



Implementación de modelos de control de los SVC en el programa PSX

Implementation of SVC models in programs PSX

Grettel - Quintana de Bastera

José A. - González Cueto

Zaid - Garcia Sánchez

Recibido: junio de 2013

Aprobado: febrero de 2014

Resumen/ Abstract

Los dispositivos de compensación estática de reactivo (SVC) han adquirido auge en las aplicaciones a los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). El SVC, también conocido como compensador estático de reactivo, es un equipamiento eléctrico usado para brindar una compensación de energía reactiva de rápida acción en redes de transmisión de electricidad de alto voltaje. Estos dispositivos brindan soluciones a problemas de estabilidad y control de la tensión de forma rápida y eficiente además son una alternativa para superar situaciones de transporte de energía eléctrica y calidad de suministro. Muchos de los software desarrollados a nivel mundial para el análisis de la operación de los SEP's incluyen en sus estudios la modelación de los compensadores estáticos para evaluar su comportamiento ante averías o para realizar estudios de diseño y ubicación. En este artículo se describen los modelos implementados en el Paquete de programas PSX, usado por el Despacho Nacional de Cargas (DNC).

Palabras clave: compensación de potencia reactiva, modelos de control, PSX, SVC.

The devices of static compensation of reactive (SVC) have acquired prosperity in the applications to Electric Power Systems (SEP). The SVC, also known as reactive power static compensator, is used for offering a compensation of reactive power of fast action in high-voltage transmission grids. These devices offer solutions to problems of stability and control of the tension of fast and efficient form, and they are an alternative to surpass transmission situations of electric power and supplying quality between another one. Many of them software developed worldwide for the analysis of the operation of the SEPs include in his studies the modelation of the static compensators to evaluate your behavior in front of contingences or to accomplish designing studies and position. In this work the models implemented in the programs PSX themselves, used for Loads National Center (DNC).

Key words: compensation of reactive potency, models of control, PSX, SVC.

INTRODUCCIÓN

El SVC es el primer dispositivo FACTS utilizado masivamente en los sistemas de transmisión alrededor del mundo desde la década de los 70.

El SVC es un dispositivo que usa electrónica de potencia para controlar el flujo de potencia, mejorando además la estabilidad transitoria en las redes eléctricas, además regula la tensión en el nodo donde se localice controlando la cantidad de potencia reactiva que puede entregar o absorber del sistema. Si la tensión es baja, el SVC genera potencia reactiva y si la tensión es alta absorbe dicho reactivo para mantener la tensión lo más estable posible. Esta variación de potencia reactiva se logra a través de condensadores e inductores que son conectados en el secundario de un transformador de acoplamiento. Cada banco entra o sale del sistema a través de interruptores, que son controlados a su vez por tiristores y controlando el ángulo de disparo de los mismos se entrega o se consume más o menos potencia reactiva Su principal aplicación ha sido la de proveer control de tensión, ya sea a través de la mantención de los perfiles de tensión dentro de las bandas permitidas, o bien, a través de la provisión de una reserva rápida en caso de contingencias y fenómenos transitorios [1-6]; su utilización repercute, de esta forma, en una mejora en la seguridad de todo el sistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

Configuraciones existentes de los SVC

Un Compensador Estático de Reactivo (CER) corresponde básicamente a un arreglo de reactores y capacitores dispuestos en configuración shunt, que actúan proporcionando potencia reactiva inductiva o capacitiva, de manera de mantener una consigna de tensión dada [4, 6]. La forma en que son dispuestos estos arreglos de elementos de compensación define los tres tipos principales de CER detallados a continuación.

FC-TCR (Capacitor Fijo – Reactor Controlado por Tiristores)

Banco de condensadores de valor fijo, en paralelo con reactores controlados por tiristores dispuestos a modo de switch, tal como indica la figura 1. El TCR provee un rango controlable continuo sólo en el rango inductivo de la potencia reactiva. Al conectar en paralelo el banco de condensadores fijos es posible extender este rango dinámico al lado capacitivo.

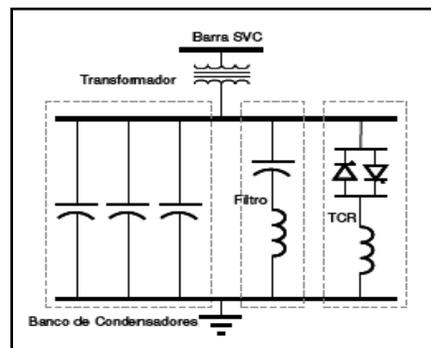


Fig. 1. SVC tipo FC –TCR.

Cabe notar la presencia de una rama destinada a soportar un filtro pasa altos, necesario para disminuir la inyección de armónicas al sistema, provenientes de la operación de los TCR.

Un inconveniente de este tipo de SVC es que dado que circulan enormes corrientes dentro del circuito FC-TCR, necesarias para la cancelación de los MVars capacitivos, se producen pérdidas significativas (de 0,5 a 0,7 % de la capacidad del equipo en MVA), aún en estado estacionario y sin inyección de reactivos al sistema por parte del SVC.

TSC-TCR (Condensador con Switches Tiristorizados – Reactor Controlado por Tiristores)

Un SVC del tipo TSC-TCR se compone generalmente de n ramas TSC y una que consta de un TCR, cuya capacidad corresponde a $1/n$ del total de capacidad de las ramas compensadoras capacitivas figura 2. De esta forma, se tiene un rango discreto de condensadores en servicio, pero gracias al TCR es posible hacer que el rango de variación sea continuo en todo el espectro [4,7].

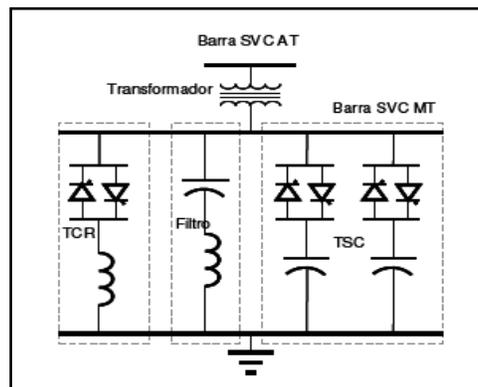


Fig. 2. SVC tipo TSC –TCR con dos ramas TSC.

Dado que la capacidad del TCR es pequeña, la generación armónica se reduce de manera considerable; aun así, se incluye un filtro pasa altos para compensar en caso de que todas las ramas TSC estén en OFF y sólo actúe el TCR. La principal motivación para el desarrollo de este tipo de SVC fue la de mejorar la flexibilidad de la operación del compensador ante grandes perturbaciones y la de reducir las pérdidas de régimen permanente. Un FC-TCR se comporta como un circuito LC paralelo que tiende a entrar en resonancia con la impedancia del sistema ante la presencia de grandes perturbaciones. Ante esta situación, un TSC-TCR puede operar rápidamente desconectando los capacitores, evitando la posibilidad de la resonancia [4].

MSC-TCR (Condensador con Interruptores Mecánicos – Reactor Controlado por Tiristores)

Este tipo de SVC puede ser ubicado en la barra de AT, aunque en algunos casos es necesario ubicar el filtro pasa altos en paralelo con las ramas TCR en el secundario del transformador, para así reducir la carga de armónicas en éste. Las configuraciones típicas se presentan en la figura 3.

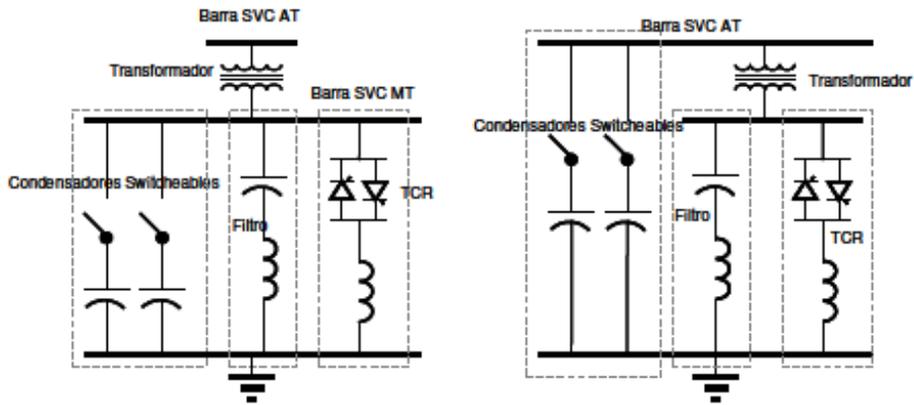


Fig. 3. Configuraciones típicas de un SVC del tipo MSC-TCR.

Una de las ventajas del esquema MSC-TCR radica en la disminución del capital por VAR instalado, producto de la eliminación de los interruptores tiristorizados en las ramas capacitivas; otra ventaja es la relacionada con el reducido rango de pérdidas, lo que influye directamente en los costos operativos [4, 8].

Una desventaja importante de esta configuración, la constituye la relativa lentitud en la respuesta en comparación a la de los interruptores tiristorizados; mientras estos últimos actúan entre en el lapso de medio a un ciclo entero, los switches mecánicos demoran del orden de dos ciclos en el cierre y ocho para la apertura.

Características dinámicas de los SVC

Para efectos de describir la variación de la tensión en la barra de un SVC, tanto en estado estacionario como en régimen transitorio, se recurre a las características V-I de corriente o de potencia reactiva.

El tensión $V_{REFERENCIA}$ corresponde a la tensión en los terminales del SVC durante la operación flotante [7], que puede variar entre los límites $V_{máx. REF}$ y $V_{mín. REF}$ cuyos valores típicos son de 1,05 y 0,95 [pu] respectivamente. La característica Voltaje vs Corriente del SVC se muestra en la figura 4.

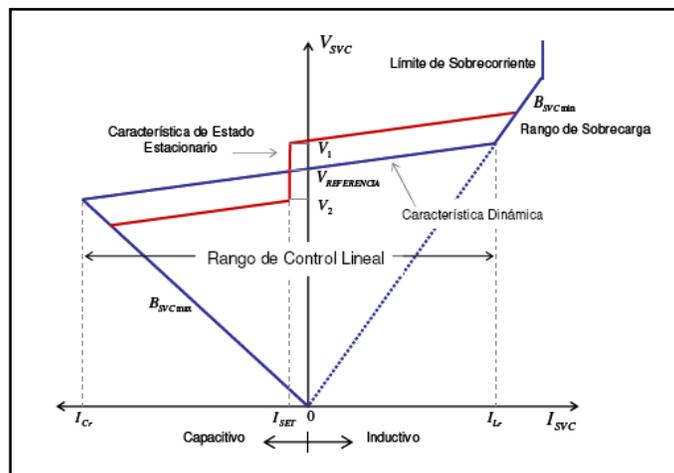


Fig. 4. Característica Voltaje- Corriente del SVC.

La pendiente o *slope* en la característica V-I (y V-Q) se define como el cociente entre el cambio en magnitud del voltaje sobre el rango de control lineal de la corriente como muestra la ecuación (1). Es decir,

$$K_{sl} = \frac{\frac{\Delta V}{V_r}}{\frac{\Delta I}{I_r}} [pu] \quad (1)$$

Donde: V_r e I_r corresponden a los valores de operación del SVC para un estado cualquiera.

Para el caso $\Delta I = I_r$ se muestra en la ecuación (2):

$$K_{sl} = \frac{\Delta V(Q_r, I_r)}{V_r} [pu] \quad (2)$$

Donde: Q_r representa el valor de operación de potencia reactiva.

La pendiente K_{sl} puede ser definida igualmente como la variación de la tensión en porcentaje de la magnitud de la tensión operando en el límite máximo de potencia reactiva (capacitiva inductiva). La pendiente, a su vez, suele ser expresada como se expone en la ecuación (3):

$$K_{sl} = X_{sl} [pu] \quad (pu) \quad (3)$$

El rango de sobrecarga se alcanza una vez que se sobrepasa el rango linealmente controlable en el lado inductivo de la característica V-I (o V-Q), y se caracteriza porque el TCR se comporta como un reactor de valor fijo.

Por su parte, el límite de sobrecorriente aleja el riesgo de que los tiristores estén sometidos a exigencias térmicas excesivas.

El control de tensión ejercido por el SVC puede ser descrito mediante la representación simplificada de la figura 5, donde el sistema de potencia es modelado como una fuente de tensión V_S y una impedancia equivalente X_S vista desde los terminales del SVC. Esta impedancia corresponde a ecuación (4):

$$X_S = \frac{V_b^2}{S_c} S_b [pu] \quad (4)$$

Donde: S_c corresponde a la potencia aparente (MVA) en un cortocircuito trifásico en la barra del SVC, V_b es la tensión base y S_b es la potencia base.

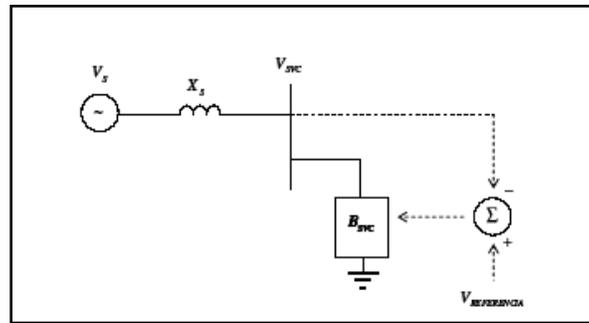


Fig. 5. Diagrama de bloques simplificado de un sistema de potencia y el sistema de control del SVC.

Colapso de tensiones

El colapso de tensiones es causado por la incapacidad del sistema para suplir la demanda por potencia reactiva en ciertas cargas. Una caída en el voltaje de la carga trae consigo un aumento de la demanda por reactivo, la que de no ser provista por el sistema, repercute en una sucesiva caída de la tensión, lo que involucra nuevamente la necesidad de proveer mayor cantidad de potencia reactiva. Bajo esta dinámica, la tensión de la barra decae rápidamente, pudiendo extenderse hacia zonas eléctricas aledañas formando un efecto en cadena que puede incluso provocar un black-out en el sistema [9].

La tensión en una barra de carga suministrada por una línea de transmisión depende de la magnitud de dicha carga, su factor de potencia y la impedancia de la línea como se muestra en la figura 6.

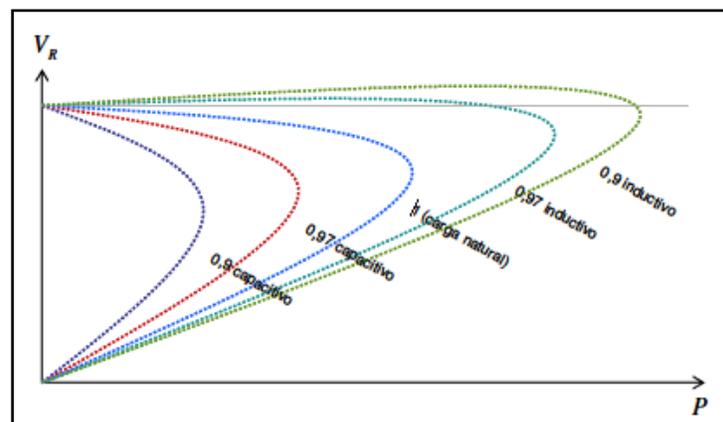


Fig. 6. Perfil de tensiones en una carga con un factor de potencia variable.

Una situación que puede provocar un colapso de tensiones ocurre ante la caída de un circuito de una línea de transmisión que une a un sistema de potencia con una carga industrial (es decir, con una participación considerable de motores de inducción en el total del consumo). Al ocurrir dicha contingencia, ocurre una caída de la tensión, lo que repercute en el aumento del consumo de reactivos por parte de los motores. Esta situación puede ser corregida si la carga requerida por los motores es provista por compensaciones estáticas de la misma magnitud. No obstante, los procesos transitorios ocurridos durante la contingencia implican una acción rápida por parte de dichas compensaciones, lo que no es posible con un banco de condensadores de pasos discretos

operado con interruptores mecánicos. Un SVC puede proporcionar dicha compensación con la suficiente rapidez, siendo el voltaje final de estabilización una función de su máxima potencia reactiva capacitiva [4,9].

RESULTADOS

Modelos implementados en el PSX

En el PSX se implementaron modelos de SVC para la realización de estudios estáticos y estudios dinámicos.

Estudios Estáticos SVC

La representación implementada para estudios estáticos está dirigida a la realización de flujos de carga y flujo óptimo. Los datos necesarios para la realización de estos estudios son los mostrados en la figura 7:

Nombre	Barra	Vnom alta (kV)	Vnom baja (kV)	Xtt (pu)	MVA (MVA)	Vref (kV)	Vmin (kV)	Vmax (kV)	Qmin (MVar)	Qmax (MVar)
S1	37	110.0	100.0	0.0	200.0	121.0	95.0	108.0	30.0	60.0
S2	26	110.0	100.0	0.3	150.0	121.0	95.0	108.0	30.0	60.0

Fig. 7. Tabla de datos del SVC para estudios estáticos.

a) Shunts.

- **Barra.**- Nombre del nodo al que está conectado el SVC
- **Vnom alta (kV).**- Tensión nominal por alta.
- **Vnom baja (kV).**- Tensión nominal por baja.
- **Xtt (pu).**- Reactancia del transformador de interconexión.
- **MVA (MVA).**- MVA del transformador.
- **Vref (kV).**- Va a ser resultado de las corridas de flujo de carga.
- **Vmin (kV).**-Tensión mínima del rango de operación del SVC.
- **Vmax (kV).**-Tensión máxima del rango de operación del SVC.
- **Qmin (MVar).**- Potencia reactiva mínima del rango de operación del SVC.
- **Qmax (MVar).**- Potencia reactiva máxima del rango de operación del SVC.
- **Vt (kV).**- Valor de tensión en el nodo donde está conectado el SVC, es resultado de las corridas de flujo de carga.
- **Qg (MVar).**- Potencia reactiva generada o consumida por el SVC, es resultado de las corridas de flujo de carga.
- **B (µmho).**- Susceptancia del SVC, es resultado de las corridas de flujo de carga.

Estudios Dinámicos. Modelos de Control implementados

I-) **Modelo IEEE-1.**-Regulador proporcional [10] se muestra en la figura 8.

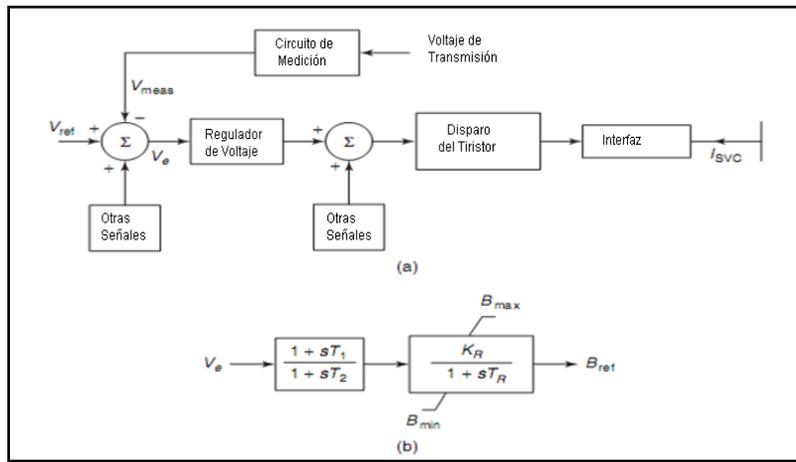


Fig. 8. Modelo IEEE 1 básico de control (b) Modelo del regulador de voltaje.

II-) **Modelo IEEE-2-PI.**- Regulador integral con retroalimentación de corriente mostrado en las figuras 9 y 10.

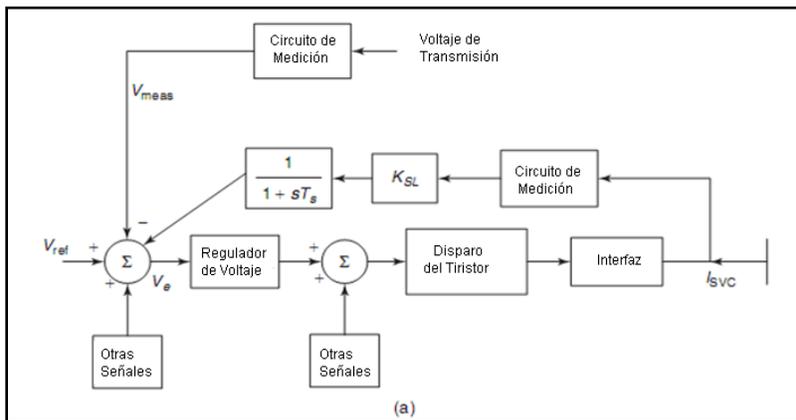


Fig. 9. Modelo IEEE-2-PI básico de control.

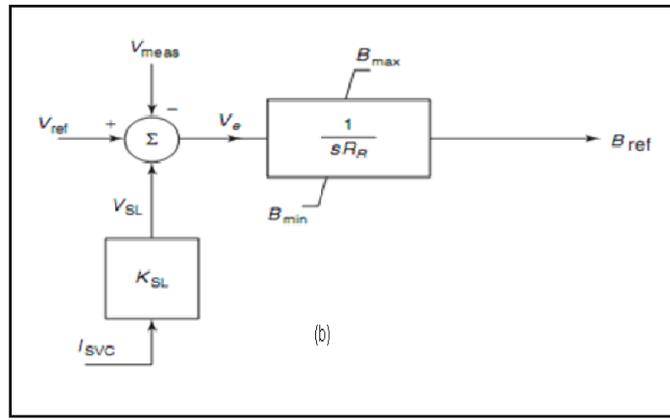


Fig. 10. Modelo del regulador de voltaje.

III-) **Modelo IEEE-2-PB.**- Regulador integral con retroalimentación de susceptancia mostrado en la figura 11.

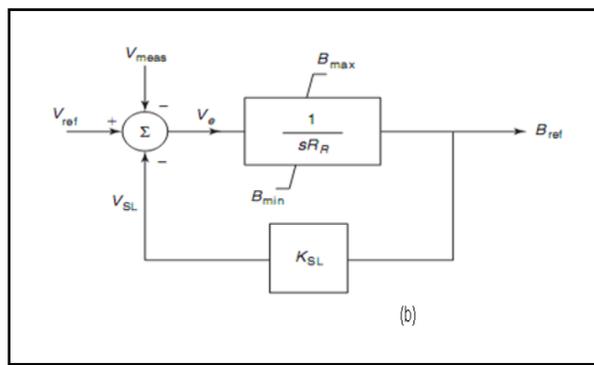


Fig. 11. Modelo del regulador de voltaje.

RESULTADOS OBTENIDOS

Luego de la simulación PSX grafica corriente y reactivo del SVC vs tiempo. Las siguientes figuras 12 y 13, muestran las gráficas que brinda como resultado el programa.

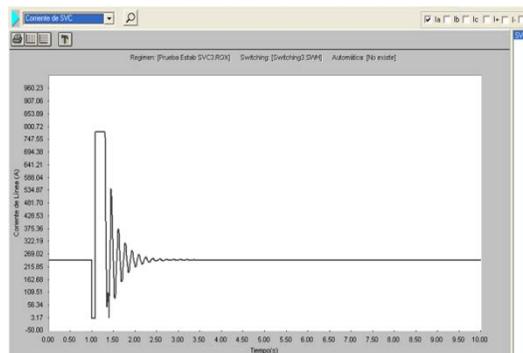


Fig. 12. Gráfica de Corriente del SVC vs Tiempo.

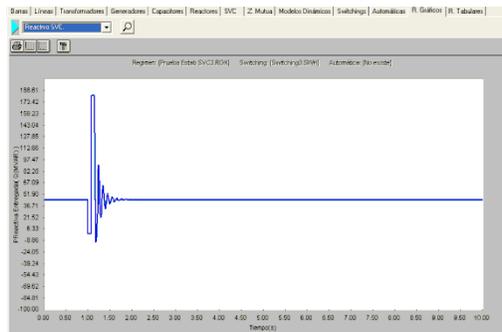


Fig. 13. Gráfica de Potencia del SVC vs Tiempo.

CONCLUSIONES

- Se han implementado 9 modelos de compensadores estáticos de reactivo, tres configuraciones y cada una de estas puede estar controlada por tres modelos de control diferentes.
- Estos modelos implementados permitirán evaluar el comportamiento de SVC conectados en Cuba, además, al brindar los resultados del SVC por baja, la modelación permite el diseño de dispositivos de este tipo.

REFERENCIAS

- [1] SULLIVAN, D., "Improvements in Control Voltage and Dynamic Performance of Power Transmission Systems using Static VAR Compensators (SVC)". Master's Thesis. University of Pittsburgh, School of Engineering 2006, [Consultado 20 de Septiembre 2011], Disponible en: <http://d-scholarship.pitt.edu/6617/>.
- [2] GLANZMANN, G.; ANDERSSON, G., "Using FACTS to Resolve Congestions in Transmission Grids", En: CIGRE/IEEE PES International Symposium, Conference Location: New Orleans, LA, Date of Conference: 7 Oct. 2005, San Antonio, United States, p. 347 – 354, ISBN 0-7803-9191-8.
- [3] ALABDULJABBAR, A.; MILANOVIC, J., "Placement and Tuning of SVCs for the Improvement of Techno-economic Performance of the Network Based on Sequential Number Theoretic Optimization Algorithm". IEEE Power Systems Conference and Exposition, 2006, PSCE '06, Conference Location : Atlanta, GA, Date of Conference: Oct 29 - 1 Nov, 2006, p. 890–895, E- ISBN 1-4244-0178-X, Print ,ISBN 1-4244-0177-1.
- [4] MATHUR, M.; VARMA, R., "Thyristored-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems", 2002, Wiley-IEEE Press, p 495, ISBN 0-471-20643-1 .
- [5] LERCH, E.; POVH, D.; XU, L., "Advanced SVC Control for Damping Power System Oscillations". IEEE Transactions on Power Systems, 1991, vol. 6, n. 2, p. 524 – 535. ISSN 0885-8950.
- [6] SANTOS, A.; CASTRO, M.; MARTÍNEZ, A.; " Penetración eólica con diferentes tecnologías de aerogeneradores en presencia de una red débil ". Ingeniería Energética, 2012, vol.33, n. 2 p. 144 – 156, ISSN 1815 - 5901 .

- [7] AMBRIZ-PÉREZ, H.; ACHA, E.; FUERTE-ESQUIVEL, C.R., "Advanced SVC Models for Newton-Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies". IEEE Transactions on Power Systems, 2001, vol. 15, n. 1, p. 946 – 948, ISSN 0885-8950.
- [8] POURBEIK, P.; BOSTROM, A.; *et al.*, "Operational Experiences with SVCs for Local and Remote Disturbances". IEEE Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. Date of Conference: Oct.29 -1Nov, 2006, Conference location : Atlanta, GA, p.444– 450, E-ISBN 1-4244-0178-X, Print ISBN 1-4244-0177-1, INSPEC Accession Number:9462871 .
- [9] KOWALSKI, J.; VANCERS, I.; REYNOLDS, M.; TYLL, H., "Application of Static VAR Compensation on the Southern California Edison System to Improve Transmission System Capacity and Address Voltage Stability Issues – Part 1. Planning, Design and Performance Criteria Considerations". IEEE Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES, Date of Conference: Oct. 29 -1Nov. 2006, Conference Location: Atlanta, GA, p. 451 – 458, E-ISBN 1-4244-0178-X, Print ISBN 1-4244-0177-1.
- [10] SAKIS MELIOPOULOS, A. P.; COKKINIDES, G.; STEFOPOULOS, G., "Voltage Stability and Voltage Recovery: Load Dynamics and Dynamic VAR Sources". IEEE Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES, Date of Conference: Oct. 29-1 Nov. 2006 .
- [11] SHARMA, N.K.; GHOSH, A.; VARMA, R.K. "A novel placement strategy for FACTS controlles". IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, vol. 18, p. 982 – 987, ISSN 0885-8977

AUTORES

Grettel Quintana de Basterra

Ingeniera Electricista, Profesora Asistente, Centro de Estudios de Electroenergética (CEE), Universidad Central "Marta Abreu de las Villas", UCLV, Villa Clara, Cuba.
e-mail: gqdebasterra@uclv.edu.cu.

José Antonio González-Cueto Cruz

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular, Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas UCLV, Villa Clara, Cuba.
e-mail: cueto@elecvc1.une.cu

Zaid Garcia Sánchez

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular, Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas UCLV, Villa Clara, Cuba.
e-mail: zaid@uclv.edu.cu