

## Control de Potencia de Enlaces Asíncronos entre Sistemas Eléctricos Mediante el uso del Transformador de Frecuencia Variable

Investigación

Luis A. Contreras Aguilar<sup>1</sup>, Guillermo Tapia Tinoco<sup>1</sup> y Enrique A. Zamora Cárdenas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Coordinación de Ingeniería Electromecánica, Carretera Irapuato-Silao Km. 12.5, C.P. 36821 Irapuato, Guanajuato, México. Tel.+52 (462) 60 67 900.

<sup>2</sup>Universidad de Guanajuato, Ingeniería eléctrica, Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8 Km Comunidad de Palo Blanco, C.P. 36885 Salamanca, Gto. Tel. +52 (464) 64 7 99 40

### Resumen

Este artículo propone un modelo del Transformador de Frecuencia Variable (por sus siglas en inglés, VFT) para el estudio de enlaces asíncronos entre sistemas eléctricos de potencia. El modelo propuesto puede ser utilizado para realizar estudios de estabilidad transitoria entre sistemas eléctricos de potencia. Adicionalmente, se muestra un ejemplo sencillo de la implementación práctica y el análisis ante diferentes condiciones de operación de un VFT de 100 MW de transferencia de potencia nominal.

**Palabras clave:** Transformador de Frecuencia Variable, Enlaces Asíncronos y Control de Potencia.

### Abstract

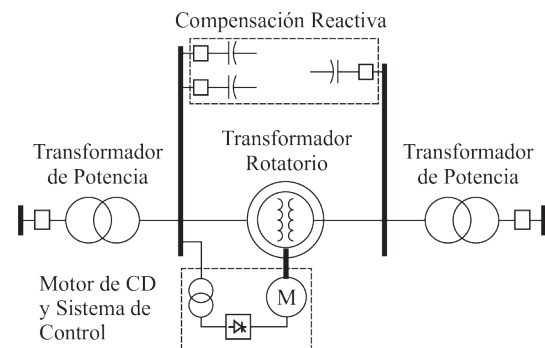
This paper proposes a model of the Variable Frequency Transformer (VFT) to study the asynchronous links between electric power systems. The model can be used to perform a transient stability analysis in such systems. Furthermore, it shows an example of the implementation and analysis under different operating conditions of a VFT unit with 100 MW nominal power transfer.

**Key words:** Variable Frequency Transformer, Asynchronous Links and Power Flow Control.

### Introducción

La necesidad de control de flujo de potencia, así como la expansión continua de los sistemas eléctricos, demanda que las nuevas tecnologías permitan utilizar los recursos existentes en la actualidad. Basado en ello, en la década pasada surgió un dispositivo denominado Transformador de Frecuencia Variable (por sus siglas en inglés, VFT), el cual permite interconectar dos sistemas eléctricos, los cuales pueden o no estar a niveles de tensión y de frecuencia diferentes. Este dispositivo que actualmente está siendo incorporado en los sistemas eléctricos, permite el control de flujo de potencia en ambas direcciones entre los sistemas enlazados. La tecnología del VFT consta de un transformador rotatorio, el cual es similar a una máquina de inducción de rotor devanado. Teniendo en cuenta el estator y rotor como

las partes principales del VFT, un sistema eléctrico es conectado al devanado trifásico del estator mediante un transformador convencional, el cual regula la tensión entre el sistema eléctrico y el VFT, de igual manera otro sistema eléctrico es conectado al devanado trifásico del rotor mediante un sistema colector y un transformador convencional. Además, el VFT cuenta con un sistema de control el cual regula el flujo de potencia a través del dispositivo. La función principal del sistema de control es proporcionar un torque mecánico sobre el eje del rotor, esto para controlar la dirección y magnitud de flujo de potencia a través del VFT. El control de flujo de potencia se logra mediante la acción de control en lazo cerrado de un motor de Corriente Directa (CD) que es acoplado directamente sobre el eje del rotor del VFT. Así mismo, el control ajusta la velocidad y el desfase del rotor con respecto al estator, el cual mantiene la transferencia de potencia igual al punto de referencia proporcionado por el operador. Si los sistemas que se enlazan se encuentran a diferente nivel de frecuencia, el rotor girará continuamente a la velocidad proporcional a esa diferencia de frecuencia entre los sistemas enlazados. Además, el VFT requiere de compensación reactiva, esto para suplir el consumo propio y dar soporte a la red de transmisión adyacente. Bancos de capacitores o cualquier compensador de VARs pueden ser utilizados con tal propósito. La Figura 1 muestra los principales componentes en una subestación de un VFT.



**Figura 1.-** Principales componentes del transformador de frecuencia variable.

### Fundamentos teóricos

En la literatura abierta, los primeros diseños para el control de flujo de potencia en enlaces asíncronos entre sistemas eléctricos mediante el uso de máquinas rotatorias se presenta en [1]. Con los avances tecnológicos en este campo de aplicación, se logró una primera aplicación real de un enlace asíncrono de este tipo, el cual es presentado en [2]. Este enlace interconecta el sistema eléctrico de New York, EUA y la Hydro-Québec, Canadá mediante el uso de un VFT. Las características de operación y control del VFT se describen en [3]. El comportamiento del VFT ante diferentes disturbios en eventos reales, tales como: fallas de fase a tierra, fallas trifásicas, aislamiento entre los sistemas y la contribución del VFT sobre la estabilidad de las redes eléctricas enlazadas, se muestran en [4]. La segunda aplicación real del VFT, se realizó entre los sistemas eléctricos de la compañía Electric Reliability Council of Texas, ERCOT y la Comisión Federal de Electricidad, CFE, México[5]. La última aplicación real de este tipo de enlaces fue utilizando múltiples unidades de VFT, en donde se enlazan los sistemas eléctricos de Pennsylvania Jersey Maryland (PJM) y New York Independent System Operator (NYISO) [6]. En más recientes aportaciones sobre el VFT [7], [8] y [9], se han enfocado al modelado del dispositivo en distintos softwares y con diferentes aplicaciones en el análisis.

Aunque hasta hoy en día los antecedentes relacionados con el VFT son suficientes para comprender el funcionamiento de este dispositivo, es necesario describir nuevos modelos matemáticos que permitan realizar estudios específicos y analizar el desempeño del VFT ante diferentes condiciones de operación. De tal forma, que este trabajo se enfoca en el desarrollo de un modelo matemático del VFT para estudios de estabilidad transitoria. Los componentes principales de este modelo son: la máquina de inducción de rotor devanado (WRIM) o transformador rotatorio, transformadores de potencia, bancos de capacitores y el motor de CD con su sistema de control.

**Modelo matemático del WRIM.** El modelo del WRIM es un modelo de sexto orden característico para estudios transitorios, y el cual es adaptado para funcionar como transformador rotatorio. Después de tratar al sistema de ecuaciones del WRIM en el marco de referencia síncrono  $dq$ , se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias en variables de estado que representa la dinámica del componente principal del VFT [10],

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (1)$$

donde,

$$\mathbf{x} = [i_{q,s} \quad i_{d,s} \quad i_{q,r} \quad i_{d,r} \quad \omega_m \quad \theta_m]^T,$$

$$\mathbf{u} = [v_{q,s} \quad v_{d,s} \quad v_{q,r} \quad v_{d,r} \quad T_m \quad (\omega_s - \omega_r)]^T,$$

$$\mathbf{A} = -\frac{\omega_b}{D} \begin{bmatrix} r_s X_r & X_s X_r - x_M^2 S & -r_s x_M & (1-S) X_r x_M & 0 & 0 \\ x_M^2 S - X_s X_r & r_s X_r & (S-1) X_r x_M & -r_s x_M & 0 & 0 \\ -r_s x_M & (S-1) X_s x_M & r_s X_s & S X_s X_r - x_M^2 & 0 & 0 \\ (1-S) X_s x_M & -r_s x_M & x_M^2 - S X_s X_r & r_s X_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D x_M i_{d,s}}{2H\omega_b} & \frac{D x_M i_{q,s}}{2H\omega_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{D}{\omega_b} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \frac{\omega_b}{D} \begin{bmatrix} X_r & 0 & -x_M \cos(-\theta_m) & x_M \sin(-\theta_m) & 0 & 0 \\ 0 & X_r & -x_M \sin(-\theta_m) & -x_M \cos(-\theta_m) & 0 & 0 \\ -x_M & 0 & X_s \cos(-\theta_m) & -X_s \sin(-\theta_m) & 0 & 0 \\ 0 & -x_M & X_s \sin(-\theta_m) & X_s \cos(-\theta_m) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D}{2H\omega_b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D}{\omega_b} \end{bmatrix}$$

además,  $\omega_s$  es la velocidad angular base del estator,  $\omega_r$  es la velocidad angular base del rotor,  $S = (1 - \omega_m / \omega_b)$  e indica el deslizamiento entre el rotor y estator,  $X_s = x_s + x_M$ ,  $X_r = x_r + x_M$  y  $D = X_s X_r - x_M^2$ . Es importante notar que las variables de estado de este modelo son las corrientes tanto en el rotor como en el estator, así como el desplazamiento y velocidad del rotor.

**Modelo del sistema de control.** El sistema de control consiste de un regulador de potencia que actúa en conjunto con un regulador de velocidad para ajustar el torque mecánico del motor de CD. La Figura 2 muestra el sistema de control implementado para actuar en conjunto con el WRIM, el cual provee regulación de potencia mediante el ajuste de la velocidad del rotor.

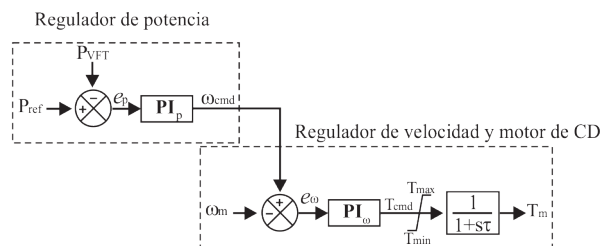


Figura 2.- Sistema de control.

Como se puede observar en el regulador de potencia del VFT (ver Figura 2), el error relativo ( $e_p$ ) del flujo de potencia del VFT ( $P_{VFT}$ ) con respecto al valor objetivo especificado ( $P_{ref}$ ) alimenta al primer bloque controlador  $PI_p$ . Entonces, la salida del controlador  $PI_p$  definida como el comando de velocidad ( $\omega_{cmd}$ ), se utiliza para obtener la señal de error de velocidad ( $e_\omega$ ) relativo a la velocidad angular ( $\omega_m$ ) del VFT, la cual alimenta al segundo bloque

controlador  $PI_{\omega}$  y proporciona un comando de torque ( $T_{cmd}$ ) al motor de CD. Un limitador de torque asegura que el comando de torque se encuentre dentro del margen de capacidad física el motor de CD, tal y como se muestra en la Figura 2. En este trabajo, los límites establecidos para el comando de torque son de entre  $\pm 1.5$  por unidad (pu). Además, el comando de torque alimenta a un sistema de primer orden que representa la respuesta dinámica del motor de CD, el cual es utilizado para ajustar la posición del rotor [11]. Los reguladores de potencia, velocidad y el motor de CD pueden ser descritos mediante el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales en variables de estado,

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_{\omega} \\ \dot{y}_T \\ \dot{T}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ K_{i\omega} & 0 & 0 \\ K_{p\omega}\tau^{-1} & \tau^{-1} & -\tau^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{\omega} \\ y_T \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ip} & -K_{ip} & 0 \\ K_{i\omega}K_{pp} & -K_{i\omega}K_{pp} & -K_{i\omega} \\ K_{p\omega}K_{pp}\tau^{-1} & -K_{p\omega}K_{pp}\tau^{-1} & -K_{p\omega}\tau^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ P_{VFT} \\ \omega_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

con,

$$P_{VFT} = i_{qd,sr}^T \cdot R \cdot i_{qd,sr} + \frac{1}{2} i_{qd,sr}^T \cdot G \cdot i_{qd,sr}^T \quad (3)$$

donde,

$$i_{qd,sr}^T = [i_{q,s} \quad i_{d,s} \quad i_{q,r} \quad i_{d,r}], \quad R = \text{diag}([r_s \quad r_s \quad r_r \quad r_r])$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & -X_r & 0 & -x_M \\ X_r & 0 & x_M & 0 \\ 0 & x_M S & 0 & X_r S \\ -x_M S & 0 & -X_r S & 0 \end{bmatrix},$$

$K_{pp}$  es la ganancia proporcional del regulador de potencia;  $K_{ip}$  es la ganancia integral del regulador de potencia;  $K_{p\omega}$  es la ganancia proporcional del regulador de velocidad;  $K_{i\omega}$  es la ganancia integral del regulador de velocidad; y  $\tau$  es la constante de tiempo del motor de CD.

**Componentes adicionales.** Los transitorios asociados a los demás componentes que conforman el VFT se pueden despreciar, esto debido a que sus tiempos de decaimiento tienen corta duración (transitorios electromagnéticos) con respecto a los transitorios electromecánicos producidos por el WRIM [12] y de los cuales se asocian a estudios de estabilidad transitoria. Por lo tanto, al aplicar la ley de corrientes de Kirchhoff en los nodos de los voltajes del WRIM, las corrientes a través de los transformadores de potencia que enlazan el WRIM con los sistemas eléctricos pueden ser calculadas por medio del siguiente conjunto de ecuaciones algebraicas,

$$\begin{bmatrix} i_{q,Ts} \\ i_{d,Ts} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_s C_s \\ -\omega_s C_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{q,s} \\ v_{d,s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{q,s} \\ i_{d,s} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_{q,Tr} \\ i_{d,Tr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_r C_r \\ -\omega_r C_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{q,r} \\ v_{d,r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{q,r} \\ i_{d,r} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Así, los nuevos valores del voltaje en el WRIM son calculados como,

$$\begin{bmatrix} v_{q,s} \\ v_{d,s} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_{Ts} & x_{Ts} \\ -x_{Ts} & r_{Ts} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{q,Ts} \\ i_{d,Ts} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{q,k} \\ v_{d,k} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} v_{q,r} \\ v_{d,r} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_{Tr} & x_{Tr} \\ -x_{Tr} & r_{Tr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{q,Tr} \\ i_{d,Tr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{q,m} \\ v_{d,m} \end{bmatrix} \quad (7)$$

## Materiales y métodos

El caso de estudio analizado consiste de dos sistemas asíncronos conectados a través de un enlace con la tecnología VFT. En este caso se considera una sola unidad de VFT de 100 MW, tal y como se ilustra en la Figura 1. El sistema eléctrico conectado al lado del rotor tiene una frecuencia base de 59.95 Hz y el sistema eléctrico conectado al lado del estator tiene una frecuencia base de 60 Hz. Ambas redes eléctricas son representadas como fuentes ideales bus infinito, las cuales mantienen una diferencia del ángulo de fase de 5 grados, así como un voltaje nodal de magnitud 1 pu en cada sistema. Todos los parámetros del sistema utilizados para desarrollar las simulaciones digitales que se muestran en este trabajo se presentan en la Tabla 1. En esta tabla se muestran los parámetros del VFT sobre una base de 100 MVA y fueron obtenidos de [2]. Además, los valores de las ganancias de los controladores se obtuvieron mediante la sintonización por medio del método de Ziegler-Nicholsy basándose en la respuesta al escalón [13].

VFT		Sistema de control		Parámetros adicionales	
$X_{VFT}$	12 %	$K_{pp}$	1.20	$r_s=r_r$	0.009
$X_{mag}$	5.6 pu	$K_{ip}$	0.065	$r_{Ts}=r_{Tr}$	0.023
$x_{Ts}$ y $x_{Tr}$	10 %	$K_{p\omega}$	0.120		
B	20 %	$K_{i\omega}$	1.40		
H	26 pu-s	$\tau$	0.010		

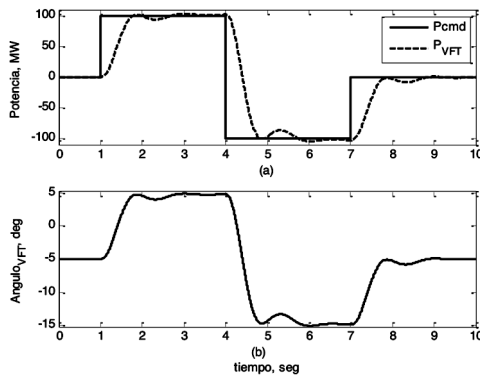
**Tabla 1.** Parámetros del VFT de 100 MVA.

El sistema de ecuaciones diferencial-algebraico conformado por el modelo matemático del VFT que se describió anteriormente se implementó en el software MATLAB<sup>®</sup>. Además, se utilizó el método de integración explícito Runge-Kutta de 4° orden para solucionar el sistema de ecuaciones y se usó un paso de integración de 260  $\mu$ s.

## Resultados y discusión

**Respuesta al escalón.** La regulación de potencia a través del VFT por medio de una respuesta al escalón es un método de control muy común, donde la transferencia de potencia crece a un valor establecido en un tiempo relativamente corto. Esta función es muy

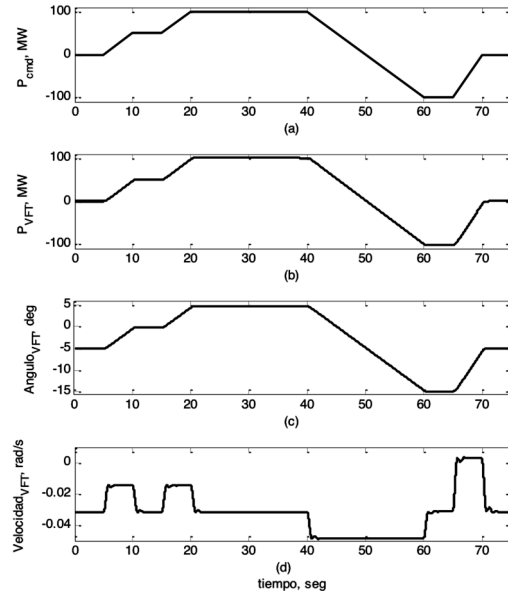
útil para probar el amortiguamiento de oscilaciones de potencia, intercambios de potencia de emergencia y otras aplicaciones donde se desea cambios rápidos en la transferencia de potencia. La Figura 3 (a) muestra la respuesta transitoria del VFT al escalón de potencia ( $P_{VFT}$ ), y en donde las condiciones iniciales para la respuesta al escalón de potencia son tomadas desde 0 MW, después el comando de potencia ( $P_{cmd}$ ) se incrementa instantáneamente de 0 MW hasta 100 MW en el segundo 1. Dada la convención que se tomó, se transfiere potencia del sistema conectado en el estator al sistema conectado al rotor, después en el segundo 3 se aplica un comando de potencia en escalón desde 100 MW a -100 MW y finalmente de -100 MW a 0 MW en el segundo 7. La respuesta transitoria de la transferencia de potencia del VFT disminuye en aproximadamente 2 segundos para este caso de estudio. Aunque la respuesta transitoria es adecuada, esto podría mejorarse mediante la optimización de parámetros y del propio sistema de control, lo cual serviría como base para desarrollar futuras investigaciones en el área de control para este dispositivo. La Figura 3 (b) muestra la posición del rotor del VFT (ángulo), donde se observa una respuesta muy similar a la transferencia de potencia entre los sistemas enlazados, de ahí la estrecha relación entre estas variables del dispositivo.



**Figura 3.** Respuesta al escalón del VFT para (a) potencia real y (b) posición del rotor.

**Rampa de regulación de potencia.** La regulación de potencia por medio de una rampa es otro método común de control en las instalaciones de VFT. El intercambio de potencia se incrementa o decrece respecto a un comando de referencia dado con una razón de cambio preestablecida. La Figura 4 muestra algunas variables del VFT durante el modo de control de potencia en rampa. Para este modo de operación, se toma el estado estable en 0 MW como condición inicial. Después, el comando de potencia se incrementa de 0 MW hasta 50 MW del segundo 5 al segundo 10, y se mantienen en 50 MW hasta el segundo 15. Después, se incrementa el comando de potencia hasta 100 MW

durante otros 5 segundos, para después caer a -100 MW del segundo 40 al segundo 60. Finalmente, se aplica un incremento en la transferencia de potencia de -100 MW hasta 0 MW desde el segundo 65 hasta el segundo 70.

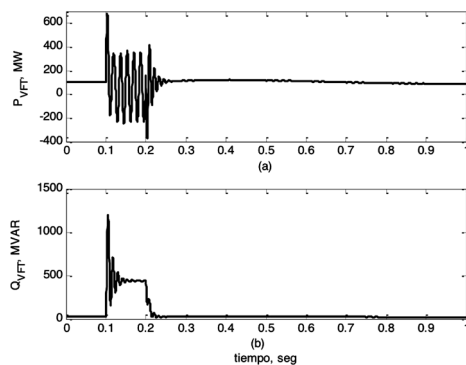


**Figura 4.** Rampa de regulación de potencia para (a) comando de potencia, (b) transferencia de potencia real, (c) posición del rotor y (d) velocidad del rotor.

Las Figuras 4 (a) y (b) muestran el comando de potencia y la transferencia de potencia en el VFT, respectivamente. No es visible, pero se tienen un tiempo de decaimiento en la transferencia de potencia con respecto al comando de potencia de aproximadamente 0.4 segundos en este modo de operación. Las Figuras 4 (c) y (d) muestran la posición y velocidad del rotor del VFT, respectivamente. La posición del rotor se mantiene en una trayectoria similar que la del comando de potencia, mientras que la velocidad del rotor se ajusta a la diferencia de las frecuencias entre el estator y el rotor (-0.0314 rad/s) durante la transferencia constante de potencia. Además, durante la rampa de regulación de potencia se observa un cambio de velocidad proporcional a la razón de cambio del comando de potencia.

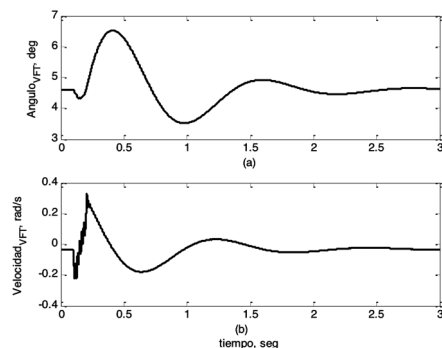
**Simulación de fallas.** Los estudios de estabilidad transitoria se realizan para investigar la respuesta dinámica de los sistemas de potencia ante grandes disturbios. Para este caso de estudio, se evalúa el comportamiento dinámico del VFT al aplicar una falla trifásica en el sistema conectado al rotor a los 0.1 segundos y la cual se libera a los 0.2 segundos. Antes de aplicar la falla, el estado estable de la transferencia de potencia en el VFT es de 100 MW, con dirección del sistema conectado en el estator hacia el sistema conectado en el rotor, y el consumo de

potencia reactiva en el dispositivo es de 22.2 MVAR. Las Figuras 5 (a) y (b) muestran el transitorio ocurrido al aplicar la falla en este enlace asíncrono. En esta figura se muestra un patrón oscilatorio durante la falla para el caso de la potencia activa y se logra visualizar que se alcanza un valor pico mayor a 600 MW de potencia activa. La potencia reactiva consumida por el VFT se incrementa durante la falla a un valor promedio de aproximadamente 500 MVAR. En condiciones reales, este modo de operación es indeseable debido a la gran transferencia de potencia no controlada durante la falla. Sin embargo, la recuperación transitoria muestra un amortiguamiento rápido y natural de potencia debido al sistema de control y la gran inercia del transformador rotatorio.



**Figura 5.** Comportamiento transitorio durante una falla para (a) potencia real y (b) potencia reactiva.

La Figura 6 muestra la posición y velocidad del rotor del enlace VFT, donde puede apreciarse una solución transitoria durante la falla y una convergencia lenta al estado estable después de la liberación de la falla.



**Figura 6.** Comportamiento transitorio durante una falla para (a) potencia real y (b) potencia reactiva.

Después de que desaparece el transitorio, la velocidad y posición del rotor regresan a sus soluciones de estado estable de pre-falla. Por lo tanto, la solución en estado estable después de la liberación de la falla tanto para la posición y velocidad del rotor son de  $4.6^\circ$

y  $-0.0314$  rad/s, respectivamente. Esto significa que la respuesta dinámica proporcionada por el modelo propuesto del VFT tiene un valor límite finito, y como consecuencia, puede indicar que es estable para la falla que se consideró en este caso de estudio.

## Conclusiones

En este trabajo se propuso e implementó un modelo matemático del transformador de frecuencia variable. Los esquemas de control basados en respuesta al escalón y rampa de regulación de potencia proveen una forma directa de control de potencia a través del VFT. La respuesta dinámica ante esta forma de control muestra que el modelo es efectivo para controlar la potencia, aunque es importante mencionar que para trabajos futuros la parte de control podría ser mejorada y por consecuencia la respuestas dinámicas del VFT. Con respecto a la respuesta transitoria muestra que durante la falla se tienen oscilaciones de hasta 600 MW en la transferencia de potencia, lo cual es indeseable en un enlace asíncrono, y esto demuestra en esencia que a través del VFT se pueden propagar las fallas. Por lo tanto, es muy importante la coordinación del sistema de protecciones que se incluya en los esquemas de las instalaciones de VFT. Además, se muestra que durante la falla el consumo de potencia reactiva se incrementa hasta cerca de 500 MVAR promedio. Finalmente, se muestra en las gráficas de las oscilaciones de velocidad y ángulo del rotor del VFT, que la gran inercia del VFT ayuda de manera natural al amortiguamiento de las oscilaciones, pero de una forma relativamente lenta. Con el fin de cuantificar de forma más general el desempeño del modelo, una propuesta es implementar el modelo en programas de estabilidad transitoria y/o aplicar técnicas modernas de estudios de sistemas de potencia sobre el modelo propuesto.

## Referencias

- [1] Hughes, W. L., (1999), "Feasibility of exchanging large blocks of power between unsynchronized grids by purely electromechanical means", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, (Edmonton, Alberta, Canada, 18-22 de Julio de 1999), p.1158-1162.
- [2] Nabb, D. Mc., Nadeau, D., Nantel, A., Pratico, E., Larsen, E., Sybille, G. y Paré, D., (2005), "Transient and Dynamic Modeling of the New Langlois VFT Asynchronous Tie and Validation with Commissioning Tests", *International Conference on Power Systems Transients*, (Montreal, Canada, 19-23 de Enero de 2005), p. 1-6.

- [3] Piwko, R. J. y Larsen, E. V., (2006), "Variable frequency transformer-FACTS Technology for Asynchronous Power Transfer", *IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, (Dallas, Texas, EUA, 21-24 de Mayo de 2006), p. 1426-1428.
- [4] Nadeau, D., (2007), "A 100-MW Variable Frequency Transformer (VFT) on the Hydro-Québec TransÉnergie Network-The Behavior during Disturbance", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, (Tampa, Florida, EUA, 24-28 de Junio de 2007), p. 1-5.
- [5] Hassink, P., Beauregard, V., O'Keefe, R., Larsen, E. V. y Bodo, R., (2007), "Secondary Future Applications of Stability Enhancement in ERCOT with Asynchronous Interconnections", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, (Tampa, Florida, EUA, 24-28 de Junio de 2007), p. 1-7.
- [6] Pratico, E. R., Wegner, C., Marken, P.E. y Marczewski, J.J., (2010), "First multi-channel VFT application - the Linden project", *IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference and Exposition*, (New Orleans, Louisiana, USA, 19-22 de Abril de 2010), p. 1-7.
- [7] ElDin, A.H., Abdullah, M.A. y Ibrahim, M., (2010) "A Novel Model to Study the VFT Performance When Controlling Power Transfer between Weak and Strong AC Grids Using MATLAB/SIMULINK", *IEEE International Energy Conference and Exhibition*, (Manama, 18-22 de Diciembre de 2010), p. 189-193.
- [8] Bakhsh, F. I., Irshad, M. y Islam, S., (2010), "New Model Variable Frequency Transformer (NMVFT)-A Technology for V/f Control of Induction Motors", *International Conference on Advances in Electrical and Electronic*, (Trivandrum, India, 21-22 de Diciembre de 2010), p. 30-35.
- [9] Abdel-Khalik, A., Elserougi, A., Massoud, A. y Ahmed, S., (2013), "Brushless Doubly-Fed Induction Machine as a Variable Frequency Transformer", *Journal of Energy and Power Engineering*, p. 110-117.
- [10] Krause, P. C., Wasynczuk, O. y Sudhoff, S. D. (1987), "Analysis of Electric Machinery", New York: McGraw Hill.
- [11] Vukosavic, S. N., (2007), "Digital Control of Electrical Drives", Springer Science, New York.
- [12] Kundur, K., (1994), "Power System Stability and Control", McGraw-Hill.
- [13] Astrom, K. y Hagglund, T., (1995), "PID Controllers: Theory, Design and Tuning", Sweden: Instrument Society of America.

**Recibido:** 3 de septiembre de 2013

**Aceptado:** 24 de enero de 2014