

## CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DEL STATCOM

Ricardo J. Dávalos M.

Juan M. Ramírez A.

CINVESTAV- I.P.N. - Unidad Guadalajara

Guadalajara, Jal., C.P. 45090. MEXICO. rdavalos[jramirez]@gdl.cinvestav.mx

**Resumen:** En este trabajo se presenta una descripción cualitativa del funcionamiento del STATCOM, y de sus elementos constitutivos. Se muestran las características operativas peculiares del dispositivo. Se analiza el cambio de la magnitud y fase de la fuente convertidora de voltaje, con la consecuente variación del flujo de potencia reactiva manejada por el dispositivo FACTS.

**Palabras Clave:** FACTS, STATCOM, Control de Voltaje

### I. Introducción

Por varios años, la compensación de potencia reactiva ha tenido la atención tanto en la parte académica como en la parte industrial. Especialmente, en los últimos años se ha prestado considerable importancia a las configuraciones de compensadores basados en inversores autoconmutados, llamados Compensadores de Potencia Reactiva Avanzados o STATCOM (Static Synchronous Compensator, por sus siglas en inglés).

Después de la aparición de los convertidores electrónicos de alta potencia basados en GTOs, es posible generar o absorber potencia reactiva sin el uso de bancos de capacitores o inductores. Esto condujo al desarrollo y la aplicación de la nueva generación de dispositivos FACTS. El Compensador Estático de Reactivos (SVC) se ha utilizado ampliamente para la regulación del voltaje en sistemas de potencia, mediante el control de la inyección de potencia reactiva.

La evolución del SVC es el STATCOM, que se basa en el principio de que un inversor de voltaje genera un voltaje de AC controlable atrás de la reactancia de dispersión del transformador, de modo que la diferencia de voltaje a través de la reactancia produce intercambio de potencia activa y reactiva entre el STATCOM y la red de transmisión.

El control primario del inversor es tal que se regula el flujo de corriente reactiva a través del STATCOM. Esto es, el controlador se utiliza para operar el inversor de tal manera que el ángulo de fase entre el voltaje del inversor y el voltaje de línea se ajusta dinámicamente, de modo que el STATCOM genera o absorbe potencia reactiva en el punto de conexión [1]. La Fig. 1 muestra un diagrama simplificado del STATCOM con una fuente inversora de voltaje,  $E_i$ , y una reactancia de enlace,  $X_{ie}$ , conectado a un sistema con un voltaje  $V_{th}$ , y una reactancia de Thevenin  $X_{th}$ . Cuando el voltaje del inversor es mayor que el voltaje del sistema, el STATCOM ve una reactancia inductiva conectada a sus terminales. Por lo tanto, el sistema ve al STATCOM como una reactancia capacitiva y el STATCOM se considera operando en un modo capacitivo. Similarmente, cuando el voltaje del sistema es mayor que el del inversor, el sistema ve una reactancia inductiva conectada a sus terminales. Por lo tanto, el STATCOM ve al sistema como una reactancia capacitiva y el STATCOM se considera operando en un modo inductivo.

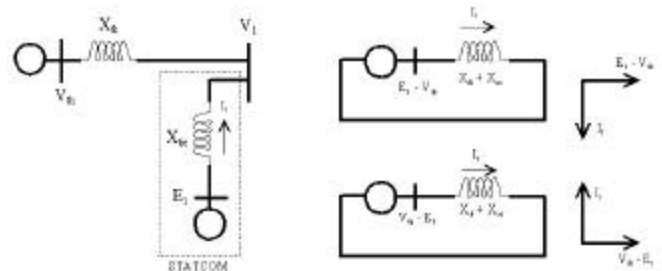


Fig. 1 STATCOM operando en los modos capacitivo e inductivo

La Fig. 2 muestra un circuito inversor monofásico, referido como un polo, que consiste de una válvula positiva  $A+$ , y una válvula negativa,  $A-$ . Cuando un polo se conecta a través de una serie de capacitores que se cargan con un voltaje total  $V_{DC}$ , y las válvulas se abren y cierran alternadamente, el voltaje de salida,  $V_{ao}$ , en el punto medio del polo  $A$  con respecto al punto medio,  $O$ , del enlace capacitivo es una onda cuadrada que contiene una componente fundamental y todas las componentes armónicas impares. La amplitud de la componente fundamental es  $(2/\pi) V_{DC}$  y la amplitud de la componente armónica impar ( $n$ ) normalizada respecto a la fundamental es  $(1/n)$  donde  $n = 2k + 1$  para  $k = 1, 2, 3, \text{etc.}$ , [1].

Artículo recomendado y aprobado por el Comité Nacional de CIGRÉ-México para presentarse en el Segundo Congreso Bienal, del 13 al 15 de junio del 2001, en Irapuato, Gto.

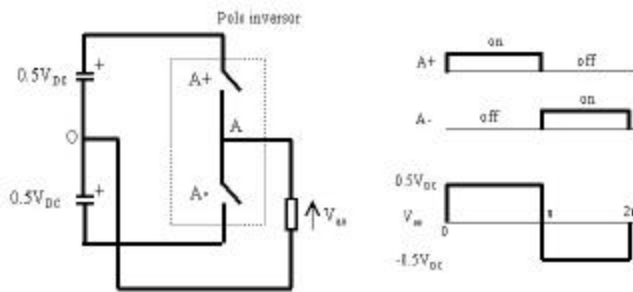


Fig. 2 Un polo inversor y su voltaje de salida

El STATCOM es pues uno de los dispositivos FACTS que pueden usarse como compensador dinámico en sistemas de potencia, para proporcionar soporte de voltaje y mejorar la estabilidad [2,3]. Así que el STATCOM es un controlador multifuncional, lo que es una característica importante de la nueva generación de controladores FACTS.

## II. Características del STATCOM

El modelo en espacio de estado en el marco de referencia R-I (el marco de referenciasíncrono rotatorio) para el circuito del STATCOM de la Fig. 3 puede escribirse como sigue. Se adopta un sistema por unidad igual que para el resto del sistema.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sR} \\ I_{sI} \\ V_{DC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{sR} \\ E_{sI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_0 & \frac{k \cos(\theta_s)}{L_s} \\ -\omega_0 & -\frac{R_s}{L_s} & \frac{k \sin(\theta_s)}{L_s} \\ -\frac{1.5k \cos(\theta_s)}{C_s} & -\frac{1.5k \sin(\theta_s)}{C_s} & -\frac{1}{R_p C_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sR} \\ I_{sI} \\ V_{DC} \end{bmatrix}$$

Donde:  $\omega_0 = 377$  rad/s

$$k = \frac{2\sqrt{6}}{\pi}, \text{ para un inversor de 12 pulsos.}$$

$$E_t = \sqrt{E_{tr}^2 + E_{tl}^2}$$

$$\theta_t = \tan^{-1} \left( \frac{E_{tl}}{E_{tr}} \right)$$

$$\theta_s = \theta_t + \theta_d$$

$\theta_s$ : Ángulo entre  $E_s$  y  $E_t$

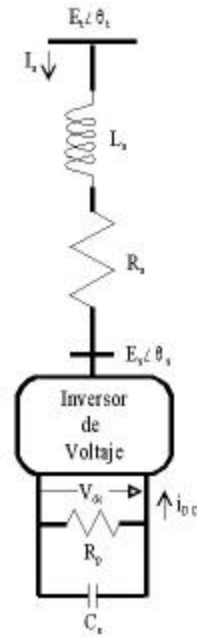


Fig. 3 Circuito del STATCOM

El STATCOM de la Fig. 3 consiste de un inversor de voltaje basado en GTO y un capacitor ( $C_s$ ) en el lado de DC. La resistencia ( $R_p$ ) en paralelo con  $C_s$  representa las pérdidas en el capacitor. El STATCOM está conectado al sistema a través de un transformador de acoplamiento representado por la inductancia de dispersión ( $L_s$ ) y la resistencia ( $R_s$ ) [4].

La característica V-I típica del STATCOM se muestra en la Fig. 4. Como puede verse, el STATCOM puede suministrar tanto compensación capacitiva como inductiva, y es capaz de controlar su corriente de salida en su capacidad máxima, independientemente del voltaje del sistema. Esto es, el STATCOM puede proporcionar plena potencia reactiva capacitiva a cualquier voltaje del sistema. La Fig. 4 ilustra también que el STATCOM tiene una capacidad transitoria adicional tanto en la región capacitiva como inductiva. La máxima sobrecorriente transitoria en la región capacitiva está determinada por la máxima capacidad de corriente de encendido-apagado de los inversores. En la región inductiva, los inversores son naturalmente conmutados y por lo tanto la capacidad de corriente transitoria está limitada por la máxima temperatura permisible en la unión de los conmutadores [5].

En la práctica, los semiconductores presentan pérdidas, y por lo tanto, la energía almacenada en el capacitor DC eventualmente se utilizaría para proporcionar las pérdidas internas del inversor, disminuyendo el voltaje del capacitor. Sin embargo, cuando el STATCOM se utiliza para generación de potencia reactiva, el inversor mismo puede mantener cargado el capacitor en el nivel requerido de voltaje. Esto se logra haciendo que el voltaje de salida del inversor atrase al voltaje del sistema en un pequeño ángulo (generalmente en el rango de  $0.1^\circ$  a  $0.2^\circ$ ). De ésta manera el inversor absorbe una pequeña cantidad de potencia real del sistema para proporcionar las pérdidas internas, y mantener el voltaje del capacitor en el nivel deseado. El mismo mecanismo puede utilizarse para incrementar o disminuir el voltaje del capacitor,

y con eso la amplitud del voltaje de salida del inversor, con el propósito de controlar la generación o absorción de reactivos.

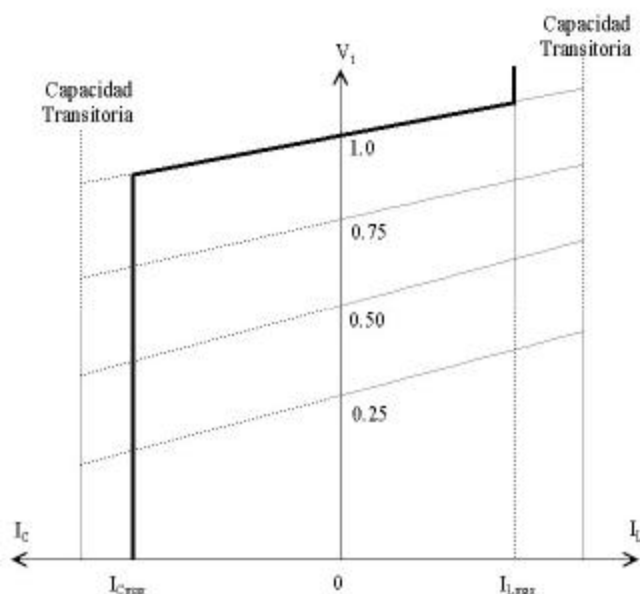


Fig. 4 Características V-I del STATCOM

### III. Funcionamiento del STATCOM

Un compensador estático síncrono (STATCOM) es un convertidor de estado sólido que se conecta en derivación, capaz de generar o absorber de forma controlada tanto potencia reactiva como potencia activa.

El STATCOM es análogo a una máquina síncrona ideal que genera un conjunto de voltajes balanceados a frecuencia fundamental, con amplitud y ángulo controlable. Ésta máquina ideal no tiene inercia y su respuesta es prácticamente instantánea. En la Fig. 5 se muestra la estructura básica de un STATCOM (a esta configuración se le denomina VSI de 6 pulsos).

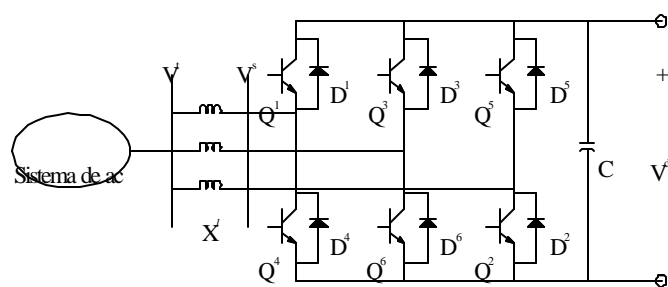


Fig. 5 Estructura básica de un STATCOM, denominado VSI de 6 pulsos

El intercambio de potencia reactiva entre el compensador y el sistema de AC se logra variando la amplitud del voltaje del compensador. Si la amplitud del voltaje de compensador es superior al voltaje del nodo de AC entonces la corriente fluirá del compensador al sistema de potencia. En éste caso

el compensador se comporta como un capacitor inyectando potencia reactiva al sistema de potencia. Si la amplitud del voltaje en nodo de AC es mayor al voltaje del compensador entonces la corriente fluirá del sistema de potencia al compensador, comportándose así como un inductor, esto es, consumiendo reactivos. Si los niveles de voltaje son iguales entre sí entonces no existe intercambio de potencia reactiva.

Similarmente el intercambio de potencia activa entre el compensador y el sistema de AC se logra controlando el ángulo del voltaje del compensador respecto al ángulo del voltaje en el nodo de AC. Si éste ángulo es igual entre ambos no hay intercambio de potencia activa, sólo reactiva. Esto se puede mostrar con el esquema de la Fig. 6. Considere dos máquinas (desprecie el transitorio electromecánico) en donde se instala un compensador ideal entre ellos dos. El compensador se representa por una fuente senoidal de frecuencia fundamental.

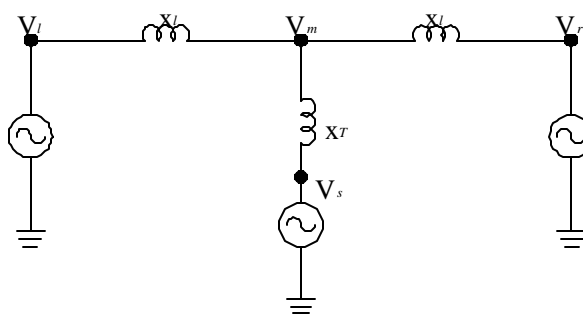


Fig. 6 Dos máquinas con un compensador ideal

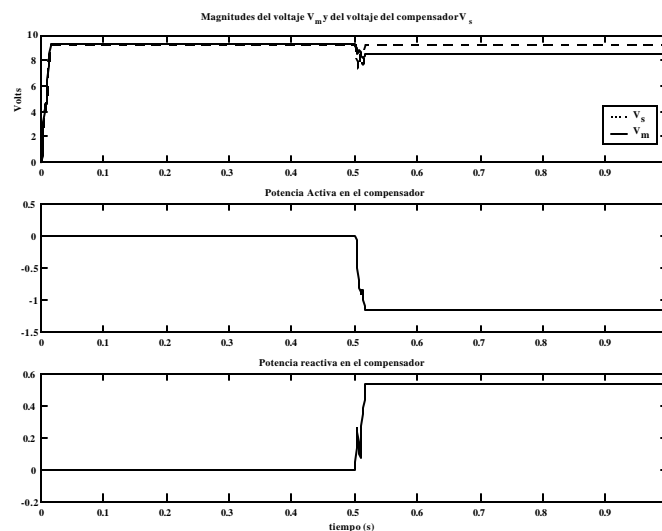


Fig. 7 Potencia activa y reactiva en el compensador al variar sólo el ángulo del voltaje del compensador y mantener constante la magnitud del mismo.

En la Fig. 7 se muestra cómo cuando el voltaje del compensador  $V_s$  y el voltaje del nodo  $V_m$  son iguales tanto en magnitud como en ángulo, el intercambio de potencia tanto reactiva como activa es cero. En  $t = 0.5$  s el voltaje del compensador experimenta un cambio de  $50^\circ$  con respecto al

ángulo del voltaje en el nodo, provocando así un intercambio de potencia tanto reactiva como activa. En éste ejemplo el compensador está consumiendo activos del sistema de AC y entregando reactivos al sistema.

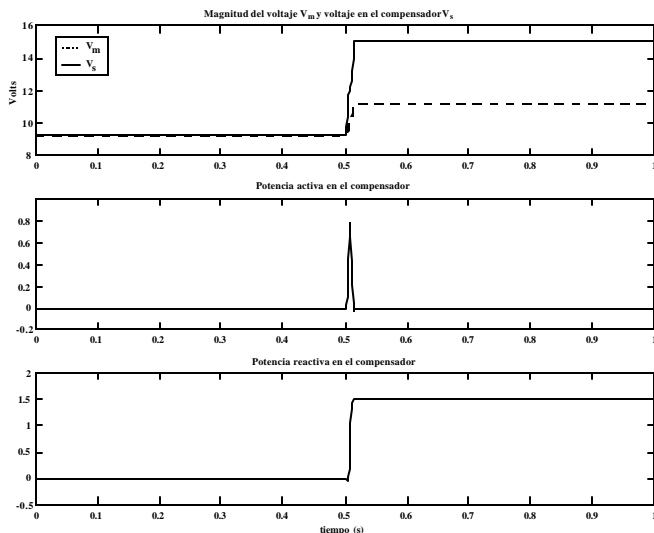


Fig. 8 Potencia activa y reactiva en el compensador al variar la magnitud del voltaje en el compensador y mantener constante el ángulo del mismo.

En la Fig. 8 se muestra el intercambio de potencia cuando el compensador inyecta un voltaje en cuadratura con la corriente del sistema de AC. En  $t = 0.5$  la magnitud del voltaje en el compensador cambia de 9.245 kv a 15 kv inyectando así potencia reactiva al sistema de AC, esto se ve reflejado en un incremento en el voltaje del nodo de AC. Los parámetros de simulación son  $X_f = X_r = 37.6991W$ ;  $V_f = 15$  kv. y  $V_r = 3.5355$  kv. Con estos resultados se muestra una de mayores aplicaciones del STATCOM que es el mantener y controlar el voltaje en un nodo.

#### IV. Fuentes convertidoras de voltaje (VSI)

Las fuentes convertidoras de voltaje (VSI por sus siglas en inglés) son la base de una nueva generación de dispositivos FACTS como son el STATCOM (compensador estático síncrono), SSSC (compensador serie síncrono), y una mezcla de los dos que es el UPFC (controlador de flujos de potencia). Este tipo de dispositivos utilizan dispositivos electrónicos donde el encendido y apagado es controlado. Entre ellos encontramos los tiristores de apagado de compuerta (GTO, Gate Turn-Off Thyristor), los transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT, Insulate gate bipolar transistor), los MTO (MOS turn-off thyristor) y los IGCT (Integred gate-commutated thyristor) por mencionar algunos. La principal función de las VSI es la de generar voltaje de corriente alterna a partir de una fuente de voltaje de corriente continua, debido a esto es común encontrarlas referenciadas como inversores. Con una VSI es posible controlar la magnitud, el ángulo de fase y la frecuencia del voltaje de salida. Estas también es común encontrarlas en aplicaciones industriales tales como en los variadores de velocidad para motores de AC.

Para entender el funcionamiento considérese el inversor monofásico del puente completo de la Fig. 9. Este consiste de 4 IGBT, una fuente de voltaje de corriente continua (en los convertidores reales éste es un capacitor), y dos puntos de conexión a, b al nodo del sistema de potencia. El voltaje de corriente continua es convertido a voltaje de AC cuando el transistor apropiado es encendido/apagado secuencialmente.

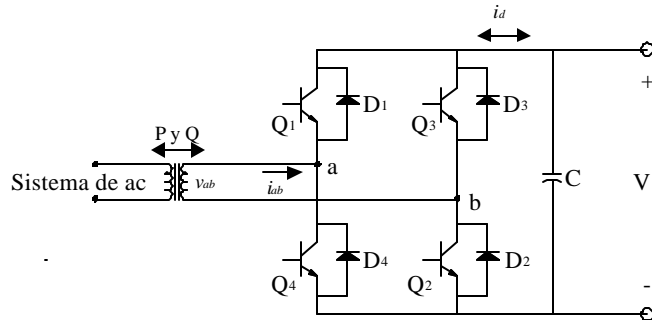


Fig. 9 VSI monofásico de puente completo

Con los IGBTs 1 y 2 encendidos, el voltaje  $v_{ab}$  es  $+V_d$  para medio ciclo, y con 3 y 4 encendidos, y 1 y 2 conmutados, el voltaje  $v_{ab}$  es  $-V_d$  para el siguiente medio ciclo. Este voltaje es independiente de la magnitud, ángulo y forma de onda del voltaje en el nodo de AC. La corriente de AC es el resultado de la interacción del voltaje generado por el convertidor, el voltaje en el nodo de AC y la impedancia entre ellos. Suponga que en el inversor de la Fig. 9 la corriente que fluye desde el lado de AC al convertidor,  $i_{ab}$  es una senoidal como se muestra en la Fig. 10b [7].

- Del tiempo  $t_1$  a  $t_2$ , con los IGBTs 1 y 2 encendidos y 3 y 4 conmutados,  $v_{ab}$  es positivo e  $i_{ab}$  es negativo. La corriente fluye a través del dispositivo 1 desde el lado de AC, punto a, y retorna por el punto b a través del dispositivo 2, esto es, el flujo es del lado de DC al lado de AC. Esta es una acción inversora.
- Del instante  $t_2$  a  $t_3$ , la corriente cambia de polaridad y fluye a través de los diodos 1 y 2 fluyendo la potencia del lado de AC al lado de DC. En esta etapa la VSI se comporta como un rectificador. Durante éste período los IGBTs 1 y 2 continúan encendidos, sólo que no conducen corriente en forma inversa, por lo ésta fluye a través de los diodos.
- Del instante  $t_3$  a  $t_4$ , con los IGBTs 3 y 4 encendidos y 1 y 2 conmutados,  $v_{ab}$  es negativo mientras que  $i_{ab}$  cambia de polaridad respecto al caso anterior. La corriente fluye a través del dispositivo 3 y 2, esto es, el flujo es del lado de DC al lado de AC.
- Del instante  $t_4$  a  $t_5$  sucede un caso similar al instante  $t_2$  a  $t_3$ , la corriente fluye a través de los diodos 3 y 4 (acción rectificadora).

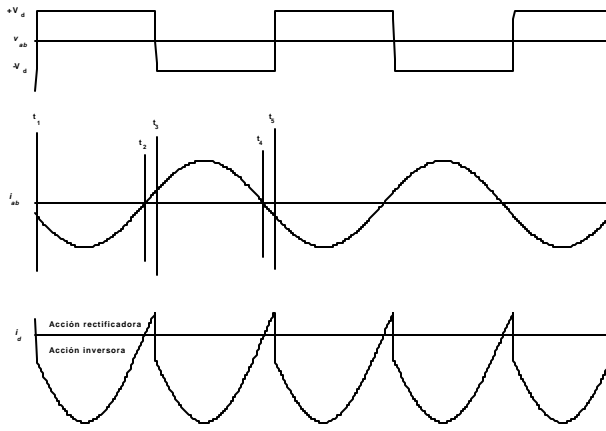


Fig. 10 Formas de onda para un VSI de puente completo monofásico

Con esto podemos observar que una VSI realiza tanto acción inversora debido a la conmutación de los transistores (tiristores sí es el caso), como acción rectificadora por parte de los diodos; esto es posible por el intercambio de corriente que existe entre el convertidor y el sistema de AC.

### V. Ejemplo de aplicación

Para el sistema de la Fig. 11 con  $V_a = 5$  Kv,  $X_l = 37.6991W$  y un transformador de acoplamiento con relación 1:1, el STATCOM está operando en la región inductiva y en  $t = 0.25$  s experimenta un cambio del tipo escalón a la región capacitiva.

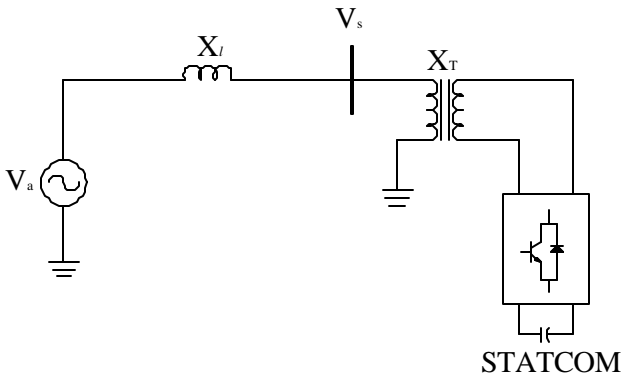


Fig. 11 Sistema de un nodo y STATCOM

El cambio de una región de operación a otra se efectúa por medio del cambio en la magnitud del voltaje de CD. En las siguientes figuras 12-15 se muestra la respuesta del compensador.

En estas figuras se observa la capacidad del STATCOM para transferir potencia reactiva del área inductiva al área capacitiva en unos cuantos milisegundos sin presentar transitorios considerables en el voltaje del nodo (ver figuras 13 y 15) al cual está conectado. Esta rapidez de respuesta es una de las principales ventajas de los dispositivos basados en VSI ya que no es posible ser alcanzada con otro tipo de dispositivos [6]. Por esta razón el STATCOM es capaz de proporcionar un mayor desempeño sobre los compensadores

en derivación tradicionales, tales como el compensador estático de reactivos (SVC, por sus siglas en inglés).

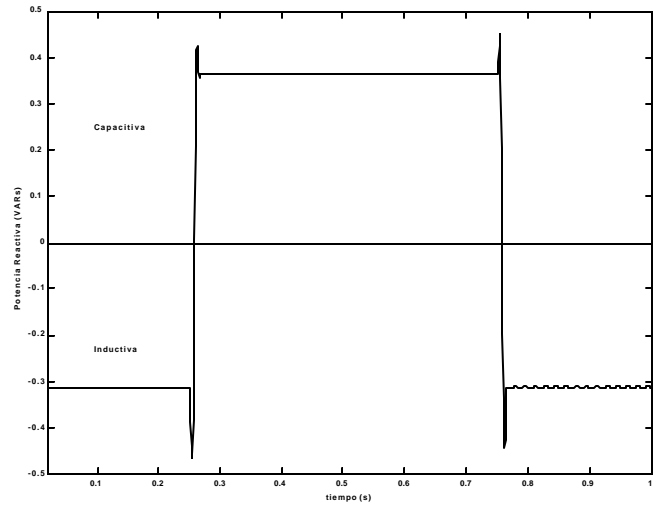


Fig. 12 Potencia reactiva

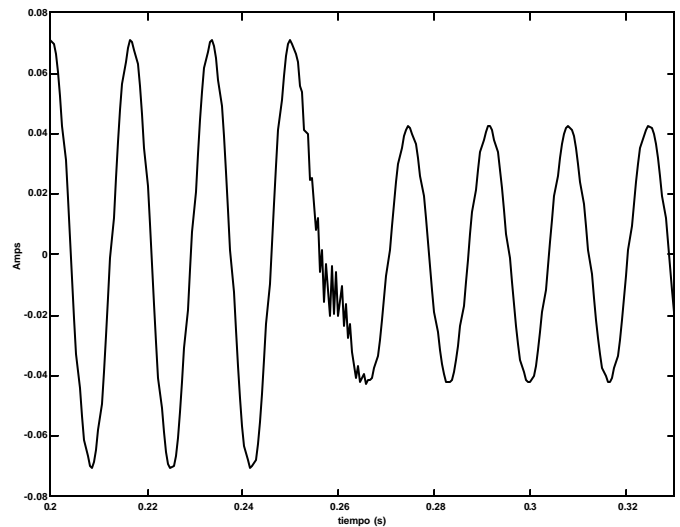


Fig. 13 Corriente instantánea del lado de AC

### VI. Conclusiones

La nueva generación de FACTS basada en esquemas del tipo VSI presentan características operativas que los hacen sumamente atractivos, dada su rapidez de respuesta y la posibilidad de aportar su capacidad nominal ante condiciones severas de funcionamiento. Esto hace que la tecnología de FACTS sea cada vez más aceptada en la industria eléctrica, visualizándose un futuro promisorio para tal tecnología.

## VII. Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACyT por el soporte prestado al proyecto 32047-A.

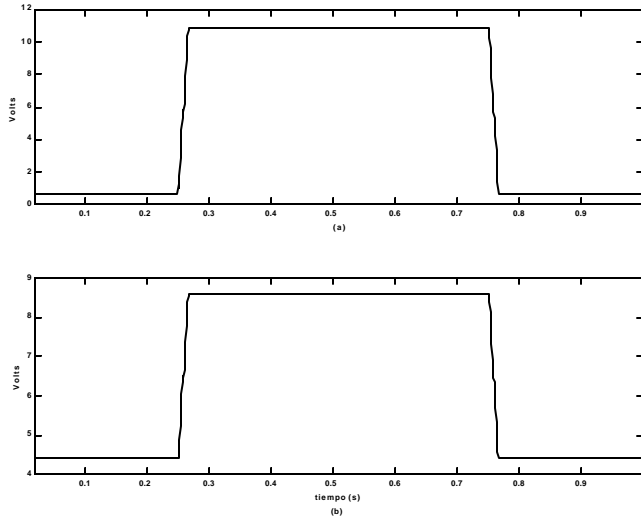


Fig. 14 Magnitud de voltaje en (a) Compensador; (b) Nodo de AC

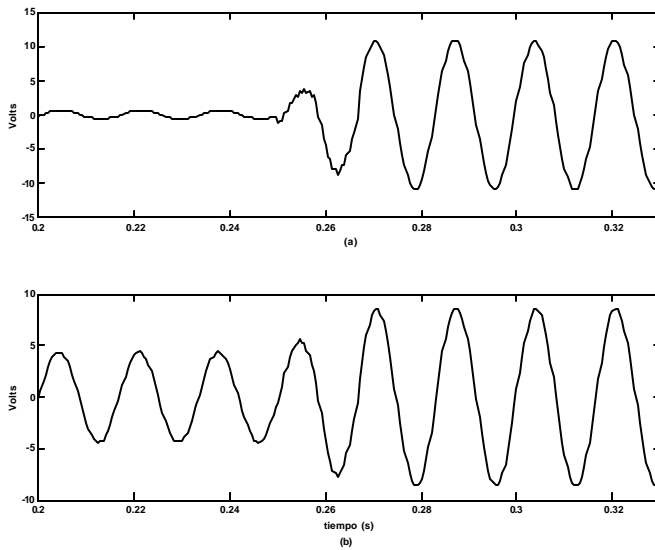


Fig. 15 Voltaje instantáneo (a) Compensador; (b) Nodo de AC

## VIII. Referencias

- [1] K. K. Sen, "STATCOM – STATic synchronous Compensator: theory, modeling, and applications." IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 1177-1183, 1998.
- [2] H. F. Wang, "Modelling STATCOM into power systems." Paper BPT99-025-44, IEEE Power Tech'99 Conference, Budapest, Hungary.
- [3] H. F. Wang, "Applications of dampin torque analysis to STATCOM control." Electrical Power and Energy Systems, Vol. 22, pp. 197-204, 2000.
- [4] C. D. Schauder and H. Mehta, "Vector analysis and control of advanced static var compensators." IEE Proc.-C, vol. 140, no. 4, pp. 299-306, 1993.
- [5] Y. H. Song and A. T. Johns, Flexible ac transmission systems (FACTS), The Institution of Electrical Engineers, 1999.
- [6] C. Schauder, M. Gernhardt, E. Stacey, T. Lemark, L. Gyugyi, T. W. Cease, A. Edris, "Operation of  $\pm 100$  MVAR TVA STATCON", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 12, no. 4, pp 1805-1811, October 1997.
- [7] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS Concepts and technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press 2000

## Biografías

**Ricardo Dávalos** es originario de la ciudad de México. Recibió el grado en Ingeniería Electrónica de la Universidad Autónoma de Guadalajara, y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Sistemas de Potencia en el CINVESTAV, Unidad Guadalajara, México. Actualmente se encuentra trabajando para obtener el grado de Doctor en Ciencias en el CINVESTAV, Unidad Guadalajara. Su principal interés es el diseño, control y modelado de dispositivos FACTS.

**Juan M. Ramírez** recibió el grado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato, México en 1984 y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica-Sistemas de Potencia de la UNAM en 1987. Recibió el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la UANL en 1992. Se unió al departamento de Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV en 1999, donde actualmente es profesor de tiempo completo. Su interés actual es en dispositivos FACTS y el control de sistemas de potencia.