados correspondientes al sistema eléctrico que muestra de forma detallada en la Figura 5 y de forma esquemática en la Figura 8. Dicho sistema simula la interconexión entre dos sistemas de potencia, a través de una línea de transmisión de 1000 MW y 400 kV. Se han estudiado distintos transitorios con la finalidad de comparar el sistema de control propuesto con relación a los controladores convencionales.

Los modelos desarrollados incluyen una representación trifásica e instantánea de las líneas, fuentes, transformadores y convertidores del UPFC. Se simulan los convertidores mediante IGBT's con diodos en anti-paralelo, y un esquema de disparo usando la técnica SPWM. Las perturbaciones y contaminación armónica

hacia la red eléctrica de potencia que introducen los convertidores del UPFC es mínima.

Las siguientes cinco figuras muestran la operación del C1 (STATCOM) y del C2 (SSSC) del UPFC, así como la potencia por la línea de interconexión.

El evento transitorio analizado, en ambos casos, es una energización bajo carga. Las potencias están todas en por unidad en la base de la potencia de la línea.

En la Figura 16 se observa el transitorio de la potencia activa que fluye por el C1. Esta potencia es utilizada para suplir la demanda del C2. La consigna de potencia activa no es constante y es obtenida a través de un controlador. El transitorio finaliza en 0.25 s. En la Figura 17 se observa el transitorio para la potencia reactiva. El evento transitorio tarda 0.2 s.

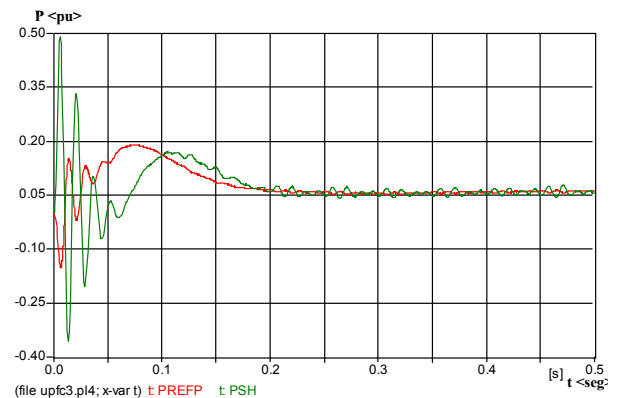


Figura 16: P del C1 (P_{SH}) y P_{REFP} .

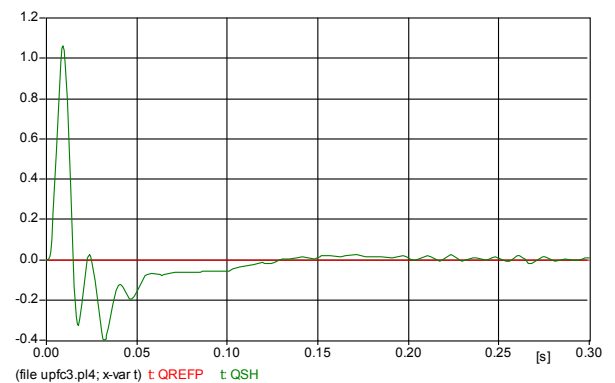


Figura 17: Q del C1 (Q_{SH}) y Q_{REFP} .

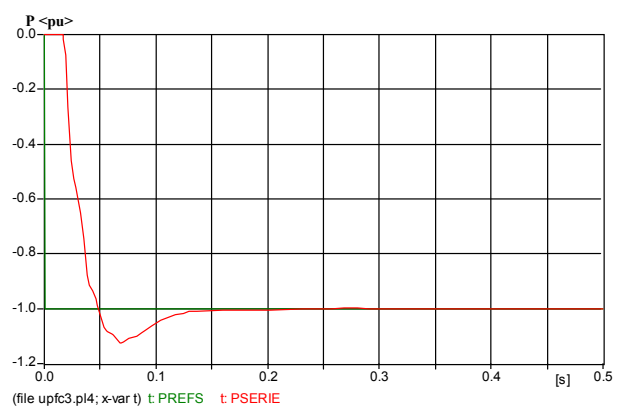


Figura 18: P en la línea

La Figura 18 y la Figura 19 muestran el efecto del funcionamiento del C2 sobre la línea de interconexión. Se observa una respuesta ligeramente sub-amortiguada en la potencia activa. El sistema tarda aproximadamente 0.15 s en alcanzar el valor de consigna.

En la Figura 20 se muestran la potencia por la línea y la potencia aparente del C2 del UPFC, donde puede observarse que éste contribuye con una potencia del orden del 30% a la potencia total de interconexión.

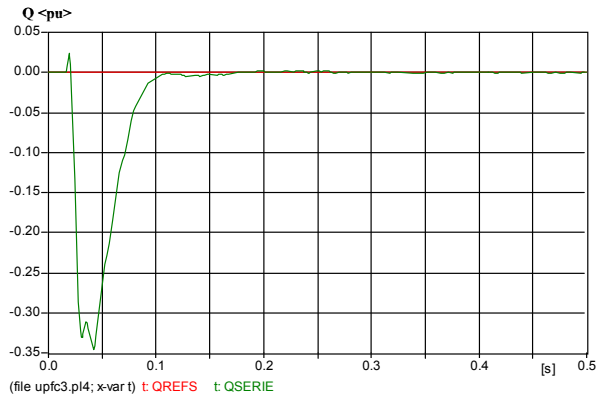


Figura 19: Q de la línea

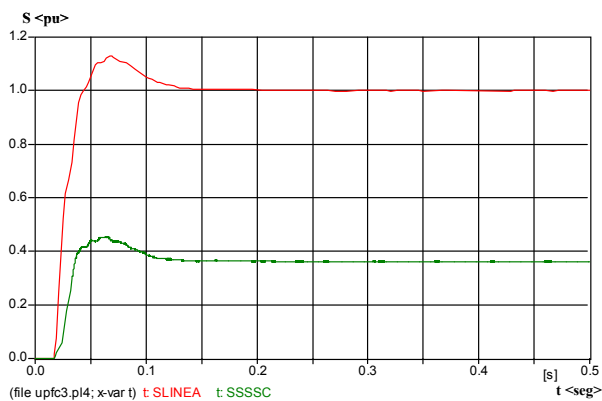


Figura 20: S de la línea y del C2

Los siguientes tres gráficos (Figura 21: potencia reactiva del C1, Figura 22: potencia activa en la línea y Figura 23: potencia reactiva en la línea) muestran la operación de los convertidores que conforman el UPFC, empleando la estrategia y el sistema de control propuesto (sistema de control difuso).

En la Figura 21 se observa que la respuesta se estabiliza en 30 ms, y que el sistema es sensiblemente más rápido que con el sistema de control convencional (las otras variables responden aún más rápidamente). Se han realizado varias simulaciones adicionales con la finalidad de comparar los tiempos de respuesta de los controladores convencional y difuso. En todas ellas el control difuso propuesto responde más rápidamente. Los ajustes de los parámetros de los sistemas de control se han hecho de manera rudimentaria, y deben mejorarse en ambos casos.

Como puede apreciarse, independientemente del sistema de control empleado el UPFC muestra un comportamiento adecuado, en cuanto que transmite la

potencia activa de referencia, con una buena respuesta dinámica.

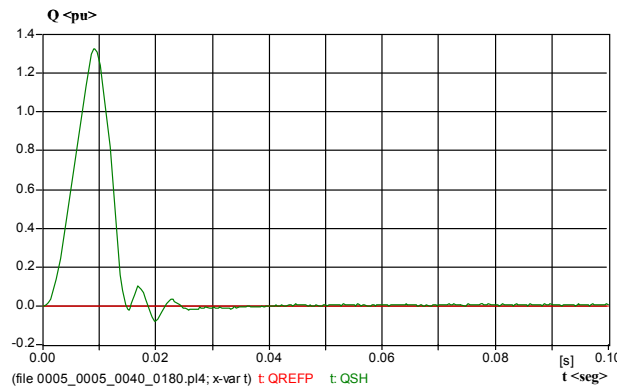


Figura 21: Q del C1 y QREFP.

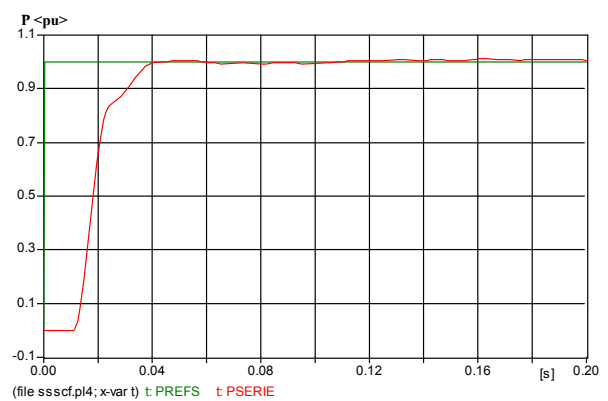


Figura 22: P de la línea.

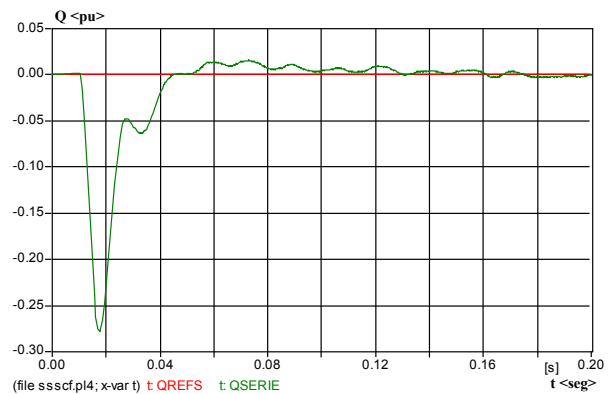


Figura 23: Q de la línea.

7. Conclusiones

- Se han desarrollado varios modelos del UPFC en bajo plataformas de simulación que permiten el análisis detallado de distintos tipos y estrategias de control.
- En el trabajo comparan las respuestas dinámicas de un nuevo controlador difuso propuesto con las respuestas de los SC convencionales descritos en la bibliografía. Se han realizado múltiples simulaciones y en este trabajo se muestran algunos resultados.

- Se ha podido comprobar que las posibilidades y aplicaciones del UPFC en sistemas de potencia de media y alta tensión son muy prometedoras.
- El desarrollo de nuevas estrategias de control basadas en la lógica difusa así como otros métodos modernos de control permiten mejorar de manera importante las respuestas dinámicas del sistema, como se puede observar en las múltiples simulaciones realizadas (en este trabajo se muestran algunos de los resultados).
- Los modelos desarrollados permitirán probar nuevas técnicas y estrategias de control. Los autores continuarán esta investigación mediante una etapa de validación de los resultados en el laboratorio. Para ello se dispone de una plataforma desarrollada por el grupo de investigación SIEP de la USB [11].

Referencias

- [1] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. Understanding FACTS, IEEE Press, 2000.
- [2] Alfredo Rifaldi, Raul Bianchi Lastra, ATP-Rule Book, versión electrónica, CAUE, Julio, 2002.
- [3] Scott Mayer and Tsu-huey Liu, ATP-Teory Book, versión electrónica, BPA, June, 1987.
- [4] Round, Yu, Norum, Undeland, "Performance of a Unified Power Flow Controller using a D-Q Control System", Proc. Of IEE AC/DC transmission conference. London, pp. 357-362, Ene-96.
- [5] Zunko, Povh, Weinhold, "Basic control of UPFC", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 12, no. 4, pp. 1734-1739, Nov-97.
- [6] Pinnarelli, De Martinis, Andreotti, "Modelling of unified Power Flow Controller into Power System using P-Spice.", IPST 2001- paper 205, Ago 2001.
- [7] Fujita, Watanabe, Akagi, "Control and analysis of a Unified Power Flow Controller.", IEEE Transaction on Power electronics, Vol. 14, no. 6, pp. 1021-1027, Nov-99.
- [8] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets", Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [9] S. R. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani. Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997.
- [10] Eric A. Wan, Control Systems: Classical, Neural, and Fuzzy, Oregon Graduate Institute, Lecture Notes – 1998.
- [11] Grupo de Investigación de Sistemas Industriales de Electrónica de Potencia (SIEP) de la Universidad Simón Bolívar. Página WEB <http://siep.grupos.usb.ve/>.