

## EL CONTROLADOR UNIFICADO DE FLUJO DE POTENCIA EN LA TRANSMISIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Rodolfo Moreno, V. Leonardo Paucar  
Sección de Postgrado, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
E-mails: rmoreno@uni.edu.pe, lpaucar@ieee.org

### RESUMEN

*El Controlador Unificado de Flujo de Potencia ó UPFC (Unified Power Flow Controller) es una de las más importantes aplicaciones de la electrónica de potencia en los modernos sistemas eléctricos de potencia. El UPFC constituye uno de los más recientes dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission System) con el que se busca flexibilizar la transmisión en corriente alterna permitiendo controlar, en forma independiente, los flujos de potencia activa y reactiva enviados a través de una línea de transmisión en alta tensión. El control sobre el flujo de potencia se logra por la inyección en serie con la línea de transmisión de una tensión alterna de magnitud y fase ajustables, generada por un inversor de tensión empleando la modulación de ancho de pulso (PWM por Pulse Width Modulation). La corriente de línea que pasa por los terminales de este convertidor y la tensión en los mismos establecerá un intercambio de potencia activa y reactiva, siendo necesaria para el manejo de la potencia activa que este inversor esté conectado a un segundo inversor controlado como rectificador PWM. En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos por simulación del UPFC conectado a un sistema elemental de transmisión de potencia para una primera evaluación y en donde el modelo utilizado para el UPFC se basa en el modelo de componente fundamental de tensión y corriente del inversor de tensión y en la aplicación de transformaciones d-q que permite plantear el control que desacoplará las componentes de potencia activa "P" y reactiva "Q".*

### ABSTRACT

*The Unified power flow controller (UPFC) is the most important contribution of the power electronics in the modern Electrical Power Systems. The UPFC is able to decouple the control of the active and reactive power sent trough the transmission line. This control is performed by injecting in series with the transmission line a voltage with regulated magnitude and phase, generated by a PWM voltage source inverter (VSI). When the current flow in the line originate in the inverter an active and reactive power. The active part of the power require to be either supplied or absorbed by a device, e.g. a second inverter. In this paper, simulation result obtained with a fundamental model of UPFC connected to a simple AC transmission system, and a control system base on "dq" transformation necessary to obtained the P and Q decoupled control is presented.*

### INTRODUCCIÓN

El UPFC fue propuesto con el objetivo de lograr un control en tiempo real y compensar dinámicamente un sistema de transmisión en corriente alterna, suministrando la flexibilidad necesaria para resolver los problemas que enfrenta los sistemas eléctricos de potencia[1]. Como un sistema más de la nueva tecnología de compensadores[2] el UPFC emplea al inversor tipo fuente de tensión como el elemento de

compensación serie y paralela los que son implementados usando topologías multi-nivel con las que se generan ondas de tensión con poca distorsión y que además permite el manejo de grandes potencias al asociarlas con dispositivos semiconductores de potencia como el tiristor con capacidad de desconexión a través de una señal de puerta o (Gate Turn off thyristor). El UPFC puede realizar varias funciones

como son: a)Regulador de tensión, b)Compensador Serie, c)Regulador del ángulo de fase y d)Controlador del flujo de potencia.

### PRINCIPIO DE OPERACIÓN

La nueva tecnología de compensadores se base en el uso de inversores de tensión que como se indico en [2] son equivalentes a las máquinas síncronas pero sin momento de inercia y por lo tanto de muy rápida respuesta. Si este inversor es conectado en paralelo con la red de potencia a través de un transformador o directamente a través de tres reactancias el convertidor estará en capacidad de inyectar o absorber potencia reactiva. El inversor también puede regular potencia activa entre sus terminales AC y DC como en el caso de un rectificador PWM como es desarrollo en [3]. En la figura 1 se muestra un esquema del UPFC compuesto por dos inversores acoplados por sus terminales en corriente continua. El inversor 1 conectado en serie con la línea a través del transformador Tse que es controlado para que inyecte una tensión de amplitud y fase regulable la que forzará al flujo de potencia a modificarse hasta los

niveles deseados. En este proceso, el inversor intercambia potencias activa y reactiva siendo esta última generada en los terminales del inversor con solo la presencia del condensador C, mientras que la capacidad de intercambiar potencia activa dependerá de que el inversor tenga una fuente apropiada de corriente continua conectada en paralelo con el condensador. En este caso el inversor 2 conectado en paralelo con la línea a través del transformador Tsh realizará la función de suministrar o absorber la potencia activa (Psh) que necesita el inversor 1 (Pse) y si el inversor 2 es diseñado con la suficiente capacidad de corriente este podrá realizar una segunda función que es la de mantener la tensión  $V_i$  constante donde esta conectado. De esta forma el UPFC además de la capacidad de regular el flujo de potencia transmitida a través de la línea, podrá regular la tensión localmente. Si no se dispusiera del inversor 2 el inversor 1 sería controlado solo para inyectar tensión en cuadratura con la corriente con el resultado del aumento o disminución de la misma pero sin el control independiente de P y Q. Esta forma de operación corresponde al del compensador estático síncrono serie (SSSC).

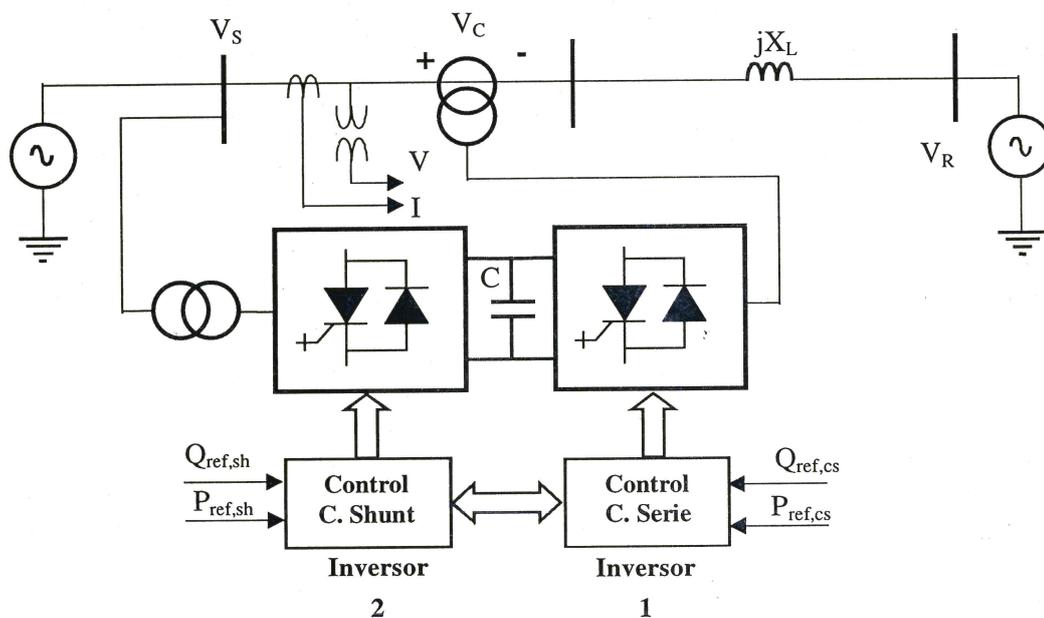


Fig. 1 Controlador Unificado de Flujo de Potencia (UPFC)

**MODELO DEL SISTEMA**

Para la simulación de los inversores de tensión se empleará el modelo comportamental de los convertidores (Behavior-Mode Simulation)[4] en esta aproximación el inversor es sustituido por un circuito constituido por fuentes de tensión y corriente controladas y las funciones de conmutación correspondiente. Una simplificación adicional es obtenida cuando solo la componente fundamental de la función de conmutación es considerada y las componentes de alta frecuencia producidas por la conmutación son ignoradas resultando finalmente el modelo de componente fundamental del inversor. En el caso de UPFC que está constituido por dos inversores de tensión (voltage source converter VSC) como el mostrado en la figura 2a y cuyo modelo fundamental es el mostrado en la figura 2b Las relaciones entre las tensiones y corrientes están determinadas por:

$$V_{ca} = f_{swa} \cdot \frac{V_{dc}}{2}, \quad V_{cb} = f_{swb} \cdot \frac{V_{dc}}{2}$$

$$V_{cc} = f_{swc} \cdot \frac{V_{dc}}{2} \tag{1}$$

$$i_o = \frac{1}{2} \cdot (i_{ca} \cdot f_{swa} + i_{cb} \cdot f_{swb} + i_{cc} \cdot f_{swc}) \tag{2}$$

donde:  $f_{swa}$ ,  $f_{swb}$  y  $f_{swc}$  corresponden a las funciones de conmutación donde solo se considera a la componente fundamental.

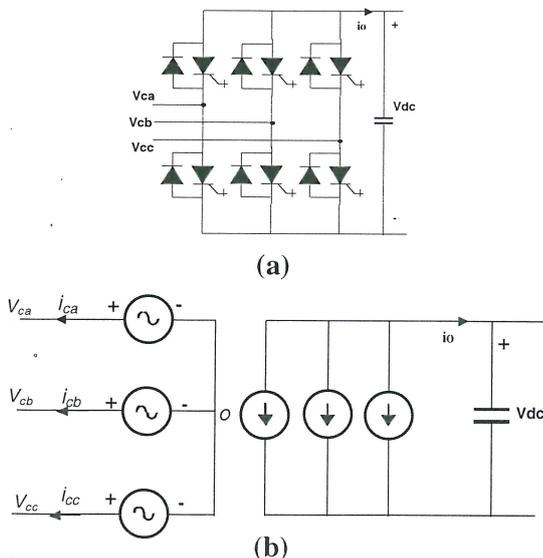


Fig. 2 (a) Inversor de tensión, (b) Modelo fundamental

**INVERSOR - 2  
(SHUNT O PARALELO)**

Este inversor está conectado en paralelo con la línea a través de tres reactancias de parámetros  $L_s$  y  $R_s$  que representan al transformador de acoplamiento  $T_{sh}$ . Las ecuaciones correspondientes por fase son:

$$\begin{bmatrix} v_{ia,n} \\ v_{ib,n} \\ v_{ic,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & & \\ & R_s & \\ & & R_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & & \\ & L_s & \\ & & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ca,o} \\ v_{cb,o} \\ v_{cc,o} \end{bmatrix} \tag{3}$$

este sistema es transformado a un sistema ortogonal de coordenadas[5] que gira con la frecuencia angular eléctrica a través de la transformación dada por:

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \tag{4}$$

y cuya posición  $\theta$  del eje directo quedará determinada por

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{v_{iq}}{v_{id}} \right) \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} v_{id} \\ v_{iq} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ia,n} \\ v_{ib,n} \\ v_{ic,n} \end{bmatrix} \tag{6}$$

aplicando la transformación (4) a la matriz del sistema se tienen la expresión matricial de las corrientes del inversor 2

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & w \\ -w & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} v_i - v_{cd} \\ v_{cq} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$w = \frac{d\theta}{dt} \tag{8}$$

de este resultado se observa que el eje d del sistema ortogonal coincide con el vector de tensión  $V_i$  como se muestra en la figura 3, que establece que  $v_{id} = |V_i|$  y  $v_{iq} = 0$ . Esta elección para la orientación del sistema se debe a que de esta manera se logra el desacoplamiento de las potencias activa y reactiva que controlará el inversor:

$$p_C(t) = \frac{3}{2} \cdot i_{cd} \cdot V_i, \quad q_C(t) = \frac{3}{2} \cdot i_{cq} \cdot V_i \quad (9)$$

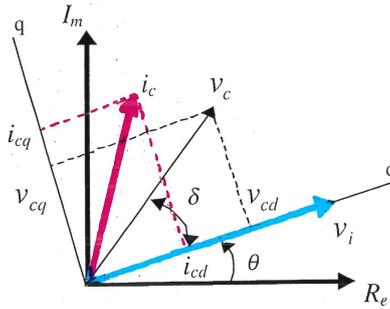


Fig. 3 Sistema Ortogonal d-q de referencia para el control del inversor 2.

En este sistema las variables eléctricas aparecerán como señales en corriente continua lo que facilitará el diseño de los reguladores. El control de este inversor se realizará determinando las componentes de la tensión  $V_c$  de salida (figura 3) de manera que  $v_{cq}$  controle la componente reactiva  $i_{cq}$  que a su vez regulará la tensión  $V_p$ , y la componente  $v_{cd}$  controle la componente activa  $i_{cd}$  que se encargará de mantener la tensión  $V_{dc}$  constante en los terminales de condensador de enlace y permitirá el flujo bidireccional de potencia activa entre los inversores como en el caso de los rectificadores PWM, que es necesario para que el inversor 1 opere como controlador del flujo de potencia.

De la matriz transformada del sistema (7) se tiene:

$$\frac{di_{cd}}{dt} + \frac{R_s}{L_s} i_{cd} = w \cdot i_{cq} + \frac{1}{L} (v_i - v_{cd}) \quad (10)$$

$$\frac{di_{cq}}{dt} + \frac{R_s}{L_s} i_{cq} = -w \cdot i_{cd} + \frac{1}{L} (v_{cq}) \quad (11)$$

en las que se observa términos de acoplamiento entre los ejes d y q los que podrán ser compensados escogiendo a las componentes de la tensión  $V_c$  como sigue:

$$v_{cd} = L \cdot (w \cdot i_{cq} - x_d) + v_i \quad (12)$$

$$v_{cq} = L \cdot (w \cdot i_{cd} + x_q) \quad (13)$$

sustituyendo (12) y (13) en (10) y (11) reducen al sistema como se indica en (14) y (15)

$$\frac{di_{cd}}{dt} + \frac{R_s}{L_s} i_{cd} = x_d \quad (14)$$

$$\frac{di_{cq}}{dt} + \frac{R_s}{L_s} i_{cq} = x_q \quad (15)$$

donde  $x_d$  y  $x_q$  son variables que representan las tensiones de salida de los reguladores tipo PI ( $k_p$ : constante proporcional y  $k_i$ : constante integradora).

$$x_d = (k_p + k_i / s) \cdot (i_{cd, ref} - i_{cd}) \quad (16)$$

$$x_q = (k_p + k_i / s) \cdot (i_{cq, ref} - i_{cq}) \quad (17)$$

y las señales de referencia  $i_{cd, ref}$  y  $i_{cq, ref}$  son las generadas por los reguladores de tensión  $V_{dc}$  y  $V_i$  respectivamente. Con las tensiones de (12) y (13) se obtendrán las señales para el control del inversor 2 (figura 4) es decir el índice de modulación (IM) y ángulo de fase  $\delta$ .

$$IM = \frac{\sqrt{v_{cd}^2 + v_{cq}^2}}{V_{dc} / 2} \quad (18)$$

$$\delta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{v_{cq}}{v_{cd}} \right) \quad (19)$$

$$\rho = \theta + \delta \quad (20)$$

En la Figura 5 se muestra un resultado de simulación de la inyección de corriente del inversor 2 y el efecto sobre la tensión donde esta conectado.

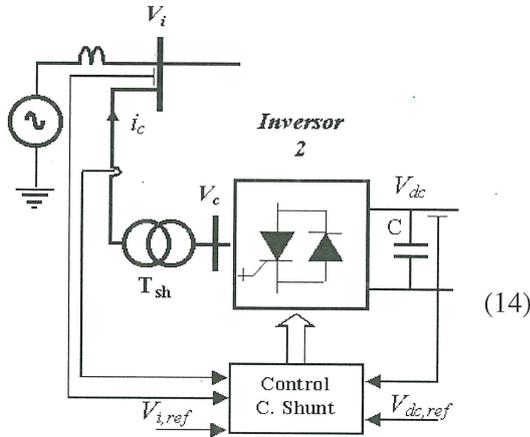


Fig. 4 Esquema de señales para el control del inversor 2.

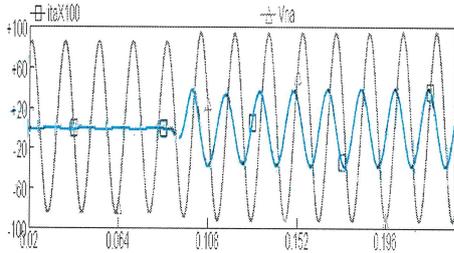


Fig. 5 Tensión en punto de conexión  $V_i$  y corriente  $i_c$  del inversor 2.

### INVERSOR - 1 (SERIE)

Como se indicó inicialmente este inversor actúa inyectando una tensión en serie con la línea y puede establecerse un sistema de ecuaciones por fase en forma similar a la matriz en (3) pero en este caso considerando a las tensiones  $V_r$ ,  $V_{se}$  y  $V_r$  y a las corrientes por las líneas  $i_s$  así como la resistencia  $R_l$  y reactancia  $X_l$  de la línea que incluye a la reactancia de dispersión del transformador  $T_{se}$  que acopla serialmente al inversor 1 con línea. El sistema luego es transformado a un sistema ortogonal d-q de referencia elegido de manera que el eje d coincida con el vector de tensión de recepción  $V_r$  [6] [7] de manera que  $v_{rd} = |V_r|$  y  $v_{rd} = 0$  (figura 6). La transformación aplicada es similar a (5) y (6) pero aplicadas sobre  $V_r$ , obteniéndose el siguiente sistema matricial:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_l}{L_l} & w \\ -w & -\frac{R_l}{L_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_l} \begin{bmatrix} v_{id} - v_{rd} - v_{se,d} \\ v_{iq} - v_{se,q} \end{bmatrix} \quad (21)$$

de la cual se establecerá las componentes de la tensión  $v_{se,d}$  y  $v_{se,q}$  que controlarán en forma desacoplada a las componentes real e imaginaria ( $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ) de la corriente transmitida  $i_s$  respectivamente:

$$v_{se,d} = v_{id} - v_{rd} - L_l (x_{sd} - w \cdot i_{sq}) \quad (22)$$

$$v_{se,q} = v_{iq} + L_l (x_{sq} - w \cdot i_{sd}) \quad (23)$$

$x_{sd}$  y  $x_{sq}$  son variables que representan las tensiones de salida de los reguladores tipo PI

$$x_{sd} = (k_{sp} + k_{si} / s) \cdot (i_{sd,ref} - i_{sd}) \quad (24)$$

$$x_{sq} = (k_{sp} + k_{si} / s) \cdot (i_{sq,ref} - i_{sq}) \quad (25)$$

con las que se establecerá las señales de control del inversor 1

$$IM_s = \frac{\sqrt{v_{se,d}^2 + v_{se,q}^2}}{V_{dc} / 2} \quad (26)$$

$$\delta_s = tg^{-1} \left( \frac{v_{se,q}}{v_{se,d}} \right) \quad (27)$$

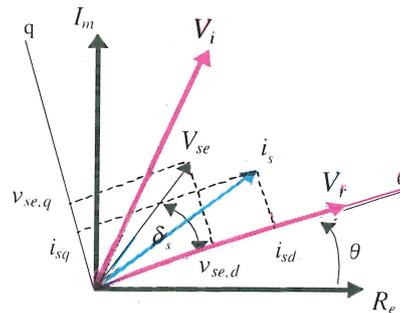


Fig. 6 Sistema Ortogonal d-q de referencia para el control del inversor 1.

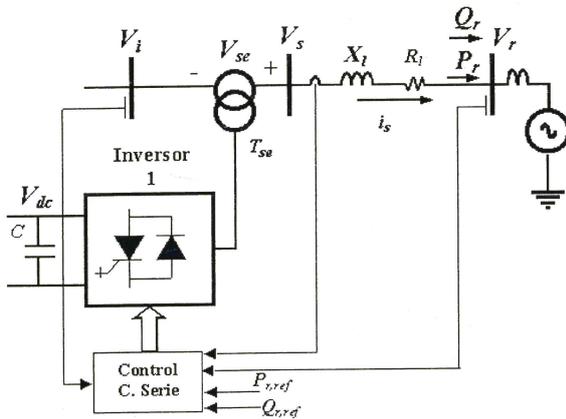


Fig. 7 Esquema de señales para el control del inversor 1

Los valores de referencia en (24) y (25) son obtenidos a partir de la potencia activa y reactiva deseada en el lado de recepción (Figura 7) que podrá ser controlada a partir de la tensión y la relación (28) deducida del diagrama vectorial de la Figura 6:

$$\begin{bmatrix} i_{sd,ref} \\ i_{sq,ref} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{v_r} \begin{bmatrix} P_{r,ref} \\ Q_{r,ref} \end{bmatrix} \quad (28)$$

## SIMULACIÓN

La simulación fue desarrollada en el ambiente del programa EMTDC[8] desarrollado para realizar estudios de control y transitorios en sistemas eléctricos de potencia.

El modelo del UPFC fue probado en un sistema de transmisión de energía (Figura 1 y 9) que consiste en dos fuentes generadoras  $V_i$  y  $V_r$  de 115kV, 60Hz de tensión de línea con un ángulo de potencia de 15° grados conectadas a través de una línea de transmisión trifásica con reactancia y resistencia por fase de  $X_i = 10.8$  ohm y  $R_i = 11.0$  ohm. El UPFC es colocado en el lado de envío y conectado por dos transformadores  $T_{sh}$  y  $T_{se}$  para realizar el control sobre el flujo de potencia  $P_r$  y  $Q_r$  en el lado de la recepción. La tensión DC en los terminales del condensador se mantiene en 40kV. El inversor 2 conectado en paralelo con la barra  $V_i$  (Figura 4) controlará la tensión en este punto y absorberá o entregará la potencia activa que necesite el inversor 1 para su operación.

Durante los primeros 50ms el UPFC no está habilitado es decir  $V_{se} = 0$  de manera que se puede verificar el flujo de potencia activa y reactiva ( $P_r = 133$ Mw,  $Q_r = -176.05$  Mvar) que llega a la barra de recepción en forma natural (figura 8a), así como la corriente por cada línea  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$  y  $i_{sc}$  (1.1 KA-r.m.s.), (figura 8b).

En  $t = 50$ ms el UPFC es habilitado y regulado para que  $P_r$  y  $Q_r$  sean cero ( $V_{se} = 17.2$ kV/fase) y en  $t = 100$ ms el control de UPFC es modificado ( $V_{se} = 14$ kV/fase) para que permita solo el flujo de la potencia activa ( $P_r = 165.25$  Mw) verificando que en esta operación la potencia reactiva es cero.

En la Figura 8c se muestra la tensión y corriente en el lado de la recepción y se verifica que están en fase (factor de potencia uno) cuando el UPFC es controlado solo para transmitir potencia activa.

En la Figura 8d se muestra la tensión en la barra  $V_i$  y la tensión  $V_{se}$  inyectada por el inversor 1 y en la Figura 8e se muestra a la tensión en  $V_i$  y la tensión en la barra  $V_s$  ( $V_s = V_i + V_{se}$ ).

El control del UPFC luego es regulado para que se envíe además potencia reactiva como se muestra en las figuras 9a es decir  $P_r = 160.5$  Mw y  $Q_r = 176$  Mvar y en este caso  $V_{se} = 27.5$ kV/fase y  $I_s = 1.187$  kA-r.m.s.

En las Figura 10 se muestra el caso en el que el UPFC es regulado para tener  $P_r = -160.5$  Mw. y  $Q_r = -176.06$  Mvar (negativos). La corriente toma el valor máximo de  $I_s = 1.18$  kA. Se observa en la Figura 10d que  $V_{se}$  se modifica en amplitud y fase automáticamente para satisfacer las demanda de potencia y en la Figura 10c se observa a la tensión y corriente del lado de la recepción mostrando que en el intervalo de solo  $P_r$  negativo  $V_r$  y  $I_s$  están desfasados en 180° y en el último intervalo donde solo se mantiene la potencia reactiva  $Q_r$  el ángulo de fase es de 90° grados. La velocidad con que se producen los cambios de P y Q son muy rápidos de un poco más de 1/4 de ciclo de onda.

## CONCLUSIONES

- Los resultados de simulación demuestran que el UPFC puede controlar en forma independiente la potencia activa y reactiva que llega a la barra de recepción.

- La dinámica de los cambios producidos es muy rápida, característica que es aprovechada para manejar los disturbios dinámicos de los sistemas de potencia.
- Se establece una nueva alternativa de control del flujo de potencia sin precedentes donde el UPFC fuerza a la potencia activa y reactiva en determinado punto de la línea de transmisión a mantenerse igual a los valores pre-establecidos a través del control continuo de lazo cerrado.
- Este trabajo permitió inicialmente entender la operación del UPFC y su potencial para flexibilizar la transmisión de potencia.
- Se espera mejorar el modelo del UPFC utilizando modelos de inversores multi-nivel, así como emplear otras técnica de control de manera de obtener resultados mas próximos a los reales.

REFERENCIAS

1. **L. Gyugyi, T. R. Rietman, A. Edris**, "The Unified Power Flow Controller A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp. 1085-1097, April 1995.
2. **L. Gyugyi**, "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by solid-state Synchronous Voltage Source", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 904-911, April 1994.
3. **Moham, Undeland, Robbins**; "Power Electronics converters, Applications and Design", John Willey and Sons; Ed. 1995; page 494-499.
4. **H. Jim**, "Behavior-Mode Simulation of Power Electronic Circuits", IEEE Transaction on Power Electronics. Vol. 12, No. 3, pp. 443-452, May 1997.
5. **C. Schauder, H. Mehta** "Vector Analysis and control of advanced static VAR Compensators", IEE Proceedings-c, Vol. 140, No.4, pp. 299-306, July 1993.
6. **I. Papic, P. Zunko, D. Povh**, "Basic Control of Unified Power Flow Controller", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 12, No. 4, pp. 1734 - 1739, November 1997.
7. **E. Uzunovic, C. A. Cañizares, and J. Reeve**, "Fundamental Frequency Model of Unified Power Flow Controller", North America Power

Symposium (NAPS), Cleveland, Ohio pp. 294-299, October 1998.

8. **PSCAD/EMTDC V3 Program/Manitoba HVDC Research Center**, 1999.

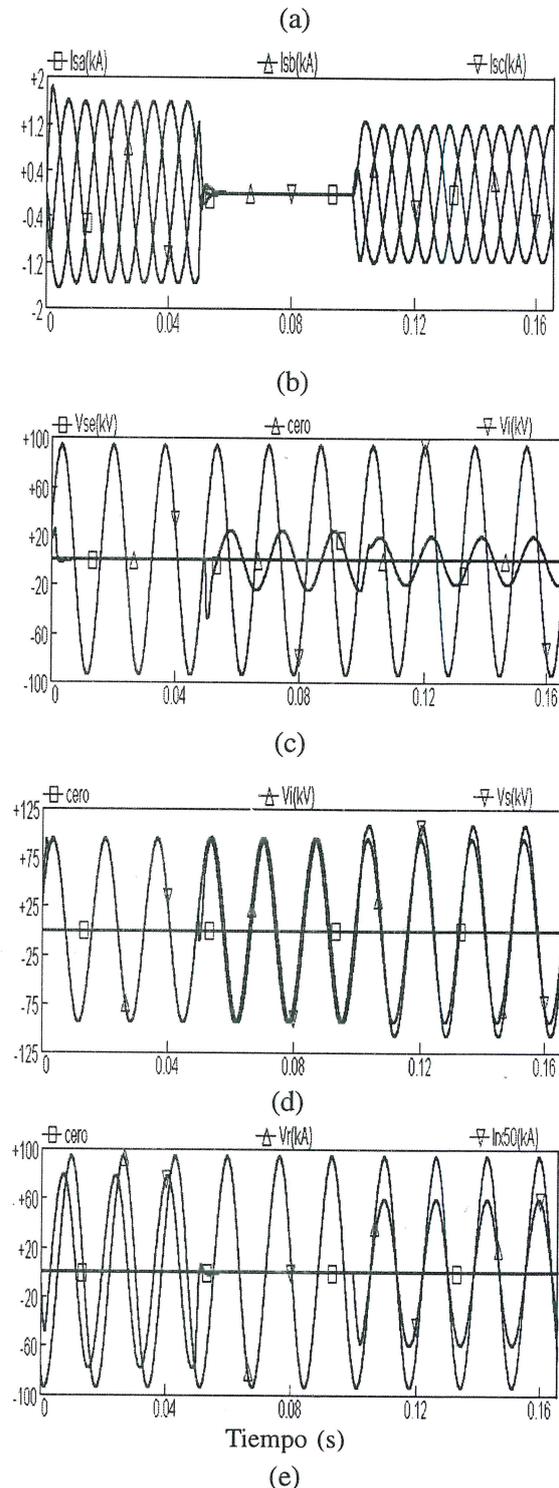
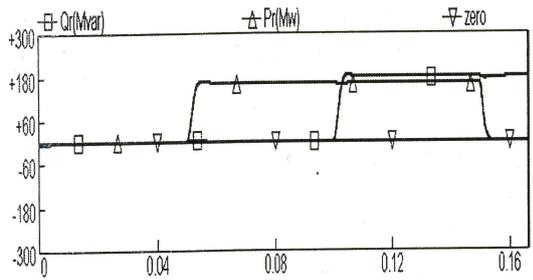
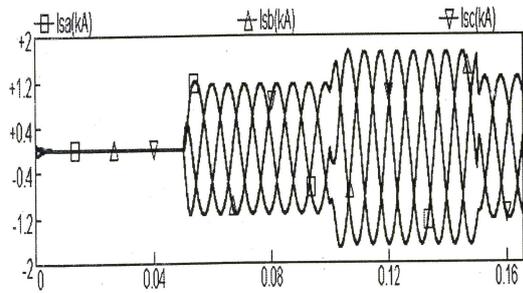


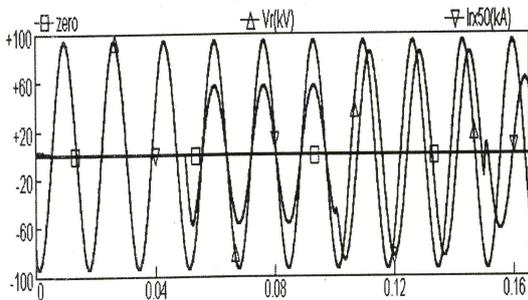
Fig. 8 Operación del UPFC para  $P_r > 0$  y  $Q_r = 0$ .



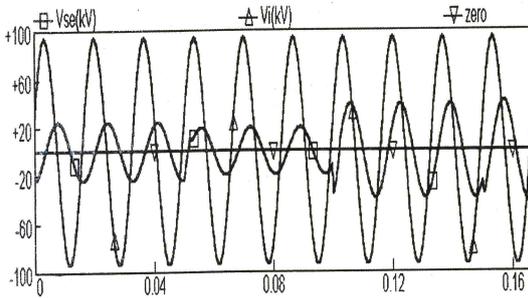
(a)



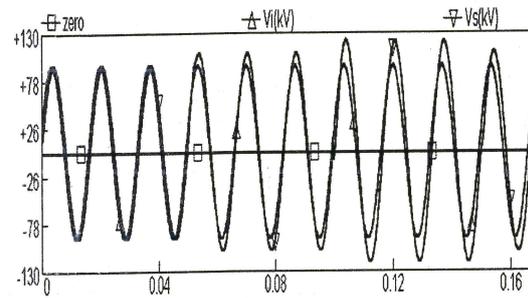
(b)



(c)

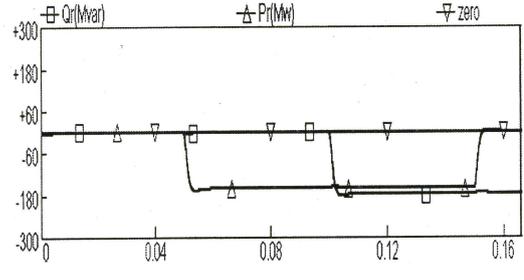


(d)

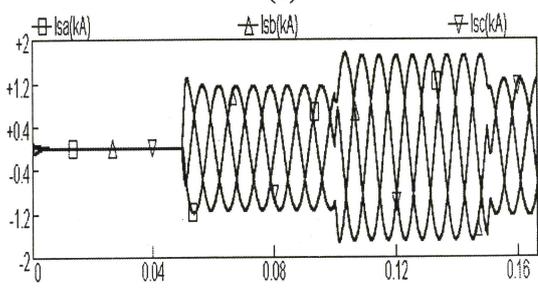


(e)

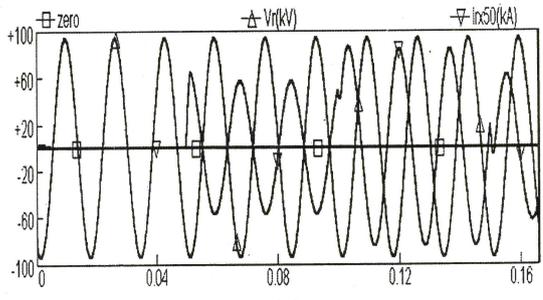
Fig. 9 Operación del UPFC para  $Pr > 0$  y  $Qr > 0$ .



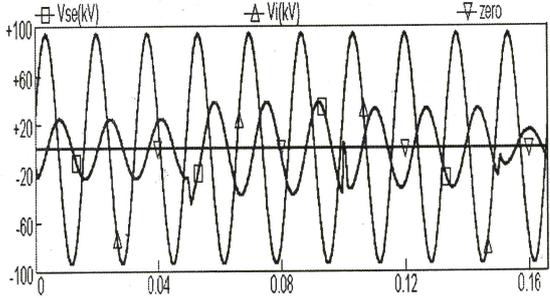
(a)



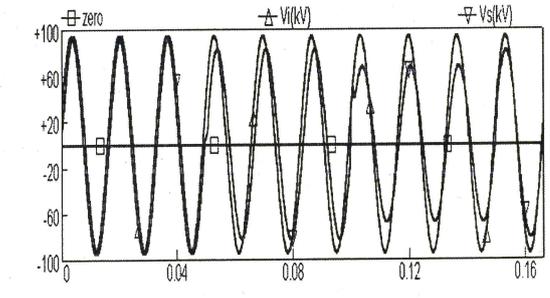
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 10 Operación del UPFC para  $Pr < 0$  y  $Qr < 0$ .