

## MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE UN CONTROLADOR UNIFICADO DE POTENCIA

**Germán D. González\***, **Gabriel J. López\***, **Jorge W. González\*\*†**, **Idi A. Isaac\***, **Hugo A. Cardona\***

\*Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, of. 11-261, Medellín, Colombia,

Recibido 01 Marzo 2009; aceptado 04 Junio 2009

Disponible en línea: 30 Junio 2009

Resumen: Se presenta el análisis y simulación de un UPFC conectado a un sistema elemental de dos máquinas para evaluaciones iniciales. El modelo empleado para el UPFC está encaminado al control de la magnitud de tensión en el extremo receptor del sistema de potencia implementado. *Copyright © 2007 UPB.*

Abstract: it is shown the analysis and simulation of the UPFC connected to usual elementary two machine system for a first evaluation, where the model used for the UPFC is based for voltage magnitude control in the receiving end of the implemented power system.

Keywords: FACTS, UPFC, PWM, VSC, PSCAD/EMTDC.

### 1. INTRODUCCIÓN

El UPFC, “*Unified Power Flow Controller*” es conocido en español como “Controlador Unificado del Flujo de Potencia”. Este equipo surge del mejor aprovechamiento de la electrónica de potencia y de los sistemas automáticos de control en pro de las necesidades de los sistemas eléctricos de potencia. El UPFC forma parte del conjunto de equipos para control dinámico en corriente alterna, FACTS ([Gyugyi, Hingorani, 2000](#)). Una nueva generación de controladores ha surgido con el desarrollo de componentes como el IGBT, “*Insulated Gate Bipolar Transistor*” y el GTO “*Gate Turn-Off*”, los cuales pueden alcanzar, p. ej., valores de 6 kV y 6 kA. Estos controladores están basados en fuentes inversoras de tensión e incluyen dispositivos tales como el STATCOM (Compensador Estático Síncrono), el

SSSC (Compensador Serie Estático Síncrono), y el UPFC (Controlador Unificado de Flujo de Potencia).

El STATCOM es utilizado principalmente para regular la tensión en los sistemas de transmisión, pero también puede ser utilizado para mejorar la estabilidad dinámica de un sistema. Por otra parte, el SSSC puede ser comparado un cierto grado con el TCSC (Capacitor Serie Controlado por Tiristores), ya que éste permite realizar cambios en la impedancia de la línea de transmisión a través de una fuente de tensión en serie con la línea.

Dentro de esta generación de dispositivos FACTS, el UPFC es uno de los más versátiles ya que no solo puede complementar las funciones del STATCOM, el TCSC, y el regulador de ángulo de fase, sino que además ofrece gran flexibilidad al combinar algunas

---

† Autor al que se le dirige la correspondencia:

Tel. (+574) 3544522 ext 9586, fax 4118779.

E-mail: [jorgew.gonzalez@upb.edu.co](mailto:jorgew.gonzalez@upb.edu.co) (Jorge W. González).

de las funciones de los controladores mencionados. Debido a esta característica el UPFC puede controlar en tiempo real todos los parámetros básicos de un sistema de potencia o cualquier combinación de ellos para controlar la potencia transmitida.

En este artículo se comprobarán los beneficios que el UPFC representa para los sistemas de transmisión mediante el desarrollo de un modelo y sus simulaciones en el PSCAD/EMTDC.

## 2. MARCO TEÓRICO

El UPFC se diseñó para dar control en tiempo real y suministrar compensación dinámica a los sistemas de transmisión en ca (Ghahnavieh *et al.*, 2008; Gyugyi, Hingorani, 2000; Kundur, 1994), proporcionando una flexibilidad multifuncional requerida para dar solución a muchos de los problemas que se presentan en los sistemas de potencia. El UPFC es capaz de controlar simultánea o selectivamente, todos los parámetros que tienen que ver con el flujo de potencia en las líneas de transmisión: tensión, impedancia y ángulo de fase. Alternativamente, este dispositivo puede controlar independientemente el flujo de potencia real y reactiva en la línea.

### 2.1. Principios Básicos de Operación del UPFC

Desde el punto de vista conceptual, el UPFC es una generalización de una fuente de tensión sincrónica (SVS), representada en la frecuencia fundamental por el fasor  $V_{pq}$  con magnitud controlable  $V_{pq}$ , que se encuentra entre 0 y  $V_{pqmax}$ ; y ángulo  $\rho$  entre 0 y  $2\pi$ ; en serie con la línea de transmisión. Como ilustración se tiene un sistema elemental de dos máquinas, ver Fig. 1. En esta operación el SVS intercambia potencia real y reactiva con el sistema de transmisión. Como el SVS solo puede intercambiar potencia reactiva, éste suministra o absorbe la potencia real que necesita para efectuar dicho intercambio. En el arreglo del UPFC, la potencia real es proporcionada por el extremo emisor.

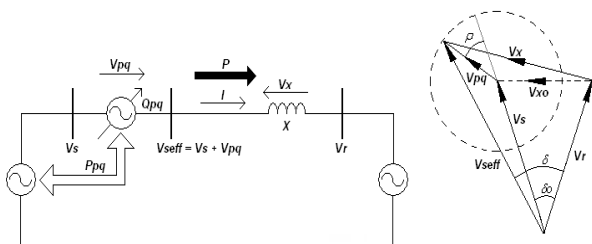


Fig. 1. Representación conceptual del UPFC.

La estructura básica del UPFC se ilustra en la Fig. 2. El UPFC consiste en dos convertidores o fuentes inversoras de tensión, compuestos de GTO's trifásicos. Los dos convertidores son operados desde un capacitor que sirve como enlace de cd. El convertidor 1, conectado en derivación se utiliza para suministrar la potencia real demandada por el convertidor 2 a través del enlace de cd. La potencia real intercambiada está determinada por la diferencia angular de la tensión del convertidor y la tensión del sistema de ca. El convertidor 1 también puede generar o absorber potencia reactiva en sus terminales de ca, por lo tanto, también puede ejecutar las funciones de un compensador estático de Var's. El convertidor 2 realiza la función principal del UPFC, inyectando una tensión de magnitud y ángulo controlable en serie con la línea a través de un transformador de acoplamiento. Esta tensión de ca se produce por la conmutación de tiristores alimentados con cd desde el capacitor de enlace.

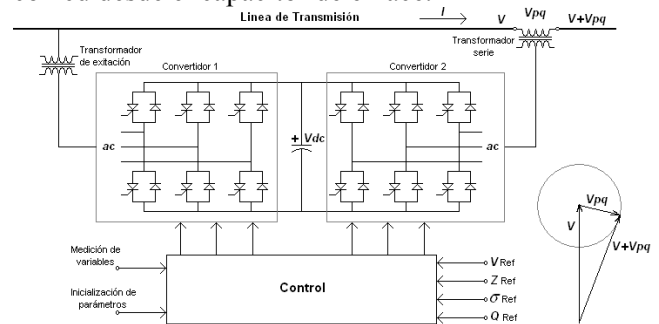


Fig. 2. Diagrama esquemático del UPFC.

### 2.2. Capacidad de Control del UPFC

Analizando la operación del UPFC desde el punto de vista de la transmisión de energía tradicional, basada en la compensación shunt reactiva, compensación serie y en la regulación del ángulo de fase, el UPFC puede desempeñar todas estas funciones y así reunir múltiples objetivos de control con la adición de la tensión inyectada  $V_{pq}$ , con magnitud y ángulo de fase apropiados. Usando diagramas fasoriales, las funciones básicas de control del flujo de potencia por medio del UPFC están ilustradas en la Fig. 3.

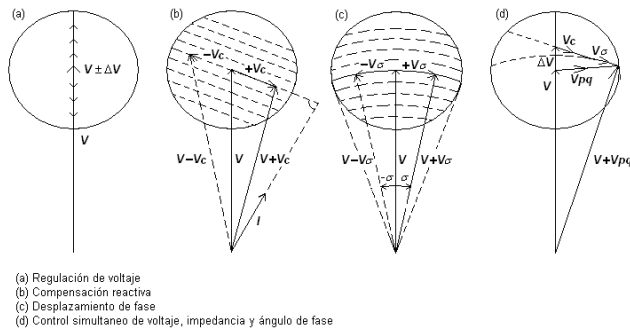


Fig. 3. Diagramas fasoriales del UPFC.

La regulación de la tensión, con la inyección de tensión continuamente variable, se ilustra en la Fig. 3(a) para incrementos de tensión  $V_{pq} = \pm\Delta V$  ( $\rho = 0$ ). Este control es funcionalmente similar a lo obtenido con un transformador cambiador de taps teniendo pasos infinitamente pequeños.

La compensación reactiva en serie se ilustra en la Fig. 3(b) donde  $V_{pq} = V_q$  es inyectado en cuadratura con la corriente de la línea  $I$ . Funcionalmente, este control es similar al de la compensación serie inductiva y capacitiva obtenida por el SSSC. Si se desea, se puede dejar constante la tensión inyectada en serie, independiente de la variación de la corriente de la línea, o puede variarse en proporción a la corriente de la línea para simular la compensación que se obtiene con un capacitor o reactor en serie.

La regulación del ángulo de fase se ilustra en la Fig. 3(c) donde  $V_{pq} = V_\sigma$  se inyecta con una relación angular con respecto a  $V_s$ , alcanzando el desplazamiento de fase deseado  $\sigma$  sin algún cambio en la magnitud. Así el UPFC puede funcionar como un regulador perfecto del ángulo de fase, y puede suministrar la potencia reactiva implicada con el control del ángulo de transmisión por la generación interna de Var's.

En la Fig. 3(d) se ilustran múltiples funciones del control del flujo de potencia realizadas por la regulación simultánea de tensión en el terminal, la compensación capacitiva serie en la línea y el desplazamiento de fase. Se puede notar que  $V_{pq} = \Delta V + V_q + V_\sigma$ . Esta capacidad funcional es única en el UPFC, ningún equipo convencional tiene la capacidad de realizar funciones múltiples similares.

### 3. MODELACIÓN DEL UPFC

El UPFC está compuesto por dos fuentes convertidoras de tensión, "Voltage Source Converters", VSC, las cuales poseen dispositivos

semiconductores con capacidad de bloqueo, un capacitor común de cd entre las dos fuentes, y dos transformadores de acople para conexión al sistema de potencia. Esta modelación se asemeja a la empleada en varias referencias (Alomoush, 2003; Ghahnavieh et al., 2008; Wang, 1999; Zhou et al., 2004). La estructura básica del UPFC se ilustra en la Fig. 4.

El principal objetivo del convertidor serie es producir una tensión de ca con magnitud y ángulo de fase controlables, e inyectar esta tensión a la frecuencia fundamental en la línea de transmisión; e intercambiando potencia real y reactiva en sus terminales de ca a través del transformador serie. El convertidor shunt suministra la potencia real requerida en los terminales de cd, de esta manera la potencia real fluye entre los terminales de ca del convertidor serie y shunt a través del acople común de cd.

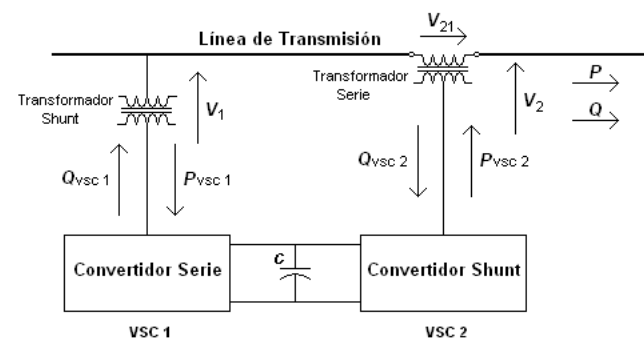


Fig. 4. Estructura básica del UPFC.

El control del UPFC actúa sobre los interruptores GTO de los convertidores serie y shunt, los cuales son conmutados por la técnica del PWM (Modulación por ancho de pulso). Las señales senoidales de tensión medidas del sistema de potencia, tanto para el extremo emisor como para el extremo receptor, se utilizan como referencia para construir la señal senoidal de potencia y la señal diente de sierra, las cuales establecen en qué instantes se encienden y apagan los interruptores GTO.

En realidad el control actúa básicamente sobre la señal senoidal de potencia del PWM, tanto en el convertidor shunt como en el convertidor serie, controlando su magnitud y fase de acuerdo con los modos de operación establecidos por el UPFC, donde  $m_{sh}$  y  $m_{se}$  son las variables que representan la modulación de la amplitud de la señal senoidal de potencia del convertidor shunt y serie respectivamente.  $\alpha$  y  $\beta$  son las variables que representan el cambio de fase de estas señales en el

mismo orden (Uznovic *et al.*, 1998). La Fig. 5 muestra el esquema de control simplificado del UPFC.

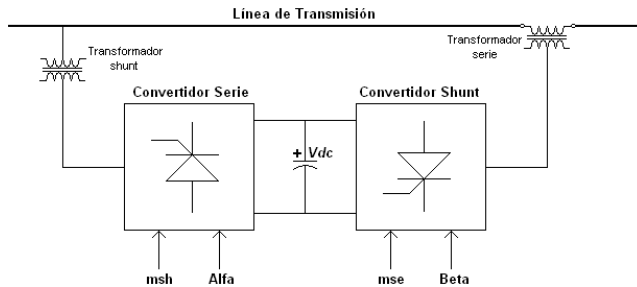


Fig. 5. Esquema de control simplificado del UPFC.

En el convertidor shunt la magnitud de la señal senoidal de potencia es controlada por la señal *msh* y el ángulo de fase por la señal *Alfa*, las cuales controlan la potencia reactiva en el extremo emisor y la tensión de cd en el acople común respectivamente.

En el convertidor serie la magnitud de la señal senoidal de potencia es controlada por la señal *mse* y el ángulo de fase por la señal *Beta*, las cuales controlan la magnitud del tensión inyectada en serie en el extremo receptor y el flujo de potencia real entre los dos convertidores respectivamente.

La configuración de los convertidores del UPFC es la de un puente conversor trifásico de onda completa, los cuales realizan las funciones de rectificación e inversión de la señales de tensión. La corriente promedio en la barra de cd determina el flujo de potencia neta y de operación neta de ambos convertidores.

#### 4. SIMULACIÓN DEL UPFC

La simulación ilustra una situación específica del UPFC dentro de un sistema elemental de dos máquinas: Aunque el UPFC posee varios modos de control, el alcance de esta simulación es modelar el funcionamiento de este dispositivo controlando la tensión en el extremo receptor del sistema después de ser aplicada una falla trifásica en ese punto. La modelación se realizará mediante el programa PSCAD/EMTDC (Manitoba, 2009), el cual se ha convertido en una herramienta referencial para modelación y simulación de equipos de control en redes eléctricas. En otros trabajos se han realizado modelaciones con aplicaciones particulares en líneas, incluyendo grandes perturbaciones (Das, Kalyani, 2007).

#### 4.1. Parámetros de la Simulación

Para el análisis posterior del UPFC se tendrán en cuenta los siguientes valores principales del extremo emisor y el extremo receptor del sistema de potencia, incluidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores equivalentes del sistema de potencia.

	Extremo Emisor	Extremo Receptor
Tensión ca (LL, RMS)	100 kV	100 kV
Ángulo grados	0	30
Impedancia X1	0.1 H	0.1 H
Impedancia R1	1 $\Omega$	1 $\Omega$
Impedancia Xo	0.1 H	0.1 H
Impedancia Ro	1 $\Omega$	1 $\Omega$

La Tabla 2 muestra las tensiones de los transformadores serie y shunt.

Tabla 2. Tensiones de los transformadores.

	Transformador shunt	Transformador serie
Tensión lado alta	100 kV	62.5 kV
Tensión lado baja	62.5 kV	5 kV

La conexión de lado de alta del transformador shunt es en Y y la conexión del lado de baja en Delta. La conexión del lado de alta del transformador serie es en Delta y la conexión del lado de baja consta de tres devanados separados los cuales van en serie con la línea de transmisión en el extremo receptor. Adicionalmente el capacitor común de cd en ambos convertidores es de 500  $\mu\text{f}$ .

#### 4.2. Dispositivos de Potencia

La Fig. 6 muestra el sistema de potencia implementado en el programa PSCAD/EMTDC. Para efectos de la simulación el sistema está conformado por dos fuentes de tensión trifásicas, las cuales representan el sistema elemental de dos máquinas; dos fuentes convertidoras de tensión basadas en tiristores GTO; un capacitor común de cd y dos transformadores de acople, serie y shunt.

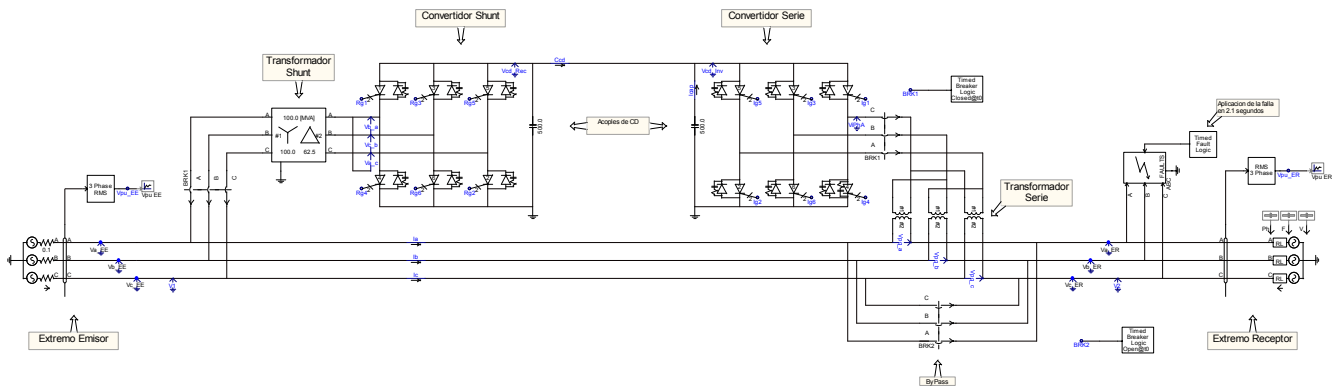


Fig. 6. Sistema de potencia modelado en PSCAD/EMTDC.

### 4.3. Dispositivos de Control

El control de disparo de los GTO en ambos convertidores funciona de igual manera. Las señales senoidales de tensión medidas del sistema de potencia, tanto en el extremo emisor como en el extremo receptor, se utilizan como referencia para construir la señal diente de sierra o señal portadora, y la señal senoidal de potencia o señal de referencia, con el fin de emplear la técnica de conmutación PWM. La construcción de ambas señales se realiza por medio de un PLL, el cual genera una función rampa, en este caso theta, sincronizada con las señales de tensión medidas del sistema de potencia. La señal diente de sierra y la señal senoidal de potencia son construidas de la siguiente manera, para efectos de la simulación:

**Señal diente de sierra.** La función rampa generada por el PLL, es ajustada a 33 veces el valor de la frecuencia fundamental (1980 Hz) y limitada entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ . Por medio de dos generadores de señales triangulares se construye la señal diente de sierra la cual es la señal portadora que define en qué instantes se encienden y apagan los GTO correspondientes a cada convertidor. Para el caso del convertidor shunt las señales portadoras son TrgRon y TrgRoff, y para el convertidor serie TrgIon y TrgIoff.

**Señal senoidal de potencia.** La función rampa de seis pulsos generada por el PLL es convertida en una señal senoidal ajustada a la frecuencia fundamental (60 Hz), cuya magnitud y fase son controlables; y constituye la señal de referencia del PWM para activar y desactivar los GTO. Para el caso del convertidor shunt, las señales de referencia son

*RefRon* y *RefRoff*, y para el convertidor serie *RefIon* y *RefIoff*. El control de la señal de referencia para el convertidor shunt está dado por *msh* y *Alfa*, los cuales controlan la magnitud y la fase de la señal respectivamente. Para el convertidor serie *mse* y *Beta* realizan la misma función.

Las señales de disparo que llegan a cada compuerta de los GTO son procesadas por un controlador de disparos, el cual define en qué instante se encienden y apagan los dispositivos, de acuerdo con las señales de referencia dadas por la señal diente de sierra y la señal senoidal de potencia.

En las Fig. 7 y 8, se muestra más detalladamente el control de disparo de los GTO para ambos convertidores.

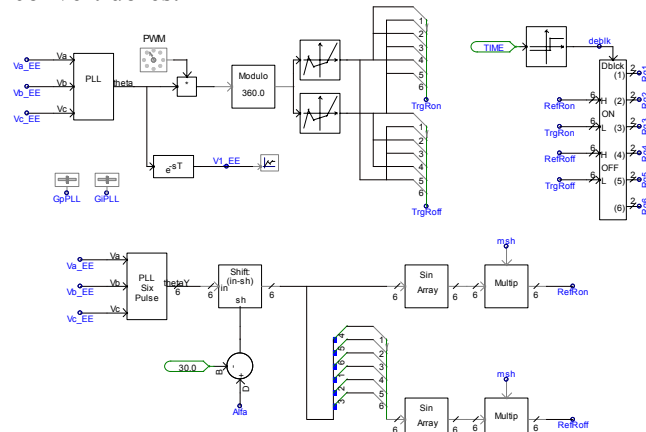


Fig. 7. Control de disparo de los GTO convertidor shunt.

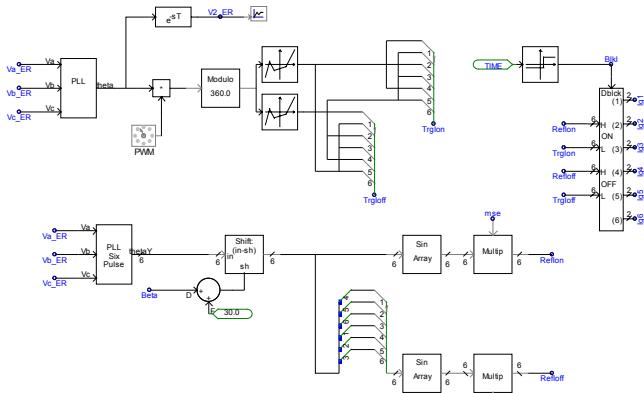


Fig. 8. Control de disparo de los GTO convertidor serie.

**Sistema de Control del Convertidor Shunt.** El convertidor shunt tiene básicamente dos funciones: controlar la magnitud de la tensión en el extremo emisor -para generar o absorber potencia reactiva-, y suministrar o recibir potencia real en los terminales de cd según lo exigido por el convertidor serie. Lo último puede ser realizado controlando directamente la tensión de cd ( $V_{dc}$ ). Cualquier exceso o déficit de la potencia real en los terminales de cd aumenta o disminuye la tensión de cd en los terminales. El sistema de control del convertidor shunt está ilustrado en la Fig. 9 y es básicamente lo mismo que propone un controlador STATCOM.

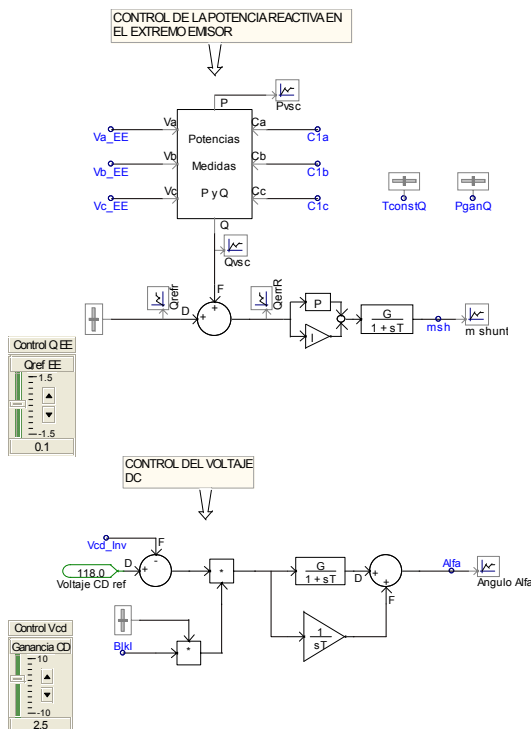


Fig. 9. Sistema de control del convertidor shunt.

Las tensiones de ca y cd del convertidor shunt son controladas usando dos controladores PI. El primero controla directamente la potencia reactiva en el extremo emisor a través de la modulación de la señal  $msh$ , para ajustar la magnitud de tensión en el extremo emisor, el valor de referencia establecido para la potencia reactiva es de 0,1 p.u. El segundo controlador PI controla directamente el ángulo de fase  $Alfa$  el cual regula la tensión de cd en el capacitor, la cual está ajustada en 118 kV. La señal de modulación es limitada según  $0 \leq msh \leq 1$  para reducir el contenido de armónicos en la salida del convertidor. El ángulo de fase varía entre  $-90^\circ \leq Alfa \leq 90^\circ$ , correspondiente a la máxima potencia activa que puede ser transferida por el convertidor.

**Sistema de Control del Convertidor Serie.** El convertidor serie controla el flujo de potencia entre los dos convertidores y la tensión inyectada en el extremo receptor. El control del flujo de potencia se realiza en función de la diferencia de los ángulos de fase entre las tensiones del extremo emisor y receptor utilizando un controlador PI que controla directamente el ángulo de fase  $Beta$ , que regula el flujo de potencia entre los dos convertidores. La magnitud de la tensión inyectada por el convertidor serie en el extremo receptor es controlada por medio de otro controlador PI el cual compara la tensión de referencia correspondiente a la del sistema (1 p.u.), con la tensión de ca medida en el extremo receptor. Los límites para la modulación de la señal  $mse$  y el ángulo de cambio de fase  $Beta$  son iguales a los establecidos para el convertidor shunt. El sistema de control del convertidor serie está ilustrado en la Fig. 10.

## 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

La simulación arrojó los gráficos que se explicarán en esta sección. Los gráficos muestran claramente el funcionamiento del sistema sin control y con control, ante una falla trifásica aplicada al sistema en el extremo receptor (ver Fig. 6).

### 5.1. Sistema sin Control

La falla ocurre a los 2.1 segundos y el tiempo de duración es de 0.05 segundos.

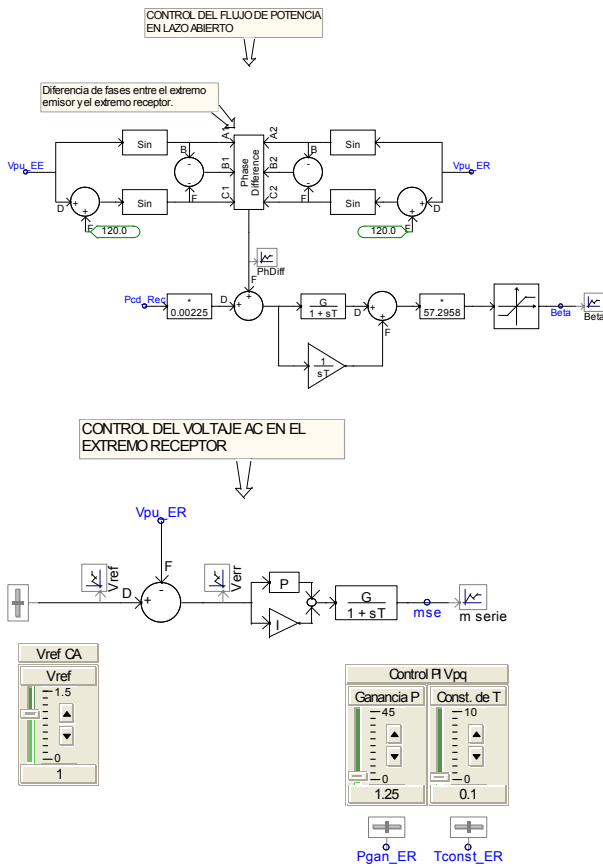


Fig. 10. Sistema de control del convertidor serie.

La Fig. 11 muestra la caída de tensión que se presenta en ambos extremos del sistema al momento de producirse la falla (sistema sin control). La caída de tensión producida en el extremo emisor es aproximadamente del 5% y en el extremo receptor del 10%, esto con respecto a la tensión de referencia RMS medida del sistema (1 p.u.). Adicionalmente, se puede apreciar la variación de potencia activa y reactiva que se presenta en ambos extremos del sistema, siendo más representativa la del extremo emisor, lo cual indica que el flujo de potencia tiende a interrumpirse en el momento que ocurre la falla.

### 5.2. Sistema con control

En este caso el UPFC actúa ante la falla trifásica aplicada al sistema en el extremo receptor.

La Fig. 12 muestra claramente cómo actúa el UPFC al momento de producirse la falla. El convertidor serie inyecta tensión serie al sistema para compensar la caída de tensión presentada en ambos extremos del sistema.

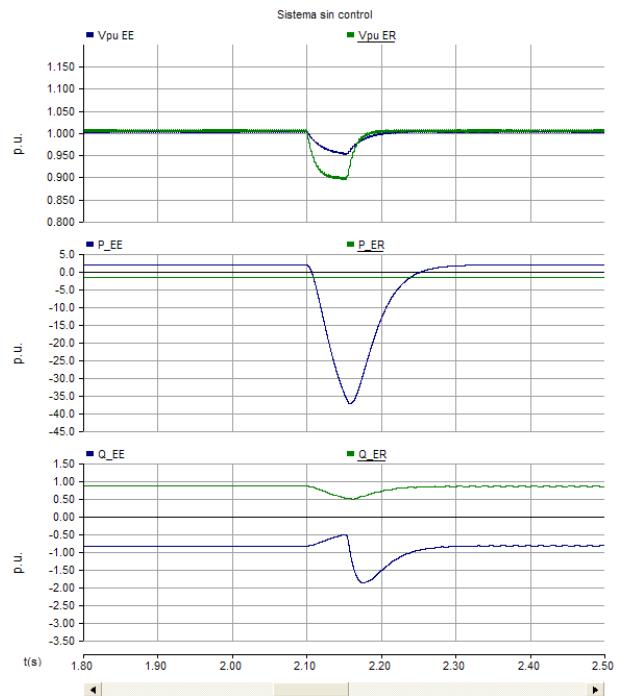


Fig. 11. Sistema de control del convertidor serie.

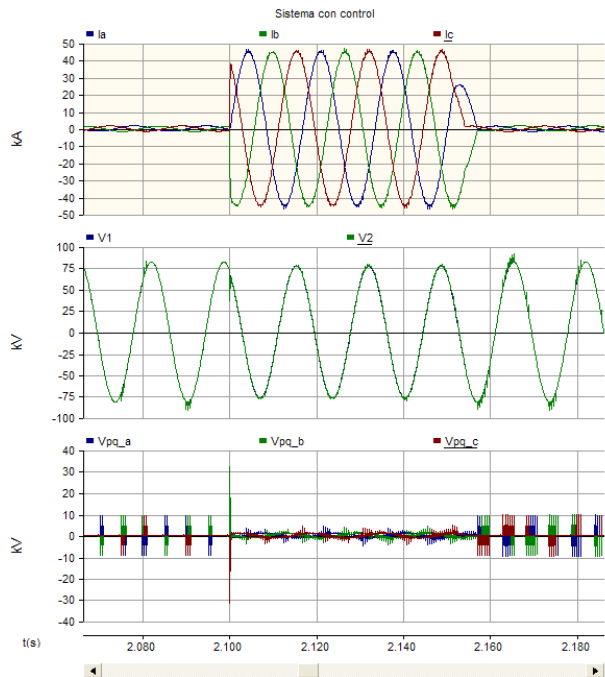


Fig. 12. Sistema de control del convertidor serie.

La Fig. 13 muestra cómo la caída de tensión producida en el extremo receptor es corregida en un 5% por la acción de control del UPFC. Debido a esto, el flujo de potencia activa y reactiva suministrada por ambos generadores al sistema aumenta como respuesta, con el fin de compensar la tensión requerida para corregir la falla.

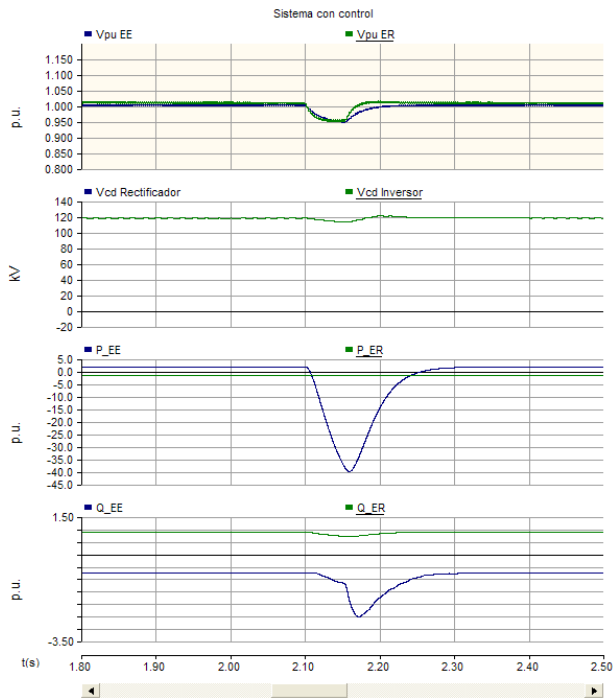


Fig. 13. Sistema de control del convertidor serie.

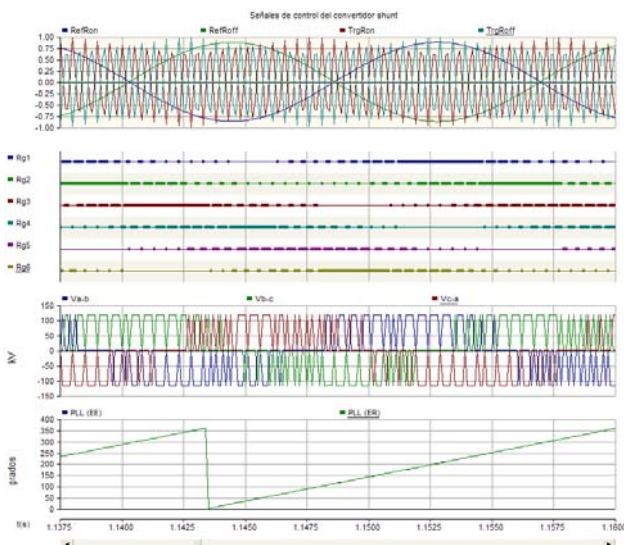


Fig. 14. Señales de control del convertidor shunt.

La Fig. 14 muestra un esquema completo de todas las señales de control del convertidor shunt, donde se incluyen las señales del PWM, los pulsos de disparo de los GTO, la tensión de rectificación de cd y las señales de referencia generadas por los PLL's.

## 6. CONCLUSIONES

El UPFC es capaz de controlar simultánea o selectivamente, todos los parámetros que tienen que

ver con el flujo de potencia en las líneas de transmisión (tensión, impedancia y ángulo de fase) y alternativamente tiene la habilidad de controlar independientemente el flujo de potencia real y reactiva en un punto específico de la línea.

Simplemente con el control de la magnitud y la posición angular de tensión inyectada en serie, el UPFC puede mantener o variar el flujo de potencia real y reactiva en la línea dentro de un amplio rango de control, con el fin de satisfacer condiciones de carga y operación del sistema.

La estructura circuital del UPFC ofrece la posibilidad de operar los convertidores serie y shunt independientemente, desconectando cada convertidor del terminal común de cd y separándolos del banco de capacitores. En este caso, el convertidor shunt opera solo como un STATCOM, y el convertidor serie opera solo como un SSSC. Esta alternativa aumenta la confiabilidad en un sistema y proporciona mayor flexibilidad.

La técnica del PWM proporciona señales de tensión a la salida de los convertidores con bajo contenido de armónicos. La ventaja de esta técnica es que permite el control independiente de la potencia real y reactiva de una manera fácil, siempre que la tensión de cd se mantenga constante y lo suficientemente alta.

El modelo desarrollado representa una base fundamental para el estudio del dispositivo UPFC. Estudios futuros sobre este dispositivo, tales como efectuar mejoras al sistema de control y realizar una modelación más detallada implementando el equipo en un sistema de potencia real, podrán ser continuados a partir del presente modelo y análisis.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el soporte brindado por la empresa Siemens PTD, por el suministro de las licencias del software PSCAD/EMTDC.

## REFERENCIAS

Alomoush, M.I. (2003). Derivation of UPFC DC load flow model with examples of its use in restructured power systems. *IEEE Transactions on power systems*. Pages 1173-1180



Das, G.T.; Kalyani, S.T. (2007). Control and Performance of UPFC connected to a transmission line. *Power Engineering conference 2007, IPEC 2007*. Pages 302-307.

Ghahnavieh, R., F. Firuzabad, R.M. Feuillet (2008). Evaluation of UPFC impacts on power system reliability. *Transmission and distribution conference and exposition, 2008, T&D IEEE/PES*. Pages 1-8.

Gyugyi, L., N. Hingorani (2000). *Understanding FACTS: Concepts and technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press. Nueva York.

Kundur, P. (1994). *Power System Control and Stability*. McGraw-Hill. Nueva York.

Manitoba HVDC Research Centre (2009), *PSCAD/EMTDC Users Guide*.

Uznovic, E., C. Cañizares, J. Reeve (1998). *Fundamental Frequency Model of Unified Power Flow Controller*. Cleveland, Ohio.

Wang, H.F. (1999). Applications of modeling UPFC into multi-machine power systems. *IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution*. Pages 306-312.

Zhou. X.Y., Wang, H.F., Aggarwal R.K. (2004). Detailed modeling and simulation of UPFC using EMTP. *Universities power engineering conference 2004 UPEC 2004*. Pages 256-260.

## SOBRE LOS AUTORES

### **Germán González**

Ingeniero Electricista. Hizo parte del Grupo de investigación TyD.

### **Gabriel López**

Ingeniero Electricista y MSc. Es profesor e investigador del Grupo de investigación TyD.

### **Jorge W. González**

Ingeniero Electricista, MSc. y PhD. Es profesor e investigador del Grupo de investigación TyD.

### **Idi Isaac**

Ingeniero Electricista y MSc. Es profesor e investigador del Grupo de investigación TyD.

### **Hugo Cardona**

Ingeniero Electricista y MSc. Es profesor e investigador del Grupo de investigación TyD.