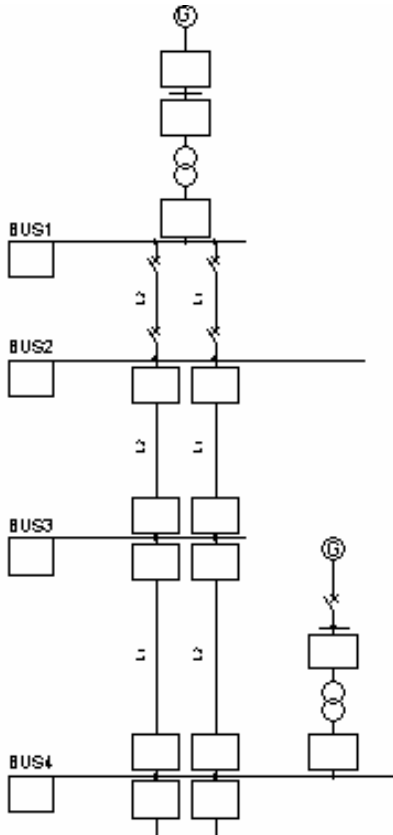


USO DE FUENTES VSI/CSI EN SISTEMAS DE POTENCIA



Guillermo E. Vinasco, MsC.
Interconexión Eléctrica S.A,
Colombia.

RESUMEN

Se presenta una descripción de la evolución de los dispositivos FACTS (Flexible AC Transmisión Systems) desde los dispositivos clásicos (a base de tiristores), hacia convertidores de conmutación forzada, y con almacenamiento de energía.

PALABRAS CLAVES

VSI, CSI, STATCOM. UPFC, SMES.

ABSTRACT

In the last decade, advancements in static reactive compensation (STATCOM) technology based on source converters has produced significant advances in FACTS technology, offering rapid response to system events, improved voltage performance, power system stabilization, enhanced reliability, adding real and reactive power flow

control, and increased power transfer limits. This article provides an overview of these applications.

KEYWORDS:

VSI, CSI, STATCOM. UPFC, SMES.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de compensación evolucionaron del uso de interruptores mecánicos a sistemas basados tiristores (sistemas clásicos), a las aplicaciones actuales que utilizan fuentes conmutadas de tensión (VSI) y corriente (CSI). Esta evolución que ha mejorado las características de desempeño, así como ampliar el rango de aplicaciones de los Sistemas FACTS, aspecto que será abordado en este artículo.

2. SISTEMAS CLASICOS.

Los sistemas clásicos son basados completamente en tiristores, quienes poseen únicamente el encendido controlado; en ellos se requieren bancos de condensadores y/o reactores, y mediante el control de los ángulos de conducción (α), Figura 1, se varía la magnitud de la corriente circulante.

El control de ángulo simula una impedancia variable, que puede ser ajustada de manera "fina", para modificar los parámetros del sistema y controlar el flujo de potencia.

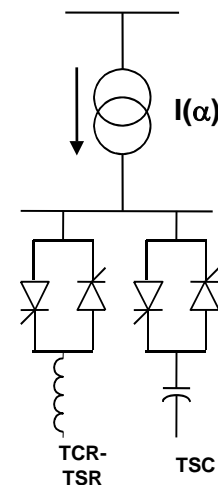


Figura 1. Sistema FACTS clásico.

Al tratarse de una "impedancia variable", se requiere que el sistema imponga una forma de onda (tensión y frecuencia), causando enorme interacción con el sistema de potencia en el punto donde se ubique el dispositivo, efecto más notorio cuanto más débil se encuentre el sistema (mayor impedancia de cortocircuito).

Así las características (limitaciones) de los FACTS clásicos que impulsaron el uso de nuevas tecnologías son:

- Su fuerte interacción con el sistema, sobre todo si éste es débil.
- Los FACTS son "a la medida" del punto de conexión (imposible su traslado).
- Son basados en convertidores guiados por la red, con capacidad reducida de ayuda en situaciones de bajas tensiones en el sistema, y nula en caso de un colapso.
- Son fuentes de armónicos de frecuencia fundamental (50, 60 Hz), requiriendo sistemas de filtrado muy bien dimensionados.
- Posibilidad de resonancias si no se toman las medidas adecuadas.

Para solucionar los inconvenientes anteriores se migró hacia convertidores de potencia con estructuras más complejas (VSI, CSI), que requieren válvulas electrónicas con encendido y apagado controlado (GTO, MTO, ETO, IGBT, etc.), es decir ir más allá de las posibilidades de los tiristores convencionales.

3. CONVERTIDORES VSI Y CSI.

Un convertidor es un elemento que convierte la potencia eléctrica de corriente y tensión determinada a otra forma de corriente y tensión. Los convertidores electrónicos se pueden implementar de dos formas: mediante fuentes de tensión (Voltage Source Inverter, VSI), o mediante fuentes de corriente (Current Source Inverter, CSI). Los convertidores VSI, Figura 2, solo se pueden construir con válvulas de apagado controlado; ellos poseen un lado DC donde el voltaje no cambia de polaridad, pero la corriente fluye en cualquier dirección, para generar de allí tensión AC; Esta tensión puede ser variada en magnitud, frecuencia y ángulo de fase.

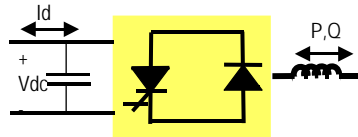


Figura 2. Convertidor VSC.

Hasta hoy los convertidores VSI han probado ser más prácticos y económicos, por lo cual es el tipo de convertidor preferido en los FACTS actuales [1]. Los sistemas VSI trifásicos generan la tensión AC de dos formas, bien sea por modulación de ancho de pulso (Pulse Width Modulation, PWM), o por suicheo a frecuencia fundamental (Fundamental Frequency Switching, FFS). Un estudio detallado de ambas técnicas se puede encontrar en [1][2][3].

Los convertidores basados en CSI, Figura 3, generan una corriente AC a partir de la fuente de corriente DC. Pueden ser construidos con válvulas convencionales (ejemplo los rectificadores), o en estructuras avanzadas con válvulas con apagado controlado (ejemplo sistemas Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES).

Las aplicaciones de CSI avanzados están aún en etapas de desarrollo, o al nivel de prototipos avanzados en laboratorio.

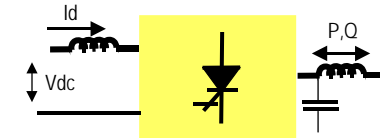


Figura 3. Convertidor CSI.

Comparado esto nuevos dispositivos con los FACTS clásicos se puede anotar:

- VSI y CSI dependen de la red, pudiendo operar aun sobre redes y/o cargas pasivas.
- En los convertidores construidos con válvulas de encendido y apagado controlado el suicheo puede realizarse muchas veces por cada ciclo del voltaje AC de salida, así voltaje y corriente pueden ser modulados para generar menos armónicos, o generar armónicos de frecuencias altas, mucho más sencillos de filtrar, por ello se está imponiendo el uso de convertidores basados en PWM.
- VSI y CSI pueden operar con cualquier factor de potencia.
- Los CSI poseen control inherente de la corriente de cortocircuito.
- La estructura básica para organizar convertidores complejos es el convertidor de 6 pulsos. Los convertidores CSI de 6 pulsos no producen tercer armónico, simplificando el transformador de acople que no requiere la conexión de devanados en serie para filtrado.
- Son posible convertidores con eliminación de armónicos (filtros activos).
- Las válvulas utilizadas en los convertidores VSI y CSI, permite en ellos una mayor rapidez de respuesta sobre los convertidores

tradicionales, en los cuales la actuación que tienen un retraso de hasta 1 ciclo de la tensión de AC.

4. COMPENSACIÓN REACTIVA SHUNT (STATCOM)*.

Un STATCOM (Static Synchronous Compensator) es un convertidor VSI trifásico, Figura 4, siendo el equivalente de una máquina sincrónica, pero sin inercia mecánica, y por ende con respuestas dinámicas mucho más rápidas.

Un STATCOM produce un conjunto de tres tensiones de salida con frecuencia, relación de fase y magnitud ajustable, cuya conexión a un sistema se realiza a través de una reactancia, usualmente la de dispersión de un transformador de acople.

En los VSI (tal como el STATCOM) las aplicaciones PWM estaban circunscriptas a bajas potencias debido a sus pérdidas de conmutación, pero dado las ventajas que presentan en cuanto a controlabilidad y desempeño dinámico se ha justificado la búsqueda de sistemas PWM con menores pérdidas, y mayores capacidades.

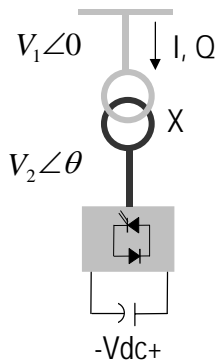


Figura 4. Convertidor STATCOM.

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \text{seno}(\theta) \text{ Ecu. 1}$$

$$Q = \frac{V_1 V_2 \cos(\theta) - V_1^2}{X} \text{ Ecu. 2}$$

Al dispositivo generar una tensión V2 (de magnitud y ángulo controlable), varía la potencia activa y reactiva que éste intercambia con el sistema. Para evaluar el desempeño dinámico del dispositivo se

* Varios nombres fueron propuestos, ASVC, STACON, etc., finalmente el nombre STATCOM fue seleccionado por el CIGRE.

parte del balance de potencia activa (ignorando pérdidas):

$$\frac{V_1 V_2}{X} \text{seno}(\theta) = V_{dc} I_{dc} \text{ Ecu. 3}$$

Las relaciones entre las tensiones del convertidor (siendo k el factor de modulación):

$$V_2 = k V_{dc} \text{ Ecu. 4}$$

Se puede obtener una ecuación diferencial no lineal entre las tensiones AC y DC:

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{k V_2}{CX} \text{seno}(\theta) \text{ Ecu. 5}$$

Cuando el ángulo es positivo ($\theta > 0$) se carga el condensador y $Q > 0$; por el contrario si éste es negativo ($\theta < 0$) se descarga el condensador y $Q < 0$, y si el ángulo es nulo ($\theta = 0$) se mantiene la tensión del condensador y $Q = 0$. Si el ángulo no es nulo, el STATCOM absorbe o entrega potencia activa al sistema, dependiendo de V_1, V_2 , y X .

Al carecer de fuente interna de energía, un STATCOM en estado solo puede intercambiar potencia reactiva y su ángulo debe ser cero ($\theta = 0$).

La magnitud de V2 (la tensión interna generada) no depende de la tensión del sistema, así contrario al compensador SVC el STATCOM posee una característica, Figura 5, que lo hace útil aún en condiciones de colapso, y le da a este una ventaja del orden de un 25-30% sobre un SVC en cuanto a capacidad total requerida (MVA) para una aplicación particular [4].

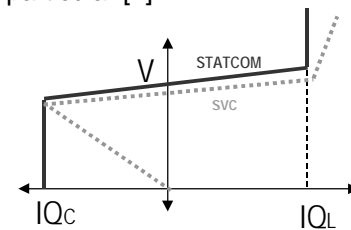


Figura 5. Característica estática de un STATCOM y un SVC.

El STATCOM opera como una compensación shunt, que puede tomar corrientes en 90 grados en adelante o en atraso de la tensión del sistema (Figura 6), y al proveer potencia reactiva con cualquier valor de tensión en el sistema, su habilidad para soportar la tensión del sistema es superior a la de un SVC (donde la potencia reactiva cae en proporción al cuadrado de la tensión del sistema).

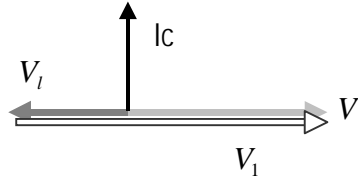


Figura 6. Compensación capacitiva mediante un STATCOM.

Un STATCOM como compensación controlada permite sumar a los objetivos de regulación de tensión, controles auxiliares para otros fines (ejemplo amortiguamiento de oscilaciones de potencia [5] [6]), y con un sistema de energía auxiliar arrancar el sistema en un colapso.

Solo se ha tenido en cuenta la secuencia positiva, pero existen otras aplicaciones en la alimentación de cargas (industrias papeleras, hornos eléctricos) donde se requiere manejar y mitigar desbalances, donde los STATCOM también son aplicables, con el uso de estrategias de control especiales.

Los proyectos para dar mayor competitividad a STATCOM frente a dispositivos clásicos como SVC se enfocan en:

- Emplear estructuras (mecánicas y magnéticas) estándar en los transformadores de acople.
- Buscar frecuencias óptimas de suicheo de los convertidores; Frecuencias altas hacen más fácil el filtrado de armónicos, pero producen mayores pérdidas de conmutación.
- Reducir la distorsión armónica al punto de eliminar la necesidad de filtros.
- Utilizar estructuras modulares de convertidores de 6 pulsos para logra ventajas en volúmenes de fabricación estandarización y disponibilidad de repuestos.
- Desarrollar sistemas de control altamente flexibles, que permitan cubrir necesidades en estado estable, transitorio, diagnóstico, filtrado activo, resonancia subsíncrona, modos degradados, etc.

5. COMPENSACION REACTIVA SERIE (SSSC).

Se logra mediante la conexión en serie con la línea a compensar de un VSI, mediante un transformador especial (booster transformer), Figura 7.

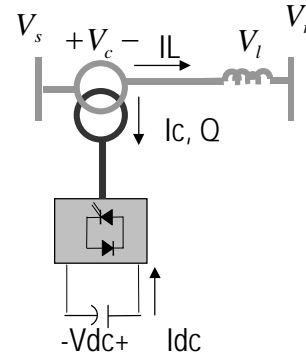


Figura 7. Compensación reactiva serie SSSC.

De esta forma el dispositivo opera como una compensación serie que inyecta una tensión 90 grados en adelanto o en atraso de la corriente de la línea Figura 8 (compensación serie). La magnitud de la compensación es fácilmente controlable.

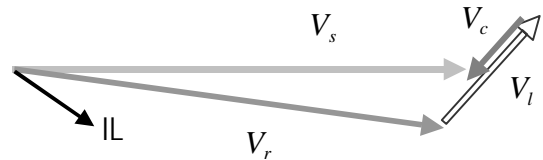


Figura 8. Compensación de una línea mediante un SSSC.

Este dispositivo en estado estable solo puede intercambiar potencia reactiva con el sistema AC, luego Vc siempre será perpendicular a IL, Figura 8. Al tratarse de una compensación serie controlada, sus aplicaciones incluyen:

- Control de la magnitud del flujo de potencia por una línea.
- Variar la impedancia aparente de línea
- Limitar niveles de cortocircuito.
- Amortiguar oscilaciones de potencia.
- Evitar problemas de resonancia subsíncrona.

6. COMPENSACION UNIVERSAL (UPFC).

Mediante el acople de dos STATCOM por un barraje de DC Figura 9, un convertidor le puede proveer a otro potencia activa, siendo posible inyectar en la línea a compensar una tensión (Vc) con cualquier relación de fase con respecto a al corriente de línea (IL) [7].

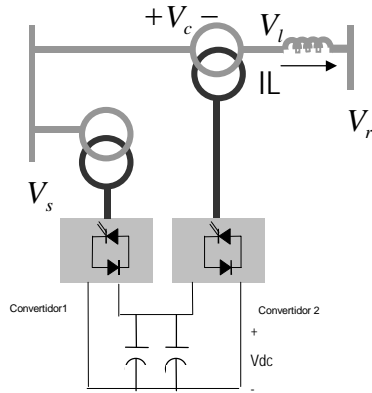


Figura 9. Compensador universal UPFC.

- Si V_c se inyecta en fase con V_s se está realizando regulación de tensión, similar a mover el tap de un transformador, o a la aplicación un transformador regulador (su aplicación es ilustrada en [8]).
- Si V_c se inyecta 90 en adelanto o atraso con I_L se trata de una compensación reactiva.
- La opción más interesante, inyectar V_c de tal forma que V_r e I_L queden en fase, de esta forma la línea ¡ solo transporta potencia activa ! (Figura 10). Esta opción es similar a lo logrado con transformadores desfasadores, con la ventaja que estos últimos solo cambian la relación de fase, pero no proveen potencia reactiva.

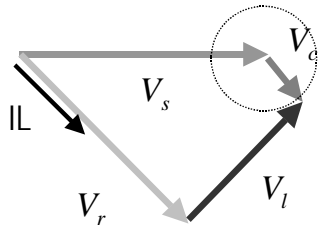


Figura 10. Compensación de una línea mediante un UPFC.

Dada todas las posibilidades que posee, a éste dispositivo se denomina compensador universal de flujo de potencia (**U**niversal **P**ower **F**low **C**ontroller, **UPFC**).

7. SISTEMAS FACTS CON ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.

Los UPFC son dispositivos en los cuales la potencia activa circula a través de ellos, pero no la suministran al sistema. Existe interés en dispositivos con almacenamiento de energía, (Figura 11), que puedan almacenarla e intercambiarla con el sistema para estabilizar la red durante un disturbio; Normalmente el dispositivo se

mantiene en modo "stand by", y cuando ocurre la perturbación intercambia energía muy rápidamente para compensarla, aplicación muy útil en sistema de distribución que alimenten cargas sensibles [9].

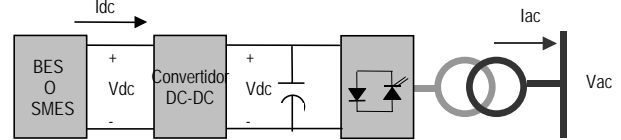


Figura 11. Compensador con almacenamiento de energía

En un sistema basado únicamente en potencia reactiva (SVC o STATCOM) la modulación de ésta afecta la tensión y el flujo de potencia, teniéndose un problema acoplado, que en muchas situaciones obliga a sacrificar la regulación de tensión frente a otras aplicaciones. Si un dispositivo puede entregar también potencia activa, se puede compatibilizar mejor la regulación de la tensión con otras aplicaciones.

Estos dispositivos no tratan de alimentar la carga en forma permanente, tampoco es posible el uso de cualquier fuente de energía (eólica, solar, celdas de combustible, etc.), pues algunas fuentes no son adecuadas por los tiempos de respuesta requeridos. Las fuentes posibles para aplicaciones de estabilización de la red son:

- Sistemas de baterías (Battery Energy Storage System, BESS). Tras procesos proceso de deliberación, en términos económicos y sobre todo medioambientales (las baterías antes eran exclusivamente a base de plomo), se ha aceptado su uso.
- Sistemas superconductores (SMES): Una bobina superconductora mantiene una corriente y almacena energía en su campo magnético indefinidamente, sin reacciones químicas ni generación de contaminantes; La bobina superconductora al no poseer resistencia eléctrica puede liberar la energía almacenada "instantáneamente". En este tipo de aplicaciones es interesante un convertidor CSI, pues la fuente de energía entrega una corriente DC para crear a partir un la señal AC de salida.
- Supercondensadores: dispositivos que almacenan energía en campo eléctrico, pero polarizando un electrolito. En ésta tecnologías aún las tensiones y la cantidad de energía almacenada son bajas, siendo hoy solamente propicios para la alimentación de dispositivos móviles (celulares, etc.), pero se augura un buen futuro para este tipo de tecnologías en sistemas de potencia.

Los sistemas SMES han tendido aplicación en laboratorios de investigación física [10], para

mitigar los efectos de cargas especiales que presentan valores de demanda muy grandes durante tiempos muy cortos. En menor proporción se han tenido aplicaciones puntuales en cargas industriales que requieren servicio de altísima calidad en cuanto a servicio ininterrumpido y ausencia de disturbios. Un SMES puede rápidamente ser recargado y repetir ciclos de cargas y descarga casi indefinidamente.

Aparte de la investigación propia en la obtención de materiales superconductores de características más apropiadas para aplicaciones de ingeniería (mayores temperatura de operación, menor costo, menor fragilidad, etc.), la investigación en SMES se ha enfocado en resolver problemas que limitan su aplicación:

- Geometría de bobinas para optimizar capacidad y espacio que ocupan.
- Estudio de las interacciones entre la bobina superconductoras y el convertidor electrónico de potencia.
- Investigar la relación óptima entre voltaje y corriente de operación.
- Mejorar la eficiencia del sistema mejorando la interfase electrónica en este aspecto.
- Construcción prefabricada de componentes. con bajo grado de complejidad, y alta accesibilidad para su reparación.
- A parte de la reducción del costo del material superconductor, reducción del costo de la bobina, siendo este un componente muy importante del costo total.
- Los campo magnéticos y su efecto sobre el entorno. Que intensidad final de campo magnético es requerida dada una geometría y aplicación particular.
- Aumentar su capacidad de almacenamiento para también compensar variaciones de corto término en la demanda.

Las aplicaciones las futuras de sistemas de almacenamiento de energía permitirán:

- Control completo e independiente de la potencia reactiva y por ende de la tensión, en estado estable y transitorio.
- Estabilización y amortiguamiento en redes de transmisión.
- Control completo del flujo de potencia en AC.
- La independencia entre el control de tensión y potencia.
- Evitar aumento desmedido de la potencia de cortocircuito.
- Lograr mejor desempeño de redes débiles (puntos débiles) sin expansiones en distribución, transmisión o generación.
- Mejorar desempeño de redes aisladas.

- Afrontar tareas en aplicaciones que requieran mayor rapidez de respuesta.
- Reserva dinámica.
- Control de frecuencia.
- Manejo de picos de carga.
- Prevención de resonancias síncrona y subsíncrona.

Un dispositivo posee mayor capacidad en potencia reactiva (Q) que en activa (P), la posibilidad de almacenamiento de energía afecta la capacidad de potencia activa, que se suma ortogonalmente a la potencia reactiva, por lo que se efecto sobre la corriente total del dispositivo no es severo.

8. CONCLUSIONES.

Se realizó una descripción del desarrollo y uso de dispositivos FACTS de última generación, su evolución a partir de los dispositivos actuales y las expectativas de aplicación en sistemas de potencia. La característica de aplicaciones de convertidores con fuentes VSC/VSI fue mostrada, así como las ventajas de los sistemas FACTS basadas en ellas, y como estas evolucionaron hacia la inclusión del almacenamiento interno de energía.

Los dispositivos FACTS que incorporan almacenamiento de energía aún están circunscriptos a amortiguar disturbios en un sistema, el próximo paso de estos es su aplicación en el seguimiento y compensación de variaciones de la demanda.

9. BIBLIOGRAFIA.

- [1] Hingorani, Narain G.; Gyugyi, Laszlo The Institute of Electrical and Electronics Engineers, (IEEE). Understanding FACTS, IEEE Press, 2000. 432p.
- [2] Mohan Ned, Tore Undeland, Robbins William. Power Electronics Converters, Applications and Design. 2nd ed. Jhon Wiley & Sons, Inc. New York 1995. 802p.
- [3] The Institution of Electrical Engineers. (IEEE) Flexible AC Transmission Systems (FACTS). London, 1999. 592p.
- [4] Electric Power Research Institute. EPRI; Development of STATCOM. Volume 1: Basic Theory. EPRI Palo Alto, 1999.
- [5] Vargas Marín, Francisco Javier.. Avaliacao da Estrutura e Ordem de Controladores de Sistemas de Potencia em um Algoritmo de Posicionamento de Polos. Tesis Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil 1994. 93p.
- [6] The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Tutorial Course Power

- Stabilization Via Excitation Control. Course Text
81 EHO 175-0 PWR. Piscataway, N.J. 1980.
- [7] Electric Power Research Institute. EPRI Design, Installation, and Operation of American Electric Power (AEP) +/- 320 MVA Unified Power Flow Controller (UPFC). EPRI. Palo Alto, 1999.
- [8] Olle Elgerd. Electric Energy Systems Theory: an introduction, 2nd ed. McGraw-Hill. 1983. 533p.
- [9] Electric Power Research Institute. EPRI; FACTS With Energy storage: Conceptual Design Study. EPRI Palo Alto, 1999.
- [10] Toshifumi Ise, Hikaru Sato, Magnet Power Supply with SMES in the DC Link for Large Scale Accelerators. The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, November 2003.

AUTOR



Guillermo Enrique Vinasco M. Sc.

Interconexión Eléctrica S.A.
Especialista Estudio Eléctricos
Calle 12 Sur No 18.168, Medellín,
Colombia, gevinasco@isa.com.co