

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA ESTADO DEL ARTE COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARES (SVC)

Johnier José Calderón*, Jorge Wilson González*†, Hugo A. Cardona*, Idi A. Isaac*, Gabriel J. López*

*Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1 #70-01, of. 11-259, Medellín, Colombia.

Recibido 2 Mayo 2012; aceptado 22 Junio 2012
Disponible en línea: 26 Junio de 2012

Resumen: Hoy en día los Compensadores Estáticos de Vares (SVC del inglés Static Var Compensator) son una alternativa que permite mejorar la estabilidad de tensión, amortiguar las oscilaciones de potencia y dar soporte de potencia reactiva en áreas delimitadas de los sistemas eléctricos. Esto conlleva a tener un aumento en la confiabilidad y seguridad durante la operación del sistema. En consecuencia, Colombia está apuntando en un mediano y largo plazo a instalar más equipos de los que tiene a la fecha en el Sistema Interconectado Nacional. Copyright © 2012 UPB.

Palabras clave: FACTS (Sistemas Flexibles de Transmisión en corriente alterna), SVC, Sistemas eléctricos.

Abstract: Nowadays Static Var Compensators, SVC, are an alternative that improve the voltage stability, power oscillations and reactive power support in delimited areas of electrical systems. This results in an increased reliability and security during operation of the systems. As a consequence, Colombia is aiming in the medium and long term to install additional equipment on the National Interconnected System.

Keywords: FACTS, SVC, Electrical Systems.

1. INTRODUCCIÓN

Algunos de los tipos de control de electrónica de potencia, ahora bajo el concepto de los Sistemas Flexibles de Transmisión en corriente alterna (FACTS del inglés Flexible AC Transmission Systems), precedieron la introducción de este conocimiento por el Dr. Hingorani (1999) en la comunidad técnica. Entre éstos se destacaba el Compensador Estático de Vares (SVC del inglés Static Var Compensator) para el control de tensión. Éste se expuso por primera vez en Nebraska y fue comercializado por General Electric (GE) en 1974 y por Westinghouse en Minnesota en 1975. El primer controlador serie conectado fue el NGH-SSR (Narain G. Hingorani

subsynchronous resonance var) (N.G. Hingorani, 1981) con esquema de amortiguación, el cual fue inventado por el Dr. Hingorani. Éste constaba de un capacitor serie de baja potencia para el esquema de control de impedancia y fue mostrado por Siemens en 1984 (N.G. Hingorani, L. Gyugyi, 1999).

En los años recientes el sector energético ha estado teniendo un gran dinamismo referente a la demanda, generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, respectivamente como consecuencia del progreso de los países subdesarrollados y desarrollados, y de las nuevas tecnologías que se han creado. Como por ejemplo, el avance en los dispositivos

† Autor al que se le dirige la correspondencia:
Tel. (+574) 4488388 ext. 14130, fax (+574) 4118779.
E-mail: jorgew.gonzalez@upb.edu.co (Jorge González).

semiconductores y técnicas de control disponibles para maniobrar los dispositivos de compensación reactiva en derivación, obteniendo con ello una respuesta rápida en este tipo de aplicaciones utilizadas en los sistemas eléctricos de potencia ([CIGRÉ WG 38.01, 1986](#)).

Asimismo los fabricantes de estos equipos como ABB, Siemens, Alstom, Toshiba, GE entre otros, se han vinculado con diferentes grupos de investigación de universidades, agentes del sector eléctrico y organizaciones profesionales como Cigré (International Council on Large Electric Systems) e IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) para estudiar las temáticas relacionadas con los SVC.

Actualmente el sistema eléctrico Colombiano, [Fig. 1](#), sólo tiene instalados dos SVC. Uno se encuentra ubicado en la subestación Chinú 11 kV (Zona Nordeste del país) y hace parte del Sistema Interconectado Nacional (SIN). El otro está situado en la subestación Caño limón 34,5 kV (Zona Noroeste) y es de uso privado. Sin embargo, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) prevé la necesidad en el mediano y largo plazo de altos requerimientos de potencia reactiva en Bogotá, el área Nordeste y el Valle del Cauca. Así que la ubicación estratégica de un SVC en cada una de estas áreas permitiría un adecuado control de tensiones, soporte de reactivos y un mejor amortiguamiento de las oscilaciones ante contingencias. Adicionalmente, se aumentarían los límites de importación de potencia ([UPME, 2012](#)).

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, se mostrará una sinopsis respecto al marco teórico y estado del arte para la tecnología SVC, en la cual se presente la cantidad de publicaciones/año en el tema, países donde la temática ha tenido mayor avance, nombres de revistas y *journals* donde se observa la mayor población de artículos de interés y artículos más citados respecto al tema. También, se mostrarán los posibles beneficios que traería la instalación de nuevos equipos de esta tecnología en el sistema eléctrico Colombiano.

2. MARCO TEÓRICO

El compensador estático de vares es un elemento conectado en derivación para generar o demandar potencia reactiva. Las salidas del SVC son variadas con el fin de mantener o controlar

parámetros específicos del sistema eléctrico. Estos han sido construidos usando una variedad amplia de diseños. Sin embargo, los elementos controlables usados en la mayoría de sistemas eléctricos son similares. A continuación se presentan por categorías los elementos comúnmente usados:

- Control activo por pasos: Capacitor conmutado mecánicamente (MSC del inglés Mechanically Switched Capacitor).
- Control activo continuo: Reactor controlado por tiristores (TCR del inglés Thyristor Controlled Reactor).
- Control activo variable: Reactor conmutado por tiristores (TSR del inglés Thyristor Switch Reactor) y Capacitor conmutado por tiristores (TSC del inglés Thyristor Switched Capacitor).



Fig. 1. Sistema de Transmisión Nacional a 2011 Tomada de Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), ([UPME, 2012](#)).

2.1. Configuraciones del SVC

La compensación reactiva controlada en los sistemas de potencia usualmente se logra con las siguientes configuraciones:

- Capacitor fijo (FC del inglés Fixed Capacitor) más TCR: En la [Fig. 2](#) se presenta el diagrama unifilar general de un SVC usando esta configuración. Donde la corriente en el reactor es controlada por fase variando el ángulo de disparo de las válvulas de los tiristores. De este modo, la salida de potencia reactiva es continuamente variable en un rango equivalente a la capacidad nominal de Mvar correspondientes al reactor.

La máxima demanda de potencia reactiva está dada por la conducción completa del TCR y la salida de vars está determinada por el reactor, capacitor y filtros instalados en el sistema.

La máxima inyección de potencia reactiva se da cuando el TCR está desenergizado y la salida de vars se determina por los capacitores y filtros conectados. En un sistema trifásico balanceado donde los tres elementos por fase son conectados en delta (TCR de 6 pulsos) únicamente existen armónicos de orden $(6n \pm 1)$.

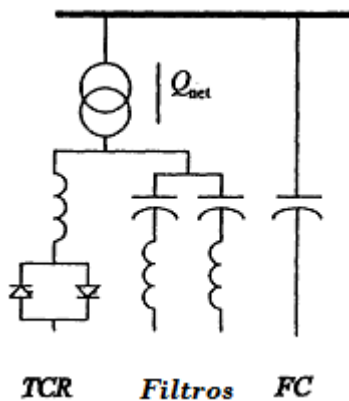


Fig. 2. Configuración TCR – FC

- TCR más TSC: En la [Fig. 3](#) se presenta un diagrama típico para esta configuración. Al igual que el SVC en configuración TCR - FC la salida de potencia reactiva de una configuración TCR - TSC es controlada continuamente a través de su rango de operación.

La máxima demanda de vars está dada por la conducción completa del TCR y la desconexión de los TSCs. La salida de potencia reactiva es la diferencia del TCR y los filtros conectados.

La máxima inyección de vars se da cuando el TCR está desenergizado y todos los TSCs

están en servicio. La salida de potencia reactiva se determina por la suma de todos los TSCs y los filtros conectados. Los Mvar nominales del TCR en este sistema son usualmente mayores que el TSC más grande, de manera que el TCR puede actuar como un control sobre la salida del SVC.

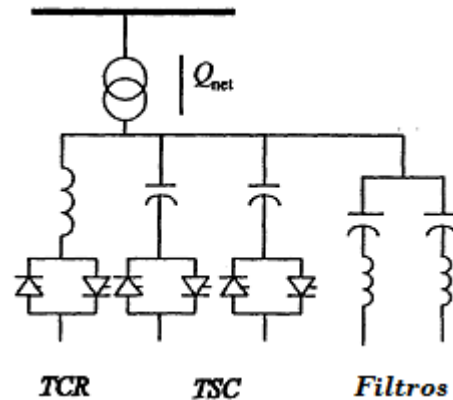


Fig. 3. Configuración TCR – TSC

- TCR más MSC: La [Fig. 4](#) presenta un SVC en configuración TCR - MSC. La característica de la salida de potencia reactiva es similar a la configuración TCR - TSC. La principal diferencia entre el TCR - MSC y el TCR - TSC son la velocidad de respuesta y las pérdidas. Los MSC son usualmente conectados en las barras de alta tensión y la conmutación de éstos es sincronizada con la operación de los tiristores.

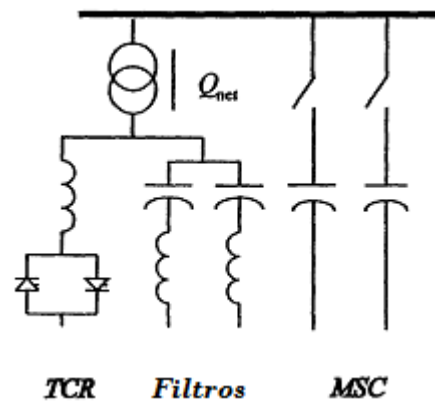


Fig. 4. Configuración TCR – MSC

- TSR más TSC: Esta configuración de SVC consiste de TSRs y TSCs conectados en paralelo. La salida del compensador es controlada por pasos conmutados secuencialmente de los TSRs y TSCs. Mediante la conexión escalonada de los

reactores en lugar de un control continuo; se elimina la necesidad de filtros armónicos en el esquema del compensador.

En el Anexo, se presenta una tabla comparativa de algunas configuraciones utilizadas para la tecnología SVC.

2.2. Característica de un SVC

La característica típica de tensión versus corriente de un SVC para una pendiente determinada se muestra en la [Fig. 5](#). En la mayoría de aplicaciones, el SVC no se utiliza como un regulador de tensión en la barra, sino más bien la tensión de la barra le permite variar de forma proporcional la corriente compensada. La pendiente de regulación está definida como:

$$Pendiente = \frac{\Delta V_{Cm\acute{a}x}}{I_{Cm\acute{a}x}} = \frac{\Delta V_{Lm\acute{a}x}}{I_{Lm\acute{a}x}}$$

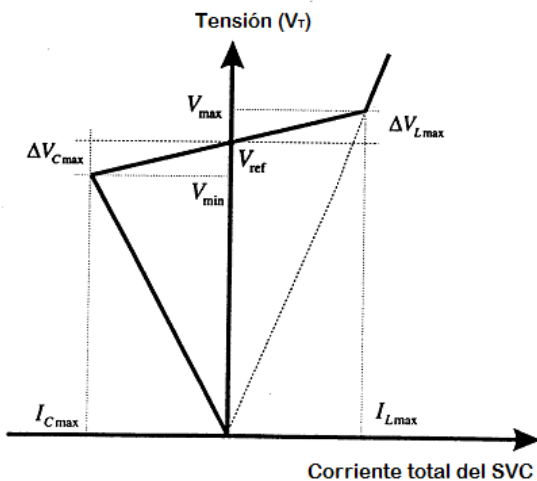


Fig. 5. Característica V-I de un SVC

La regulación de la pendiente permite:

- Extender el rango de operación lineal del SVC.
- Mejorar la estabilidad del regulador de tensión.
- Reforzar el deslastre automático de carga entre el SVC y otros dispositivos de regulación de tensión.

La tensión a la cual el SVC no demanda ni genera potencia reactiva es a la tensión de referencia V_{ref} (ver [Fig. 5](#)). En la práctica esta tensión de referencia puede ser ajustada dentro de un rango típico de $\pm 10\%$. La pendiente de la característica

representa un cambio en la tensión respecto a la corriente del compensador, por lo tanto, puede ser considerada como una pendiente de reactancia X_{SL} . La repuesta del SVC a la variación de la tensión está determinada por:

$$V_T = V_{ref} + X_{SL} I_{SVC}$$

3. ESTADO DEL ARTE

De acuerdo con la primera revisión realizada respecto al estado del arte para la tecnología SVC, a continuación se presenta la clasificación por tópicos de cada uno de los artículos citados en las referencias:

- Teoría: ([CIGRÉ WG 38.01, 1986](#)), ([CIGRÉ WG 14.31, 2002](#)), ([A. Laka, J. A. Barrena, J. Chivite-Zabaltza, M. A. Rodriguez, 2011](#)), ([G. Romegialli, H. Beeler, 1981](#)).
- Diseño: ([M. Tabandeh, M. H. Alavi, M. Marami, G. R. Dehnavi, 2001](#)), ([Z. Jianhua, D. Guanping, X. Gang, Z. Jie, Z. Hui, W. Shuying, 2003](#)), ([M. C. Lima, A. R. Tenorio, 2000](#)).
- Modelación y Simulación: ([W. T. Kwasnicki, I. T. Fernando, A.M. Gole, 2004](#)), ([Stability Controls Working Group, 1994](#)), ([S. Y. Lee, S. Bhattacharya, T. Lejonberg, A. E. Hammad, S. Lefebvre, 1992](#)), ([A. Gelen, T. Yalcinoz, 2009](#)), ([M. O. Faruque, V. Dinavahi, S. Santoso, R. Adapa, 2005](#)), ([Detailed simulation of SVC transient performance using PSCAD, 2000](#)), ([R. Gagnon, P. Viarouge, G. Sybille, F. Tourkhani, 2000](#)), ([A. M. Gole and V. K. Sood, 1990](#)), ([O. Anaya-Lara, E. Acha, 2002](#)).
- Análisis de transitorios en la Red: ([M. F. McGranaghan, R. G. Rocamora, J. G. Koepfinger, 1982](#)).
- Análisis dinámico: ([Alzate, A. and Asdrubal, Castro, O., 2003](#)).
- Estudios transitorios: ([A. J. Mezger, M. L. Barreira, 1999](#)).
- Estudios de impedancia armónica: ([Zhenyu Fan, E. Johan, 2006](#)), ([E. Hammad, 1992](#)), ([J. G. Mayordomo, M. Izzeddine, R. Asensi, 2002](#)), ([W. Xu, J. R. Marti, H. W. Dommel, 1991](#)).
- Protección de equipos asociados al SVC: ([P. S. S. Holenarsipur, N. Mohan, D. J. Christofersen, 1999](#)), ([K. Wikström, Z. Gajic, B. Poulsen, 2009](#)).

- Esfuerzo eléctrico y prueba para las válvulas del SVC: ([CIGRÉ WG 14.01, 1993](#)), ([CIGRÉ WG 14.01, 1995](#)).
- Regulación eléctrica: ([CREG, 2005](#)), ([CREG, 2010](#)).
- Especificación: ([IEEE, 2011](#)).
- Aplicaciones: ([R. Gutman, J. J. Keane, M. E. Rahman, O. Veraas, 1985](#)), ([L. Gyugyi, 1988](#)), ([W. Li-guo, X. Yu, R. Xiang, X. Dian-guo, X. Zhuang, 2011](#)), ([A. Zebardast, H. Mokhtari, 2006](#)), ([H. Ai-jun, S. Fei, C. Wen-jin, 2005](#)), ([L. Gyugyi, E. R. Taylor, 1980](#)).

Es de aclarar que se realizó una búsqueda general de la información disponible para dicha tecnología, razón por la cual se encontró una cantidad considerable de autores que han escrito respecto al tema. En la Tabla 1 se presentan los autores más relevantes con relación a la temática en estudio:

Tabla 1. Autores con mayor número de publicaciones

Autores	Ciudad, País
Laszlo Gyugyi and Edgar R. Taylor	Pittsburgh, USA
A. E. Hammad	Baden, Switzerland
Ani M. Gole	Winnipeg, Canada
O. Anaya-Lara and E. Acha	Glasgow, United Kingdom
Narain G. Hingorani	California, USA
I. Arslan Erinmez	Warwickshire, United Kingdom
Vijay K. Sood	Oshawa, Canada

Además de hallar artículos técnicos desde el año 1980 hasta el año 2011, tal y como se presenta en la Fig. 6.

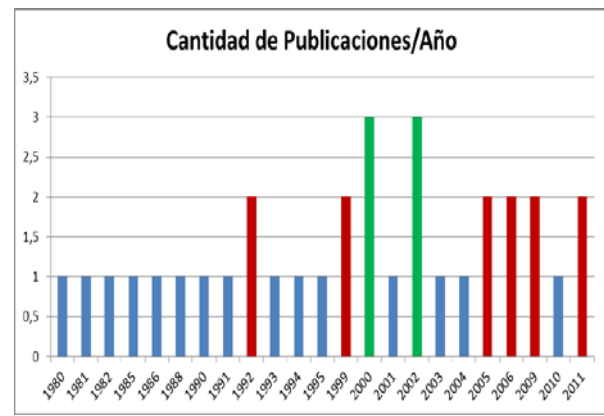


Fig. 6. Cantidad de artículos por año referente a la tecnología SVC

También se realizó un compendio de los países donde la tecnología ha tenido más avance (ver Tabla 2). En esta tabla se observa cómo Estados Unidos es el país que más aporta conocimiento técnico concerniente a esta tecnología, lo cual está totalmente ligado a los autores más relevantes presentados anteriormente.

Tabla 2. Porcentaje de artículos publicados por país

País	%Artículos
Estados Unidos	27,27%
Canadá	21,21%
China	9,09%
Gran Bretaña	9,09%
Suiza	9,09%
Irán	6,06%
Brasil	3,03%
Hungría	3,03%
España	3,03%
Colombia	3,03%
Turquía	3,03%
Australia	3,03%

La Tabla 3 muestra los *journals* o revistas con mayor número de publicaciones en el tema de interés. De éstas se destaca la IEEE, ya que es la que divulga mayor conocimiento respecto al tema de estudio y en segundo lugar está el Cigré.

Tabla 3. *Journals* con mayor número de publicaciones

Nombres de Journals o Revistas	Número de Publicaciones
IEEE Transactions on Power Delivery	6
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems	3
IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition	2
Proceedings of the IEEE	2
Power System Technology - PowerCon	2
IEEE Transactions on Power Systems	2
IEEE Power Engineering Society	2
Cigré Working Group 14.01	2
Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)	1
IEEE Power Tech Proceedings	1
Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power	1
International Conference on Power Systems Transients	1
Power Systems Conference and Exposition, IEEE/PES	1
Cigré Study Committee B5 Colloquium	1
Cigré Working Group 14.31	1
Cigré Working Group 38.01	1
CREG	1
Eurocon, IEEE	1
IEEE European Conference on Power Electronics and Application	1
Manitoba HVDC Research Centre	1

Finalmente, en la Tabla 4 se publican los artículos con mayor número de citaciones conforme a lo indicado en el buscador de internet denominado <http://scholar.google.com.co>. Los tres artículos más importantes se fundamentan en la teoría, modelación, simulación y aplicaciones del tópico en cuestión.

Tabla 4. Artículos más citados

Artículos más citados y cantidad con base en < http://scholar.google.com.co >	
L. Gyugyi, «Power electronics in electric utilities: static VAR compensators», <i>Proc. IEEE</i> , vol. 76, n.º. 4, pp. 483–494, abr. 1988.	164
O. Anaya-Lara and E. Acha, «Modeling and analysis of custom power systems by PSCAD / EMTDC», <i>Power Delivery, IEEE Transact.</i> , vol. 17, n.º. 1, pp. 266–272, Jan. 2002.	156
IEEE Special Stability Controls Working Group «Static VAR compensator models for power flow and dynamic performance simulation», <i>Power Systems, IEEE Transact on</i> , vol. 9, n.º. 1, pp. 229–240, Feb. 1994.	155
L. Gyugyi and E. R. Taylor, «Characteristics of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators for Power Transmission System Applications», <i>IEEE Transact on Power Apparatus and Systems</i> , vol. PAS-99, n.º. 5, pp. 1795–1804, sep. 1980.	52
A. M. Gole and V. K. Sood, «A static compensator model for use with electro-magnetic transients simulation programs», <i>Power Delivery, IEEE Transactions on</i> , vol. 5, n.º. 3, pp. 1398–1407, Jul. 1990.	52
E. Hammad, «Analysis of second harmonic instability for the Chateauguay HVDC/SVC scheme», <i>Power Delivery, IEEE Transactions on</i> , vol. 7, n.º. 1, pp. 410–415, Jan. 1992.	43
CIGRÉ WG 38.01, Task Force No. 2 on SVC, «Static Var Compensators», CIGRÉ Technical Brochure No. 25, 1986, Ed. I. A. ERINMEZ.	31
W. Xu, J. R. Marti, y H. W. Dommel, «Harmonic analysis of systems with static compensators», <i>Power Systems, IEEE Transact</i> , vol. 6, n. 1, pp. 183–190, Feb. 1991.	26
S. Y. Lee, S. Bhattacharya, T. Lejonberg, A. E. Hammad, and S. Lefebvre, «Detailed modeling of static Var compensators using the electromagnetic transients program (EMTP)», <i>Power Delivery, IEEE Transactions on</i> , vol. 7, n.º. 2, pp. 836–847, abr. 1992.	20
G. Romegialli and H. Beeler, «Reactive compensation. Problems and concepts of static compensator control», <i>Generation, Transmission and Distribution, IEE Proc. C</i> , vol. 128, n.º. 6, pp. 382–388, Nov. 1981.	16

4. BENEFICIOS DEL SVC EN EL SIN DE COLOMBIA

El estudio previo de la ubicación adecuada para los nuevos SVC en el Sistema Interconectado Nacional (SIN), y posterior instalación y entrada en funcionamiento de los mismos, prevé los siguientes beneficios en la operación del sistema eléctrico Colombiano:

- Dar estabilidad de tensión durante el estado estable de la red, es decir, seguir la curva de demanda diaria combinando, el adecuado despacho de potencia reactiva y el control continuo de la tensión de referencia.
- Soportar áreas débiles por inestabilidad o niveles inaceptables de tensión luego de una contingencia. Esto se logra generando o demandando de forma rápida grandes cantidades de potencia reactiva por medio del SVC durante un periodo de corta duración.
- Proporcionar grandes cantidades de potencia reactiva inductiva durante un periodo de corta duración ante sobretensiones temporales.
- Aumentar la capacidad de transmisión de potencia activa bajo condiciones de carga máxima (picos).
- Reducir las pérdidas en la transmisión.
- Contrarrestar las oscilaciones de potencia que se presenten en la red por medio de reguladores que amortiguan la oscilación de potencia cuando superan el umbral prestablecido.
- Extender el límite de estabilidad transitoria.
- Mejorar el factor de potencia en los grandes centros de cargas, como por ejemplo: petroleras, minas, siderúrgicas entre otras. Esto se obtiene conectando en paralelo el SVC a la carga en estudio.
- Minimizar la operación de interruptores por consiguiente ahorrar costos en mantenimiento y mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico.

5. CONCLUSIONES

Las referencias citadas y clasificadas por categorías respecto a la tecnología SVC, presentan un primer acercamiento respecto al estado del arte. Éstas permiten tener una base preliminar para la elaboración de todo tipo de proyectos de SVC.

Algunos de los estudios eléctricos que se deben tener presente para recomendar la instalación de

la tecnología SVC en un área delimitada de un sistema eléctrico de potencia son:

- Flujo de cargas: Determinar una adecuada distribución de la potencia activa y reactiva en la red y perfil de tensión.
- Cortocircuito: Establecer los máximos y mínimos niveles de cortocircuito ante fallas monofásicas y polifásicas.
- Estabilidad: Estipular el funcionamiento del sistema durante y después de una condición de falla.
- Transitorios: Obtener la soportabilidad de tiempo corto de los equipos del sistema ante sobretensiones y sobrecorrientes.
- Armónicos: Conseguir los valores de distorsión en el punto de acople común (PCC) y esfuerzos de corriente y tensión en los componentes de los filtros.
- Impedancia armónica del sistema: Determinar la impedancia vista por el punto de conexión (POC) del SVC y las impedancias mutuas entre el POC y las barras adyacentes.

AGRADECIMIENTOS

Por su participación de manera directa o indirecta, se agradece a Santiago Ardila Pino, Andrés Graciano, Maria Paulina González, Juan José Gómez, John Albeiro Calderón y Álvaro Pérez.

REFERENCIAS

- A. Gelen, T. Yalcinoz, 2009. The behavior of Thyristor Switched Capacitor (TSC) installed in an infinite bus system. IEEE Eurocon 09, 1(1), pp. 614-617.
- A. J. Mezger, M. L. Barreira, 1999. Transient studies of the static var compensator of San Lorenzo - Paraguay. IPST '99 – International Conference on Power Systems Transients, pp. 562-566.
- A. Laka, J. A. Barrena, J. Chivite-Zabaltza, M. A. Rodriguez, 2011. Power quality analysis of a static synchronous compensator (STATCOM) connected to a high voltage transmission network. Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), 1(1), pp. 1-10.
- A. M. Gole and V. K. Sood, 1990. A static compensator model for use with electromagnetic transients simulation programs. IEEE Transactions on Power Systems, 5(1), pp. 1398-1407.

- A. Zebardast, H. Mokhtari, 2006. Effect of Low-Voltage Thyristor-Switched Capacitor Banks on Electrical Energy Consumption. PowerCon 2006. International Conference in power system technology.
- Alzate, A. and Asdrubal, Castro, O., 2003. Efectos de un Compensador de VAR estático en el amortiguamiento de las oscilaciones. *Scientia et Technica*, Volumen 21.
- CIGRÉ WG 14.01, 1993. Voltage and Current Stresse on Thyristor Valves for Static Var Compensators, s.l.: CIGRÉ.
- CIGRÉ WG 14.01, 1995. Guidelines for Testing of Thyristor Valves for Static Var Compensators, Paris: CIGRÉ.
- CIGRÉ WG 14.31, 2002. Custom Power State of the art - CIGRÉ Technical Brochure No. 205, Paris: CIGRÉ.
- CIGRÉ WG 38.01, Task Force No. 2 on SVC, 1986. Static VAR Compensators - CIGRÉ Technical Brochure No. 25, Paris: I.A. Erinmez.
- CREG, 2005. Gestión del flujo de potencia reactiva, Bogotá: CREG.
- CREG, 2010. Gestión del flujo de potencia reactiva, Bogotá: CREG.
- E. Hammad, 1992. Analysis of second harmonic instability for the Chateauguay HVDC/SVC scheme. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(1), pp. 410-415.
- G. Romegialli, H. Beeler, 1981. Reactive compensation. Problems and concepts of static compensator control. *Generation, Transmission and Distribution*, IEE Proceedings, 128(6), pp. 382-388.
- H. Ai-jun, S. Fei, C. Wen-jin, 2005. Zero-Cross Triggering Technology of Series SCRs with Optical Fiber at Medium Voltage: Application for Thyristor Switched Capacitor. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, pp. 1-5.
- IEEE, 2011. IEEE Guide for the Functional Specification of Transmission Static Var Compensators, IEEE STD. 1031-2011, New York: IEEE.
- J. G. Mayordomo, M. Izzeddine, R. Asensi, 2002. Load and voltage balancing in harmonic power flows by means of static VAR compensators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(3), p. 761 – 769.
- K. Wikström, Z. Gajic, B. Poulsen, 2009. The design of a modern protection system for a Static Var Compensator. *Cigré Study Committee B5 Colloquium*.
- L. Gyugyi, E. R. Taylor, 1980. Characteristics of Static Thyristor-Controlled Shunt Compensators for Power Transmission System Applications. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-99(5), pp. 1795-1804.
- L. Gyugyi, 1988. Power electronics in electric utilities: static VAR compensators. *Proceedings of the IEEE*, 76(4), pp. 483-494.
- M. C. Lima, A. R. Tenorio, 2000. Design modifications and system studies to relocate a static VAR compensator in a power system with power quality problems. *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power 2000*, 2(1), pp. 652-657.
- M. F. McGranaghan, R. G. Rocamora, J. G. Koepfinger, 1982. Simulation of Static-Var System (SVS) Performance on a Transient Network Analyzer. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS101(9), pp. 3373-3378.
- M. O. Faruque, V. Dinavahi, S. Santoso, R. Adapa, 2005. Review of electromagnetic transient models for Non-VSC FACTS. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), pp. 1065-1079.
- M. Tabandeh, M. H. Alavi, M. Marami, G. R. Dehnavi, 2001. Design and implementation of TSC type SVC using a new approach for electrical quantities measurement. M. Tabandeh, M. H. Alavi, M. Marami, and G. R. Dehnavi, «Design and implementation of TSC type SVC using a new approach for Power Tech Proceedings 2001 IEEE Porto, 2(1), p. 6.
- N.G. Hingorani. A New Scheme for Subsynchronous Resonance Damping of Torsional Oscillations and Transient Torque. Part I, *IEEE Trans. PAS-1 00*, no. 4, April 1981.
- N.G. Hingorani, L. Gyugyi, 1999. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. 1 ed. New York: IEEE Press.
- O. Anaya-Lara, E. Acha, 2002. Modeling and analysis of custom power systems by PSCAD/EMTDC. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(1), pp. 266-272.
- P. S. S. Holenarsipur, N. Mohan, D. J. Christofersen, 1999. Thyristor-switched arrester for improved protection of power system equipment. *Power Engineering Society 1999 Winter Meeting*, Volumen 2, pp. 1009-1014.
- PSCAD, Detailed simulation of SVC transient performance using PSCAD, 2000. Detailed

- simulation of SVC transient performance using PSCAD. PowerCon 2000 Proceedings, 2(1), pp. 685-690.
- R. Gagnon, P. Viarouge, G. Sybille, F. Tourkhani, 2000. Identification of ferroresonance as the cause of SVC instability in a degraded series compensated network. IEEE Power engineering society winter meeting 2000, 2(1), pp. 1377-1382.
- R. Gutman, J. J. Keane, M. E. Rahman, O. Veraas, 1985. Application and Operation of a Static Var System on a Power System - American Electric Power Experience Part II: Equipment Design and Installation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volumen 7, pp. 1875-1881.
- S. Y. Lee, S. Bhattacharya, T. Lejonberg, A. E. Hammad, S. Lefebvre, 1992. Detailed modeling of static VAR compensators using the electromagnetic transients program (EMTP). IEEE Transactions on Power Delivery, 7(2), pp. 836-847.
- Stability Controls Working Group, 1994. Static VAR compensator models for power flow and dynamic performance simulation. IEEE Transactions on Power Systems, 9(1), pp. 229-240.
- UPME, 2012. Plan de Expansión de Referencia Generación – Transmisión 2012-2025, s.l.: Bogotá.
- W. Li-guo, X. Yu, R. Xiang, X. Dian-guo, X. Zhuang, 2011. Passive Control on the Negative Effect of Thyristor Switched Capacitor (I). Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) Asia-Pacific, pp. 1-4.
- W. T. Kwasnicki, I. T. Fernando, A.M. Gole, 2004. Modeling of Conventional and Advanced Static Var Compensators In An Electromagnetic Transients Simulation Program, Winnipeg, Canada.: s.n.
- W. Xu, J. R. Marti, H. W. Dommel, 1991. Harmonic analysis of systems with static compensators. IEEE Transactions on Power Systems, 6(1), pp. 183-190.
- Z. Jianhua, D. Guanping, X. Gang, Z. Jie, Z. Hui, W. Shuying, 2003. Design of the control system for thyristor switched capacitor devices. Z. Jianhua, D. Guanping, X. Gang, Z. Jie, Z. Hui, and W. S. Transmission and Distribution Conference and Exposition 2003 IEEE PES, 2(1), pp. 606-610.
- Zhenyu Fan, E. Johan, 2006. Harmonic Impedance Analysis in the Presence of Static Var Compensator (SVC). Power Systems Conference and Exposition PSCE '06, pp. 1485-1492.

SOBRE LOS AUTORES

Johnier José Calderón

Ingeniero Electricista y Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín. Actualmente está realizando la Maestría en Ingeniería con énfasis en Transmisión y Distribución en la misma institución. Toda su trayectoria profesional se ha desarrollado en el campo de los estudios eléctricos y protecciones eléctricas en sistemas de potencia de baja, media y alta tensión. Ha participado en diversas actividades de pruebas y puesta en servicio de esquemas de protección. Sus principales temas de interés son: sistemas de potencia, control y protección de sistemas eléctricos y nuevas tecnologías relacionada con el área de estudio.

Jorge Wilson González

Ingeniero Electricista de la Univ. Nacional y MSc - PhD. de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Titular de tiempo completo e Investigador. Laboró en HMV Ingenieros y en Siemens, Erlangen en PTD (FACTS y HVDC). Investigador invitado en la Univ. Kempten, Alemania y en el Power Systems Institute en Erlangen Univ. Alemania en el 2005.

Hugo A. Cardona

Ingeniero Electricista, MSc. y estudiante PhD. de la UPB, Colombia, donde es Profesor Titular de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE. Ha sido pasante investigador en XM ESP.

Idi A. Isaac

Ingeniero Electricista, MSc. y PhD. de la UPB, Colombia, donde es Profesor Titular de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE. Investigador invitado en la Univ. Kempten, Alemania y Univ. Comillas, España.

Gabriel López

Ingeniero Electricista, MSc. y estudiante PhD. de la UPB, Colombia, donde es Profesor Asociado de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE. Investigador invitado en la Univ. Kempten, Alemania.

ANEXO

Comparación de algunas configuraciones de SVC

Descripción	TCR-FC	TSC	TCR-TSC-FC
Rango de Control	Capacitivo e Inductivo	Únicamente Capacitivo	Capacitivo e Inductivo
Ajuste de Susceptancia	Activo continuamente	Activo por pasos	Activo continuamente
Adaptabilidad al Control	Buena	Limitada	Buena
- Control de Tensión	Sí	Limitada	Sí
- Señales de Estabilización	Sí	No	Sí
- Balance de fase individual	Sí	Limitada	Sí
Velocidad de Respuesta	Rápido, depende del control del sistema	Rápido, depende del control	Rápido, depende del sistema
Generación de Armónicos	Baja. Los filtros requeridos dependen de las condiciones del sistema	Ninguna	Muy lenta. Requiere filtros dependiendo del sistema
Limitación de Sobretensiones y Capacidad de Sobrecarga	Buena	Ninguna	Limitada
Sensibilidad a la desviación de Tensión y Frecuencia	No	No	No
Pérdidas	Media. Incrementa con el retraso de la corriente	Pequeña. Incrementa con el adelanto de la corriente	Pequeña. Depende de la construcción
Conexión Directa en Alta Tensión	No	No	No
Energización	Rápida con la acción del control	Rápida con la acción del control	Rápida con la acción del control

Fuente: CIGRÉ WG 38.01, Task Force No. 2 on SVC, «STATIC VAR COMPENSATORS», CIGRÉ Technical Brochure No. 25, 1986, Edited by I. A. ERINMEZ. ([CIGRÉ WG 38.01, 1986](#))