

Aplicaciones de Control Vectorial: Control del flujo de potencia por una línea mediante un UPFC

Pablo García-González y Aurelio García-Cerrada

ETS de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas, Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid, Spain
Tel. 91 542 28 00; Fax. 91 559 65 69
pablo@dea.icaei.upco.es; aurelio@iit.upco.es

Resumen

En este artículo se presenta el sistema de control completo de un UPFC en una línea de transporte de energía eléctrica. El UPFC está basado en dos inversores trifásicos fuente de tensión que comparten la etapa de continua. Se ha desarrollado un modelo dinámico del UPFC, utilizando la transformada de Park, que transforma las variables trifásicas del sistema en vectores espaciales. La selección del sistema de referencia de los vectores espaciales reduce el control de las potencias activa y reactiva al de intensidades en ejes d y q . Se ha desarrollado una estructura de control que permite el control rápido y desacoplado de las potencias y que asegura que la tensión del condensador de acoplamiento se mantiene en los niveles preestablecidos. Los resultados se han validado mediante simulación.

1. Introducción

El Controlador Universal de Flujo de Potencia o UPFC (*Unified Power Flow Controller*), tiene como misión el control de la potencia activa y reactiva de las líneas de transporte de energía eléctrica [1]. El UPFC se presenta como una herramienta muy poderosa para flexibilizar la explotación de los sistemas eléctricos y mejorar su estabilidad. Los trabajos publicados hasta la fecha se centran en el control de la potencia de la línea y dejan en un segundo plano el control de la tensión del condensador de acoplamiento [2]. En este artículo se presenta, en detalle, el sistema de control completo de un UPFC.

En la Sección 2 se desarrolla un modelo dinámico del UPFC y se demuestra que, si se escriben las ecuaciones usando un sistema de referencia adecuado, el control desacoplado de potencia activa y reactiva es análogo al control vectorial de par y flujo en una máquina de inducción [3]. En la Sección 3 se desarrolla el sistema de control del UPFC, se define su estructura de control y se establecen las relaciones entre los diferentes lazos de control. En la Sección 4 se presentan los resultados, obtenidos mediante simulación, que validan las principales conclusiones.

2. Modelado del UPFC

En Fig. 1 se representa el esquema unifilar de un UPFC conectado a una línea de transporte de energía eléctrica.

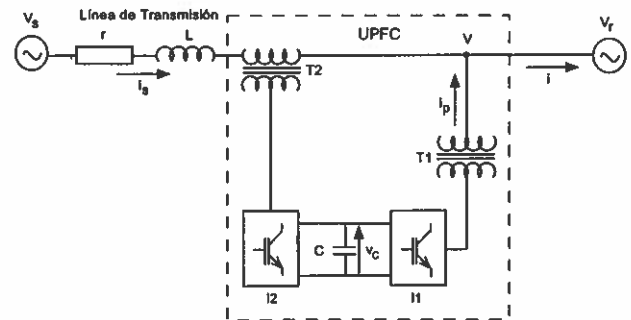


Fig. 1. Esquema unifilar de un UPFC.

El UPFC se compone de un compensador serie y de un compensador paralelo. El compensador serie está compuesto por un inversor (I2) y un transformador (T2). Con este dispositivo se introduce una tensión en serie con la línea a través del transformador. El compensador paralelo está compuesto por un inversor (I1) y un transformador (T1). El inversor está conectado en paralelo con la línea a través del transformador, aunque normalmente es necesario añadir una bobina en serie con el transformador para la conexión a red. El condensador de acoplamiento (C) es el elemento almacenador de energía que proporciona la tensión necesaria para el funcionamiento de los dos inversores.

En Fig. 2 se representa un esquema funcional del UPFC. Los compensadores serie y paralelo se comportan como fuentes de tensión (e y e_p , respectivamente) controlables en módulo y ángulo. En la impedancia de la línea, $r + j\omega L$, se ha incluido la impedancia de conexión del compensador serie, mientras que $r_p + j\omega L_p$ es la impedancia de conexión del compensador paralelo. Utilizando la transformada de Park se obtiene el siguiente modelo dinámico del UPFC (no aparecen V_{dq} y V_{sdq} porque son constantes y no influyen en el control de i_{sdq} e i_{pdq}):

$$\frac{di_{sdq}}{dt} = -\frac{r}{L}i_{sdq} + \omega i_{sqd} - \frac{1}{L}e_{dq} \quad (1)$$

$$\frac{di_{pdq}}{dt} = -\frac{r_p}{L_p}i_{pdq} + \omega i_{pqd} + \frac{1}{L_p}e_{pdq} \quad (2)$$

$$i_{dq} = i_{sdq} + i_{pdq} \quad (3)$$

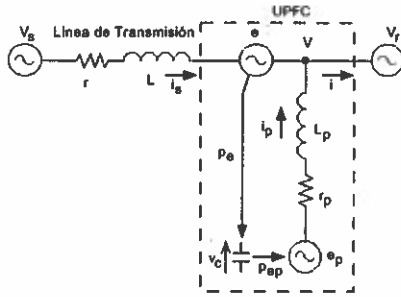


Fig. 2. Circuito equivalente de un UPFC.

siendo ω la velocidad angular del sistema de referencia seleccionado. Todas las variables son números complejos o vectores espaciales. Las ecuaciones (1) y (2) modelan los compensadores serie y paralelo respectivamente, mientras que i_{dq} es la corriente que entra en el nudo receptor. La transformada de Park utilizada mantiene invariante la expresión de la potencia instantánea.

Si el sistema de referencia seleccionado conserva el eje d colineal al vector espacial de la tensión del nudo receptor, entonces $V = V_d + jV_q = V_d$, y utilizando las definiciones de potencia activa (p) y reactiva (q) instantáneas [4]:

$$\begin{aligned} p &= V_d i_d + V_q i_q = V_d i_d \\ q &= -V_d i_q + V_q i_d = -V_d i_q \end{aligned} \quad (4)$$

Por lo tanto el control del flujo de potencia por la línea se reduce al control de i_d (potencia activa) y $-i_q$ (potencia reactiva). De forma análoga se deduce que el flujo de potencia que el compensador paralelo intercambia con la línea es

$$\begin{aligned} p_p &= V_d i_{pd} + V_q i_{pq} = V_d i_{pd} \\ q_p &= -V_d i_{pq} + V_q i_{pd} = -V_d i_{pq} \end{aligned} \quad (5)$$

y el control de p_p y q_p se reduce al control de i_{pd} y $-i_{pq}$. Por otro lado, la ecuación que regula la tensión del condensador de acoplamiento, si se desprecian las pérdidas en los semiconductores, es

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{v_c C} (p_e - p_{ep}) \quad \begin{cases} p_e = e_d i_{sd} + e_q i_{sq} \\ p_{ep} = e_{pd} i_{pd} + e_{pq} i_{pq} \end{cases} \quad (6)$$

siendo p_e la potencia activa consumida a través del inversor serie y p_{ep} la suministrada a la línea través del inversor paralelo. Por lo tanto, si la potencia consumida es inferior a la suministrada la tensión del condensador disminuye y aumenta en caso contrario.

3. Sistema de control del UPFC

En Fig. 3 están representados los principales lazos de control del UPFC. El compensador serie realiza la función principal del UPFC que es controlar el flujo de potencia de la línea (como se comentó en la Sección 2 es equivalente a controlar i_{dq}). Generalmente, el control del compensador serie se realiza a costa de un intercambio de energía entre el inversor serie y la línea y en consecuencia se modifica la tensión y la energía almacenada en el condensador de acoplamiento. Aquí se ha

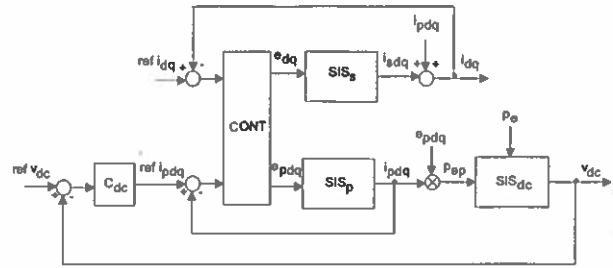


Fig. 3. Esquema de control general del UPFC.

establecido que la misión del compensador paralelo sea controlar la tensión del condensador de acoplamiento. Por lo tanto, el compensador paralelo debe suministrar la potencia que necesite el compensador serie para su funcionamiento, de esta forma la potencia neta en el condensador de acoplamiento es prácticamente nula y se mantiene la tensión en su punto de operación.

3.1. Compensador serie

Para el estudio del control del compensador serie es necesario obtener la ecuación dinámica que relacione el flujo de potencia de la línea, i_{dq} , con la variable de mando del compensador serie, e_{dq} . Derivando (3) y sustituyendo en ésta la ecuaciones (1) y (2), se obtiene:

$$\frac{di_{dq}}{dt} = -\frac{r}{L} i_{dq} + \omega_{red} i_{qd} + \left(\frac{r}{L} - \frac{r_p}{L_p}\right) i_{pdq} - \frac{1}{L} e_{dq} + \frac{1}{L_p} e_{pdq} \quad (7)$$

que una vez descompuesta en ejes d y q queda:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{r}{L} i_d + \omega_{red} i_q + \left(\frac{r}{L} - \frac{r_p}{L_p}\right) i_{pd} - \frac{1}{L} e_d + \frac{1}{L_p} e_{pd} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{r}{L} i_q - \omega_{red} i_d + \left(\frac{r}{L} - \frac{r_p}{L_p}\right) i_{pq} - \frac{1}{L} e_q + \frac{1}{L_p} e_{pq} \end{cases} \quad (8)$$

El estudio de (8) muestra que las variables i_d e i_q están acopladas, es decir: no es posible controlar independientemente las potencias activa y reactiva de la línea, utilizando e_d y e_q como variables de mando de cada uno de los controles. Sin embargo, agrupando convenientemente términos en (8) se obtiene:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{r}{L} i_d + x_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{r}{L} i_q + x_q \\ x_d = \omega_{red} i_q + \left(\frac{r}{L} - \frac{r_p}{L_p}\right) i_{pd} - \frac{1}{L} e_d + \frac{1}{L_p} e_{pd} \\ x_q = -\omega_{red} i_d + \left(\frac{r}{L} - \frac{r_p}{L_p}\right) i_{pq} - \frac{1}{L} e_q + \frac{1}{L_p} e_{pq} \end{cases} \quad (9)$$

En (9) las variaciones de x_d únicamente afectan a i_d , y las variaciones de x_q únicamente afectan a i_q . En consecuencia, pueden controlarse independientemente las potencias activa y reactiva si se utilizan como variables de mando x_d y x_q respectivamente. Nótese que e_d y e_q pueden obtenerse en función de x_d y x_q y las variables de estado del sistema (ecuaciones de desacoplo)¹.

$$\begin{cases} e_d = L\omega_{red} i_q + \frac{rL_p - r_p L}{L_p} i_{pd} + \frac{L}{L_p} e_{pd} - Lx_d \\ e_q = -L\omega_{red} i_d + \frac{rL_p - r_p L}{L_p} i_{pq} + \frac{L}{L_p} e_{pq} - Lx_q \end{cases} \quad (10)$$

¹ Este desarrollo es análogo al que se hace en coordenadas de campo para el control desacoplado del flujo y par en una máquina de inducción [5].

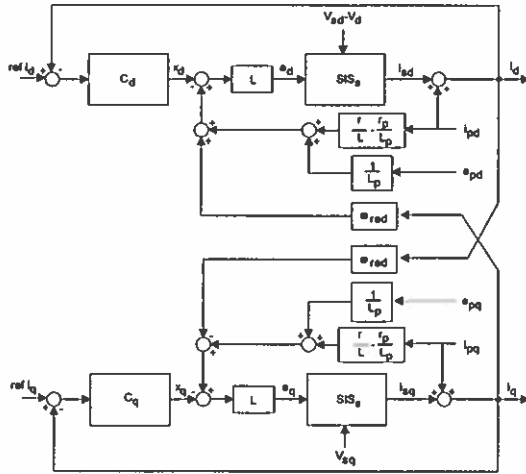


Fig. 4. Esquema de control de i_{dq} .

Las ecuaciones de desacoplo son fundamentales para el control de i_d e i_q , de ellas se obtiene la tensión que tiene que aplicar el inversor serie en cada instante en función de las variables de salida de los controladores y de las variables de estado del sistema. En Fig. 4 se sintetiza el regulador del compensador serie.

3.2. Compensador paralelo

El estudio del compensador paralelo es análogo al del compensador serie. Desdoblando (2) en ejes d y q.

$$\begin{cases} \frac{di_{pd}}{dt} = -\frac{r_p}{L_p} i_{pd} + \omega_{red} i_{pq} + \frac{1}{L_p} e_{pd} \\ \frac{di_{pq}}{dt} = -\frac{r_p}{L_p} i_{pq} - \omega_{red} i_{pd} + \frac{1}{L_p} e_{pq} \end{cases} \quad (11)$$

En (11) se observa que existen acoplamientos entre i_{pd} y i_{pq} . La forma de eliminar estos acoplamientos ha sido descrita en detalle en la Sección 3.1, por lo que no es necesario repetirlo para el compensador paralelo.

Las ecuaciones dinámicas desacopladas del compensador paralelo son

$$\begin{cases} \frac{di_{pd}}{dt} = -\frac{r_p}{L_p} i_{pd} + x_{pd} \\ \frac{di_{pq}}{dt} = -\frac{r_p}{L_p} i_{pq} + x_{pq} \\ x_{pd} = \omega_{red} i_{pq} + \frac{1}{L_p} e_{pd} \\ x_{pq} = -\omega_{red} i_{pd} + \frac{1}{L_p} e_{pq} \end{cases} \quad (12)$$

y las ecuaciones de desacoplo

$$\begin{cases} e_{pd} = -L_p \omega_{red} i_{pq} + L_p x_{pd} \\ e_{pq} = L_p \omega_{red} i_{pd} + L_p x_{pq} \end{cases} \quad (13)$$

Fig. 5 sintetiza el control de i_{pd} e i_{pq} .

3.3. Control de la tensión del condensador de acoplamiento

La ecuación (6), que describe el comportamiento dinámico del condensador de acoplamiento, es una ecuación no lineal. Sin embargo, si se tiene en cuenta que

$$v_c \frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dv_c^2}{dt} \quad (14)$$

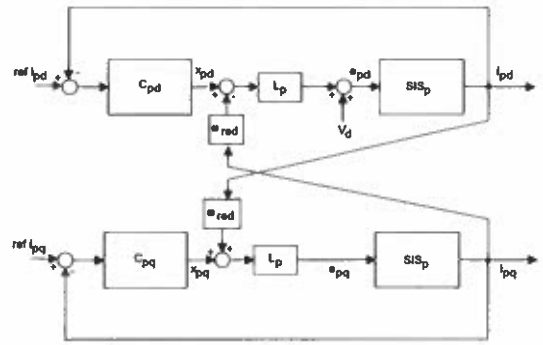


Fig. 5. Esquema de control de i_{pdq} .

entonces (6) puede expresarse como²:

$$\frac{dv_{dc}^2}{dt} = \frac{2}{C} m \quad \text{siendo} \quad m = p_e - p_{ep} \quad (15)$$

Por lo tanto, si se utiliza v_c^2 como variable de control, el control de la tensión del condensador es un problema lineal e independiente del punto de trabajo.

En Fig. 6 se representa el esquema de control de la tensión del condensador. El control se divide en una prealimentación y una realimentación. La prealimentación forma parte de la referencia de potencia al compensador paralelo, para que inyecte en la línea la potencia absorbida por el compensador serie. Para estimar p_e se utiliza la referencia de tensión del compensador serie y la medida de la corriente, siendo $\hat{p}_e = e_d^* i_{sd} + e_q^* i_{sq}$.

La función de transferencia de la prealimentación compensa la dinámica del compensador paralelo, para que el seguimiento de $\hat{p}_e$ sea lo más exacto posible. La realimentación de v_c tiene como objetivo restablecer la tensión del condensador a su punto de trabajo.

4. Resultados de simulación

Los controles de los compensadores serie y paralelo se han diseñado para obtener respuestas temporales similares a sistemas de primer orden con constantes de tiempo de aproximadamente 10ms, mientras que el de la tensión del condensador para una constante de tiempo 5 veces más lenta. El simulador se ha desarrollado tomando como modelo una línea de transporte de energía eléctrica de 400kV. Los datos del simulador, expresados en magnitudes unitarias, con la tensión y la corriente nominales de la línea como bases son: $L = 0,3183 \text{ ms}$ $r = 0,01$ $L_p = 3,1831 \text{ ms}$ $r_p = 0,01$ $C = 3,6172 \text{ ms}$.

Los resultados de Fig. 7 se han obtenido con una prealimentación unitaria de $\hat{p}_e$. El control de p y q es totalmente independiente y no existe ningún acoplamiento en los transitorios. En los transitorios, la potencia suministrada a través del inversor paralelo no es igual a

²La ecuación (15) también puede obtenerse derivando la ecuación de la energía almacenada en el condensador y sustituyendo las variaciones en el tiempo de la energía almacenada en el condensador por la potencia neta intercambiada.

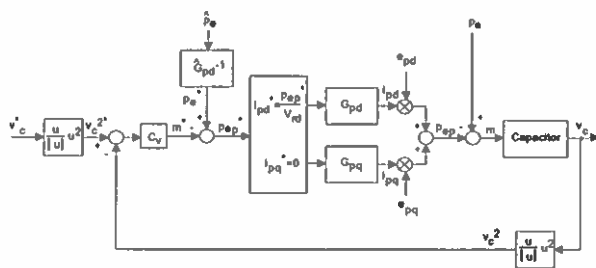


Fig. 6. Esquema de control de v_c .

la consumida por el inversor serie, y esto produce variaciones en la tensión del condensador de acoplamiento a veces superiores al 10%.

Los resultados de Fig. 8 se han obtenido con una prealimentación que compensa la dinámica con la que se ha modelado el compensador paralelo. El control de p y q es totalmente independiente y no existe ningún acoplamiento en los transitorios. La potencia consumida a través del inversor serie es prácticamente igual a la generada a través del inversor paralelo; en consecuencia, las variaciones de la tensión del condensador son muy pequeñas, inferiores al 1%.

5. Conclusiones

En este artículo se ha estudiado en detalle el sistema de control de un UPFC situado en una línea de transporte de energía eléctrica. Los detalles de la implantación práctica no son el objetivo de este trabajo y ya han sido presentados en [6].

Se ha demostrado que es posible el control rápido y desacoplado de la potencia activa y reactiva transportada por una línea utilizando un UPFC. Se ha propuesto una idea clara para el control coordinado de los dos convertidores de los que consta el UPFC: el convertidor serie es el que realmente regula el flujo de potencia por la línea, mientras el convertidor paralelo suministra la potencia consumida por el compensador serie y las pérdidas del conjunto, manteniendo constante la tensión del circuito intermedio de continua.

El procedimiento de desacople del control de las potencias activa y reactiva es similar al que se sigue en un motor asíncrono para controlar flujo y par en coordenadas de campo. Sin embargo, el procedimiento aquí es más sencillo, porque la velocidad del sistema de referencia para la transformada de Park es sensiblemente constante e igual a la frecuencia de la red.

Se ha probado, mediante simulación, que la tensión del condensador de acoplamiento permanece prácticamente constante si se estima el consumo del compensador serie y se prealimenta compensando la dinámica del compensador paralelo.

Actualmente se está probando un prototipo de laboratorio para validar las conclusiones más importantes.

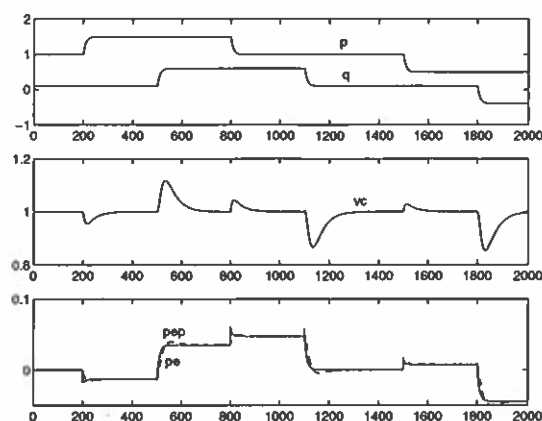


Fig. 7. Resultados con prealimentación unitaria.

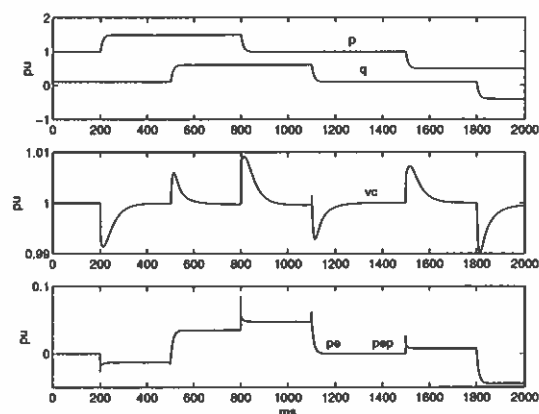


Fig. 8. Resultados con prealimentación que compensa la dinámica del compensador paralelo.

Referencias

- [1] L. Gyugyi, C. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson, and A. Edris. The unified power-flow controller: a new approach to power transmission control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(2):1085-1097, April 1995.
- [2] S.D. Round, Q. Yu, L.E. Norum, and T.M. Undeland. Performance of a unified power flow controller using a d-q control system. In *AC and DC Power Transmission*, pages 357-362. IEE, April/May 1996.
- [3] Werner Leonhard. Instantaneous power control, feature of today's electromechanical energy conversion. In *ICEM'96*, volume 3, pages 1-6, September 1996.
- [4] Hirofumi Akagi, Yoshihira Kanazawa, and Akira Nabae. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-20(3):625-630, May/June 1984.
- [5] A. García-Cerrada. *Observer-based field-oriented controller for an inverter-fed traction induction motor drive*. Ph. d. thesis, School of Electronic and Electrical Engineering, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, December 1990.
- [6] P. García-González and A. García-Cerrada. Control System for a UPFC in a transmission line. In *IECON'98*. IEEE, September 1998.