

ARTÍCULO CIENTÍFICO / RESEARCH ARTICLE

Efecto de los FACTS serie en la estabilidad de voltaje de estado estacionario

Effect of series FACTS on steady-state voltage stability

Luis Horacio Ramírez Borrero*
John Edwin Cándelo Becerra**
Gladys Nayiber Caicedo Delgado***
Diego Burbano Jiménez****

* Ingeniero Electricista, Universidad del Valle, Cali (Colombia). Actualmente es estudiante de la Especialización en Gestión de los negocios de generación y distribución eléctrica, Universidad Corporativa Gas Natural Unión Fenosa, Madrid (España).
luishrb@hotmail.com

Correspondencia: Cra 48 N° 14-170, Cali (Colombia). Tels. 3352208-3166732695.

** Ph.D en Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle, Cali (Colombia). Actualmente es profesor de tiempo completo de la Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia).
jcandelo@uninorte.edu.co

*** Ph.D en Ingeniería, con énfasis en Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle, Cali (Colombia). Profesora tiempo completo, Universidad del Valle, Grupo de Investigación en Alta Tensión GRALTA, Cali (Colombia).
glacadel@univalle.edu.co

**** Ingeniero Electricista, Universidad del Valle, Cali (Colombia). Actualmente es estudiante de la Especialización en Gestión de los negocios de generación y distribución eléctrica, Universidad Corporativa Gas Natural Unión Fenosa, Madrid (España).
djalejo333@hotmail.com

Resumen

Este artículo presenta un estudio del efecto de los FACTS (Sistemas de transmisión en corriente alterna flexibles) serie en el mejoramiento de la estabilidad de voltaje de estado estacionario, para diferentes condiciones de operación del sistema de potencia. Se utiliza la herramienta computacional NEPLAN para modelar los FACTS serie sobre el sistema de potencia estándar IEEE300, modificado levemente para cumplir con las restricciones operativas y ubicar los dispositivos FACTS. Para determinar el efecto de estos dispositivos FACTS se realiza un análisis de contingencias, se determina la cargabilidad máxima y reducida del sistema de potencia, y se efectúan los estudios de estabilidad de voltaje utilizando las técnicas de análisis modal y las curvas de potencia vs voltaje (PV). Finalmente, se presenta una tabla comparativa de los resultados de los dispositivos FACTS serie, utilizando como índices de evaluación los valores propios y el margen de estabilidad de voltaje del sistema de potencia.

Palabras clave: Estabilidad de voltaje, FACTS serie, sistemas de potencia, análisis modal, margen de estabilidad de voltaje.

Abstract

This paper presents a study to determine the effect of series FACTS (Flexible AC Transmission Systems) on steady-state voltage stability, for different operating conditions of the power system. For this study, the simulation software NEPLAN is used for modeling FACTS in the IEEE300 power system. This power system is changed slightly to comply the operative constraints and apply the proposed location methods for FACTS devices. To determine the effect of these FACTS devices, a contingency analysis is carried out with the maximum and the reduced chargeability, and the voltage stability analysis using modal analysis and PV curves. Finally, it presents a comparison chart of eigenvalues and voltage stability margin results using series FACTS devices.

Keywords: Voltage stability, series FACTS, power systems, modal analysis, voltage stability margin.

Fecha de recepción: 24 de septiembre de 2008
Fecha de aceptación: 21 de agosto de 2009

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sistemas de potencia están sometidos continuamente a variaciones de carga, salida de generadores, salida de líneas y otros eventos que pueden alterar la condición nominal de operación y llevarla hacia los límites de estabilidad de voltaje.

Un sistema de potencia es estable si durante la operación normal y después de ser sometido a un disturbio se mantiene en condiciones de equilibrio y

no presenta variaciones que conducen a la inestabilidad. El sistema entra en inestabilidad de voltaje cuando las perturbaciones como el aumento de la carga o el cambio en la topología de la red causan una caída de voltaje progresiva e incontrolable. La caída de voltaje tiene como consecuencia una disminución de la potencia reactiva suministrada por el sistema [1].

Hoy en día existen nuevas técnicas para el control de la potencia reactiva; una de ellas es la utilización de dispositivos compensadores FACTS. Estos dispositivos son útiles para aumentar o disminuir la capacidad de los reactivos del sistema de potencia, y así solucionar problemas de estabilidad de voltaje [2], [3]. Sin embargo, para garantizar el funcionamiento deseado de estos dispositivos es necesario evaluar su respuesta ante diferentes situaciones operativas que se puedan presentar en un sistema, y de esta forma realizar la selección de los tipos de compensadores y sus ajustes para mejorar las condiciones de estabilidad.

En este artículo se presenta un estudio del efecto de los compensadores FACTS serie en el mejoramiento de la estabilidad de voltaje durante el estado estacionario de un sistema de potencia, después de haber sido sometido a diferentes condiciones de cargabilidad y contingencias.

2. ESTABILIDAD DE VOLTAJE

Un sistema de potencia tiene la capacidad de mantener la estabilidad de voltaje si para una condición de operación determinada, la magnitud de voltaje de cada nodo aumenta cuando se incrementa la inyección de potencia reactiva en el mismo, y es inestable cuando al menos en un nodo la magnitud del voltaje se reduce [4]. Para determinar la estabilidad de voltaje en un sistema de potencia se pueden utilizar métodos de análisis como las curvas PV y el método modal.

Las curvas PV relacionan los voltajes de los nodos con la cargabilidad del sistema. En este artículo se utilizan las curvas PV para mostrar la magnitud de los voltajes de cada nodo cuando la potencia de todas las cargas del sistema es aumentada escalonadamente. Los beneficios de este método consisten en proveer una indicación del margen y el límite de la estabilidad de voltaje [1], [3].

El análisis modal es un método basado en el uso de la información de los valores y vectores propios de la matriz jacobiana del sistema de potencia; estos valores relacionan la variación de voltaje con respecto al cambio de potencia reactiva [1]. Los valores propios identifican diferentes modos de operación, a través de los cuales el sistema puede volverse inestable. Un valor propio positivo indica que el sistema cuenta con estabilidad de voltaje, un valor propio cercano a cero indica una estabilidad crítica y un valor propio negativo indica que el sistema es inestable en voltaje. Este análisis también es útil para identificar las áreas críticas del sistema en estabilidad de voltaje y los elementos de mayor influencia en cada modo, utilizando los factores de participación. Los factores de participación indican el elemento del sistema de mayor influencia en la inestabilidad de voltaje. Se pueden obtener la contribución de cada nodo para mantener la estabilidad de voltaje y el factor de participación de cada rama para cada uno de los modos de operación del sistema. Los nodos con factores de participación altos son adecuados para la compensación con FACTS conectados en paralelo. Las ramas con factores de participación altos son enlaces débiles y tienen una alta cargabilidad, por lo cual son preferidas para la compensación con FACTS conectados en serie. Por lo tanto, estos factores se pueden utilizar para la ubicación de los dispositivos FACTS [4], [5].

3. DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS FACTS SERIE ESTUDIADOS

Los dispositivos FACTS son elementos basados en electrónica de potencia, capaces de modificar los parámetros y variables del sistema, como el voltaje, la corriente y la impedancia, para mejorar la transferencia de potencia y la estabilidad de voltaje [2], [6]. Estos elementos de compensación pueden ser conectados en serie con las líneas de transmisión o en paralelo con los nodos de carga. De acuerdo con el tipo de conexión en el sistema de potencia, los FACTS se clasifican como: serie, paralelo y combinado.

Este trabajo de investigación realizó un estudio de los efectos sobre la estabilidad de voltaje, que originan dos tipos de FACTS conectados en serie, como el compensador TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) y el SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*).

TCSC. Está compuesto por un capacitor fijo conectado en paralelo, con un reactor controlado por tiristores (TCR), como se ilustra en la figura 1 [2].

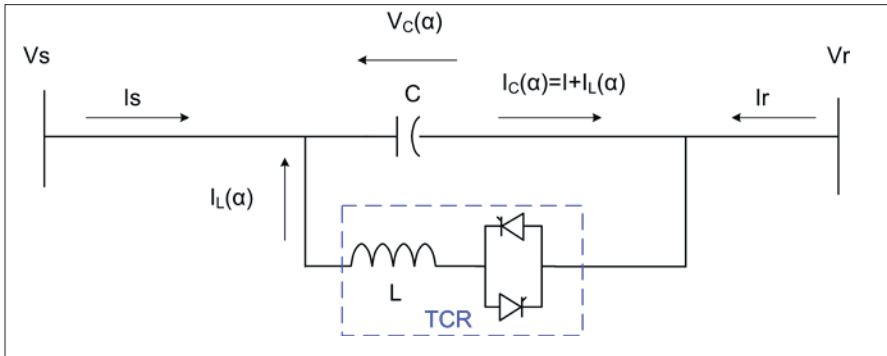


Figura 1. Modelo del TCSC

La corriente que pasa por el reactor “L” del TCR es controlada por medio del ángulo de disparo de los tiristores “ α ”. Para un ángulo de disparo entre $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ y asumiendo que la caída de voltaje en el inductor “ $V(t)$ ” es $V\cos\omega t$, la corriente en el inductor puede ser expresada como se muestra en la ecuación (1) [7]

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} V(t) dt = \frac{V}{\omega L} (\text{sen}\omega t - \text{sen}\alpha t) \quad (1)$$

Cuando la corriente “ $i(t)$ ” cruza por cero, el tiristor deja de conducir; por esta razón la ecuación (1) sólo es válida para el intervalo entre $\alpha \leq \omega t \leq \pi - \alpha$ [7].

La amplitud de la componente fundamental de la corriente, en función del ángulo de disparo, se expresa como se muestra en la ecuación (2):

$$i(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left(1 - \frac{2\pi}{\alpha} - \frac{1}{\pi} \text{sen}2\alpha \right) \quad (2)$$

Debido a la dependencia de la corriente con el ángulo de disparo, el modelo del TCR se puede representar como una susceptancia o reactancia variable controlada por el ángulo de disparo de los tiristores, como se muestra en las ecuaciones (3) y (4):

$$B(\alpha) = \frac{1}{\omega L} \left(1 - \frac{2\pi}{\alpha} - \frac{1}{\pi} \text{sen}2\alpha \right) \quad (3)$$

$$X(\alpha) = \omega L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \text{sen}\alpha} \quad (4)$$

donde

$$\omega L \leq X_L(\alpha) \leq \infty$$

En el estado estacionario, la impedancia del TCSC se puede modelar mediante un capacitor fijo “ X_c ”, en paralelo con una reactancia variable “ $X_L(\alpha)$ ” [2], como se muestra en la ecuación (5):

$$X_{TCSC} = \frac{-X_c X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_c} \quad (5)$$

En la ecuación (5) se puede apreciar que para un cierto ángulo de disparo, la reactancia inductiva variable iguala en magnitud a la reactancia capacitiva, y ocasiona resonancia. Para evitar este problema, el TCSC tiene límites en el ángulo de disparo en sus dos rangos de operación: rango capacitivo $\alpha_{Cmin} \leq \alpha \leq \pi/2$ y rango inductivo $0 \leq \alpha \leq \alpha_{Lmin}$ [2]. Teniendo en cuenta estos límites de operación, el modelo utilizado para representar el compensador TCSC es el modelo de susceptancia variable que se muestra en la figura 2:

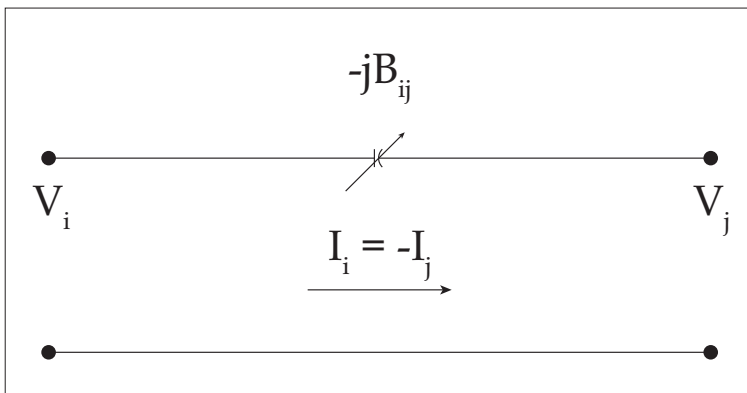


Figura 2. Modelo de susceptancia variable del TCSC

Modelo del SSSC. La estructura básica del SSSC consiste de una fuente de voltaje convertora de estado sólido, un dispositivo de almacenamiento de energía y un transformador de acople conectado en serie con la línea de transmisión; su diagrama esquemático se muestra en la figura 3.

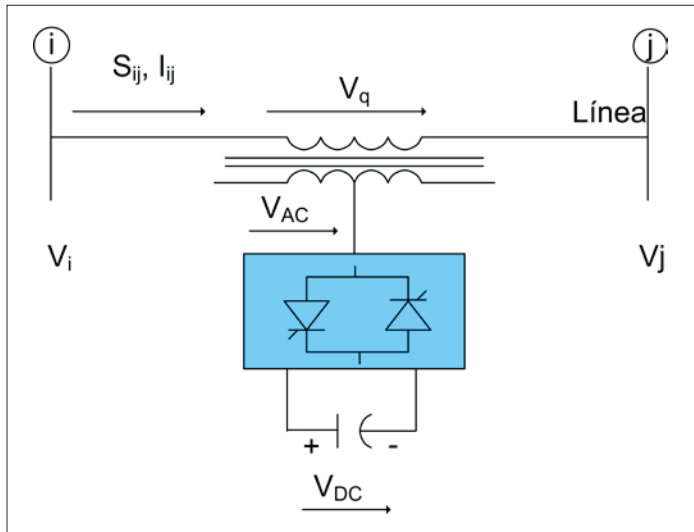


Figura3. Diagrama esquemático del SSSC

donde

- V_q : Voltaje inyectado por el SSSC
- V_i : Voltaje del nodo de envío
- V_j : Voltaje del nodo de recibo
- I_{ij} : Corriente de línea

El SSSC puede generar o absorber potencia reactiva del sistema y cuenta con un dispositivo de almacenamiento de energía. Cuando el SSSC sólo intercambia potencia reactiva, el desfase entre el voltaje inyectado y la corriente de la línea es -90° ; el efecto es capacitivo y se produce un incremento en la caída de voltaje en la línea de transmisión, lo cual resulta en un incremento de corriente y del flujo de potencia. No obstante, si el voltaje inyectado se encuentra desfasado $+90^\circ$ con respecto a la corriente de línea, se reduce la caída de voltaje en la línea de transmisión y el efecto es inductivo [8]. La compensación realizada por este dispositivo FACTS puede modelarse mediante una fuente de voltaje independiente de la corriente y conectada en serie con la línea de transmisión, como se muestra en figura 4.

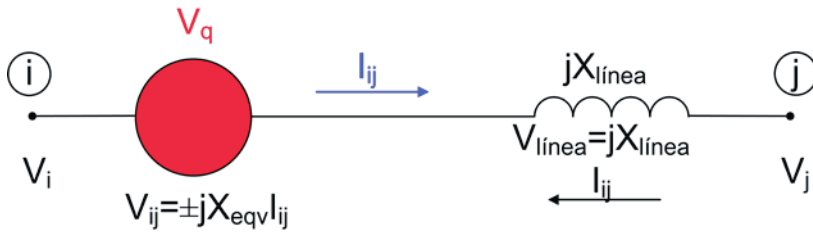


Figura 4. Modelo de fuente de voltaje del SSSC

El modelo de fuente de voltaje es utilizado para representar el SSSC. La expresión matemática que describe este modelo se muestra en la ecuación (6):

$$I_{ij} = \frac{V_i \pm V_q - V_j}{jX_{línea}} \quad (6)$$

Como se puede apreciar, la corriente depende del voltaje inyectado por el SSSC " V_q ". Entonces al controlar el voltaje inyectado se puede controlar la corriente y el flujo de potencia activa y reactiva. Para representar este efecto, en el programa de simulación NEPLAN se modela de acuerdo con su estructura básica de compensación, como se muestra en la figura 5.

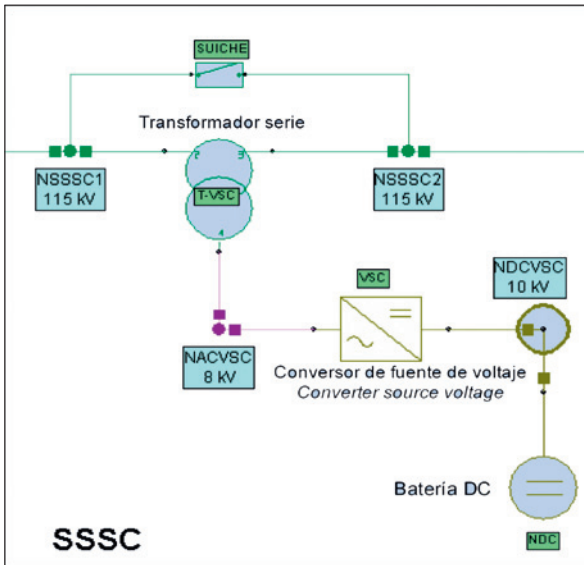


Figura 5. Modelo del SSSC

Con el modelo presentado en la figura 5 se puede simular el SSSC para controlar las siguientes variables: magnitud y ángulo del voltaje serie inyectado, magnitud del voltaje DC de la batería y el flujo de potencia activa y reactiva a través de la línea.

4. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el desarrollo del estudio del efecto de los TCSC y SSSC sobre la estabilidad de voltaje se ilustra en la figura 6.



Figura 6. Metodología

Selección del sistema de prueba y de la herramienta computacional

Sistema de prueba. El sistema de potencia de prueba elegido para el estudio fue el sistema IEEE300, por su complejidad en cargabilidad y la gran cantidad de nodos con que cuenta; este sistema de potencia es adecuado para los estudios de estabilidad de voltaje, debido a que cuenta con varias áreas, zonas y nodos críticos en la red [9].

La herramienta computacional seleccionada para la simulación es NEPLAN, ya que cumple con los siguientes requerimientos:

1. Contiene los modelos de los elementos del sistema de potencia, incluyendo modelos de dispositivos FACTS como el TCSC.
2. Contiene elementos para modelar dispositivos FACTS como el SSSC.
3. Permite realizar simulaciones de flujos de carga y de estabilidad de voltaje.
4. El módulo de estabilidad de voltaje suministra 4 enfoques para el análisis estático de estabilidad de voltaje en sistemas de potencia: análisis VQ (curvas VQ), análisis PV (curvas PV), análisis de sensibilidad VQ y análisis modal (valores propios).

Modelado del sistema en NEPLAN y verificación de su convergencia.

Para realizar los estudios de estabilidad y las simulaciones que comprueban los efectos de los compensadores se dibujó el diagrama del sistema de potencia de prueba IEEE300 en NEPLAN. Los parámetros de los elementos se convirtieron a valores reales y se ingresaron en esta herramienta computacional. La convergencia de este sistema se verificó mediante un flujo de carga, el cual se configuró con los siguientes parámetros:

| | | |
|--------------------------|---|--|
| Método de cálculo | : | Newton Raphson |
| Límites considerados | : | Voltaje nodal y potencia de generación |
| Límite de voltaje máximo | : | 106% del voltaje nominal |
| Límite de voltaje mínimo | : | 94% del voltaje nominal |
| Error de convergencia | : | 0,001 |

Sistemas de potencia de prueba con diferentes condiciones de operación

El estudio de la estabilidad de voltaje se realiza para diferentes condiciones de operación, por lo cual es necesario definir un sistema base y otros

modificados para simular los diferentes cambios de carga y los cambios en la configuración producidos por perturbaciones. Los sistemas seleccionados para estudiar los comportamientos de los FACTS son: sistema base, sistema con cargabilidad máxima, sistema con cargabilidad reducida y sistema con la contingencia crítica.

- *Sistema base.* El sistema de potencia original se modifica para que cumpla con las restricciones operativas; esto se logra mediante la regulación de voltaje empleando los cambiadores de TAP de los transformadores de potencia y el aumento de la generación y/o compensación en el sistema de potencia.

Este procedimiento de control de reactivos evita las violaciones de voltaje de los nodos del sistema y define una mejor condición de operación del sistema. Este sistema modificado que cumple con estas restricciones es definido en este trabajo como el *Sistema base*.

- *Sistema con cargabilidad máxima.* La cargabilidad máxima de un sistema de potencia se obtiene encontrando el punto de colapso de voltaje dado en las curvas PV [10]. Cuando el sistema opera en este punto de cargabilidad las cargas del sistema consumen la potencia máxima permitida y el sistema opera muy cerca del límite de estabilidad de voltaje. Esta condición de operación es definida en este trabajo como el *Sistema con cargabilidad máxima*.
- *Sistema con cargabilidad reducida.* El punto de cargabilidad reducida de un sistema de potencia se encuentra con un procedimiento contrario al punto de cargabilidad máxima [10]. La reducción de la cargabilidad del sistema permite realizar estudios de las condiciones de operación del sistema, ante las diferentes respuestas de los compensadores FACTS. Esta condición del sistema fue definida para los estudios de estabilidad de voltaje como el *sistema con cargabilidad reducida*.
- *Sistema con la contingencia crítica.* La selección de las contingencias es realizada con una herramienta computacional de sistemas de potencia llamada COORDCOMP, la cual forma parte de la tesis doctoral *Metodología para mejorar la estabilidad de voltaje mediante la coordinación de FACTS y compensadores suichados mecánicamente* [11]. La herramienta cuenta con

un módulo de selección de contingencias “contselec”, el cual simula contingencias N-1 y entrega las contingencias más críticas, definidas por la reducción del margen de estabilidad. Las contingencias críticas dadas por COORDCOMP son validadas en NEPLAN, simulando el flujo de carga y la estabilidad de voltaje. La contingencia que más reduzca el margen de estabilidad y presente el modo más débil se seleccionó como la contingencia más crítica y se nombró como *Sistema con la contingencia crítica*.

Ubicación de los dispositivos FACTS

A continuación se muestran los límites de compensación y el método propuesto para la ubicación de los dispositivos FACTS en el sistema base. Estos límites de compensación son definidos de acuerdo con un estudio de ubicación de compensadores de reactivos realizado en este trabajo, para mejorar la estabilidad de voltaje. [12]-[14]. Los parámetros para realizar la ubicación de compensadores fueron definidos como se muestra a continuación:

1. Número máximo de dispositivos FACTS serie : 10
2. Compensación máxima de la impedancia de la línea con FACTS serie: 20%
3. Número máximo de dispositivos FACTS paralelo : 15
4. Potencia máxima total de compensación con FACTS paralelo: 1000 MVARs
5. Potencia de compensación de cada dispositivo FACTS paralelo: potencia mínima que produce un voltaje objetivo del 100%, en el nodo compensado.

El método de ubicación propuesto en este trabajo utiliza el análisis modal y los factores de participación para definir los elementos del sistema que más influyen en la inestabilidad de voltaje. Estos elementos son los que se compensan con dispositivos FACTS.

De la revisión bibliográfica realizada sobre la ubicación de FACTS se tomó la estructura básica común a todas. Luego, mediante diferentes simulaciones, se realizaron modificaciones, y se obtuvieron mejores resultados. Finalmente, el método definido en este trabajo consta de los siguientes pasos: [10]

1. Se inicia con una condición inicial de operación del sistema que cumpla las restricciones de voltaje.
2. Se determina el punto de cargabilidad máxima del sistema y el sistema se pone a operar en este valor.

3. Se ubican los FACTS serie y paralelo de forma alternada, utilizando los resultados de los factores de participación de nodo y de rama.
4. La ubicación termina cuando se alcanzan los límites de compensación de reactivos.

Análisis de estabilidad de voltaje

La comparación del efecto de los FACTS serie sobre la estabilidad de voltaje se realizó mediante los siguientes análisis:

1. Análisis de estabilidad de voltaje para cada condición del sistema sin FACTS.
2. Análisis de estabilidad de voltaje para cada condición del sistema con FACTS

Las técnicas de la estabilidad de voltaje utilizadas en este estudio fueron el análisis modal y las curvas PV. Estos análisis se ejecutaron sobre cada operación extrema del sistema. Las simulaciones realizadas fueron:

1. Curvas PV y análisis modal del sistema de potencia para cada sistema estudiado.
2. Curvas PV y análisis modal del sistema con FACTS serie y FACTS paralelo (SVC), para cada sistema estudiado.
3. Curvas PV y análisis modal del sistema con los FACTS serie seleccionados ubicados en las líneas más adecuadas para mejorar la estabilidad.

Estas tres simulaciones se realizaron para comparar la operación de las diferentes condiciones del sistema que se iba a estudiar y para establecer la más crítica. También se puede observar el efecto de los FACTS sobre la estabilidad de voltaje y comparar el efecto por funcionamiento de los FACTS serie seleccionados (TCSC y SSSC) ante las diferentes condiciones de operación del sistema de potencia.

Tabla comparativa

La tabla comparativa es el resultado de este trabajo. Los índices de comparación utilizados son el margen de estabilidad y el valor propio crítico.

5. RESULTADOS

La metodología explicada anteriormente es aplicada al sistema de prueba IEEE300 con el fin de validarla y determinar los efectos de cada compensador FACTS sobre la estabilidad de voltaje. Los ajustes realizados al sistema de potencia para obtener las respuestas se describen a continuación.

Sistema base. Los cambios realizados para cumplir las restricciones operativas del sistema base fueron los siguientes: regulación con los TAPS de los transformadores, adición de un compensador fijo paralelo de 270 MVAR en el nodo 118 e incremento de la generación en los generadores G56 y G63 en 75 MW y 70 MW respectivamente.

Contingencia crítica. Se realizó un estudio de contingencias N-1 para el sistema de potencia de prueba base y se seleccionó la contingencia más crítica para la estabilidad de voltaje, y dio como resultado la desconexión del generador ubicado en el nodo 63, ya que coloca en riesgo la operación del sistema con la reducción del margen de estabilidad y presenta el valor propio más cercano a cero.

Ubicación. La ubicación de los dispositivos FACTS instalados en el sistema IEEE300 se indica en la referencia [10]. Esta ubicación se utiliza para determinar la respuesta de los compensadores FACTS ante los diferentes sistemas con variación en la cargabilidad y la configuración. Para la ubicación se usaron dos métodos basados en la utilización de factores de participación de ramas y nodos, con el fin de seleccionar la mejor forma de compensar reactivos al sistema de potencia.

Condiciones de operación. Corresponde al punto de operación definido para cada sistema de estudio de cargabilidad, como se muestra en la figura 7. La carga se incrementa en todos los nodos del sistema de potencia con el fin de representar la variación del conjunto de cargas que llevan rápidamente la operación del sistema a la inestabilidad y dan una condición de aumento de carga crítica. Variaciones de carga de un menor número de nodos generarían curvas de variación de voltaje más alargadas a la representada en la figura 7, que son menos críticas, ya que existiría un mayor margen de operación del sistema y un límite de estabilidad más alejado.

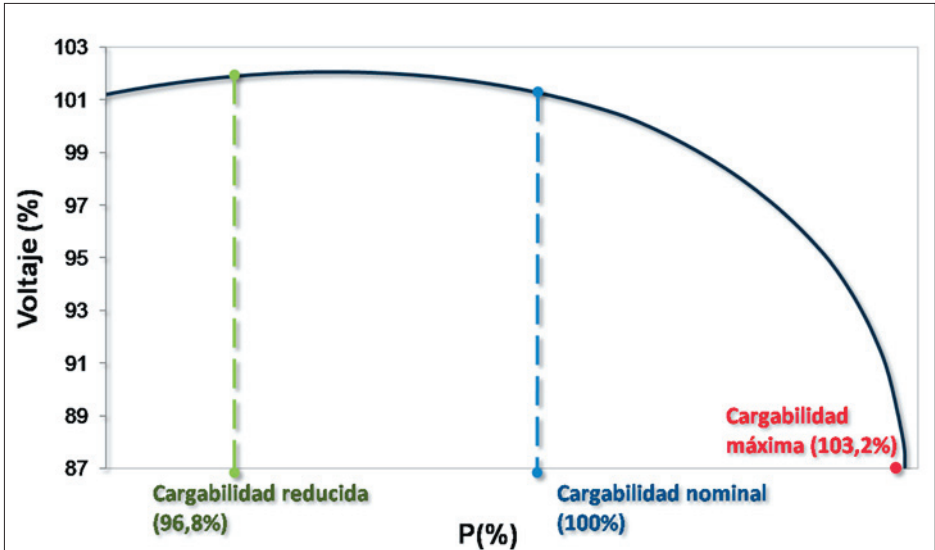


Figura 7. Puntos de operación en la curva PV, nodo 37

La cargabilidad máxima del sistema IEEE 300 se obtuvo para un incremento de la potencia de carga en todos los nodos igual al 3.2%, su valor nominal y la cargabilidad reducida se definió como el valor negativo de reducción igual al 3.2%. Para cada uno de estas cargabilidades se realizó el análisis modal, y se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 8.

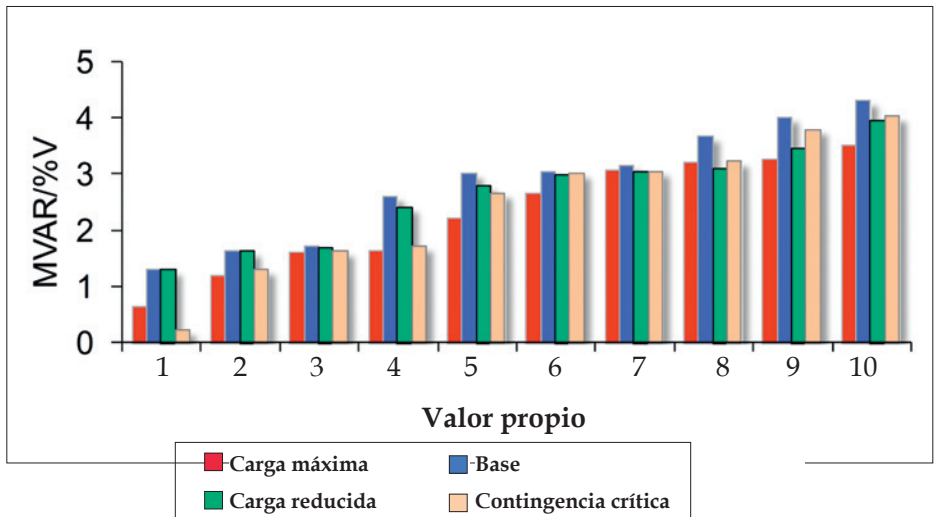


Figura 8. Valores propios

Para cada sistema de potencia estudiado se obtuvo las curvas PV que representan las variaciones de voltaje ante los aumentos de la carga, con el fin de representar los márgenes de operación, como se muestra en la figura 9.

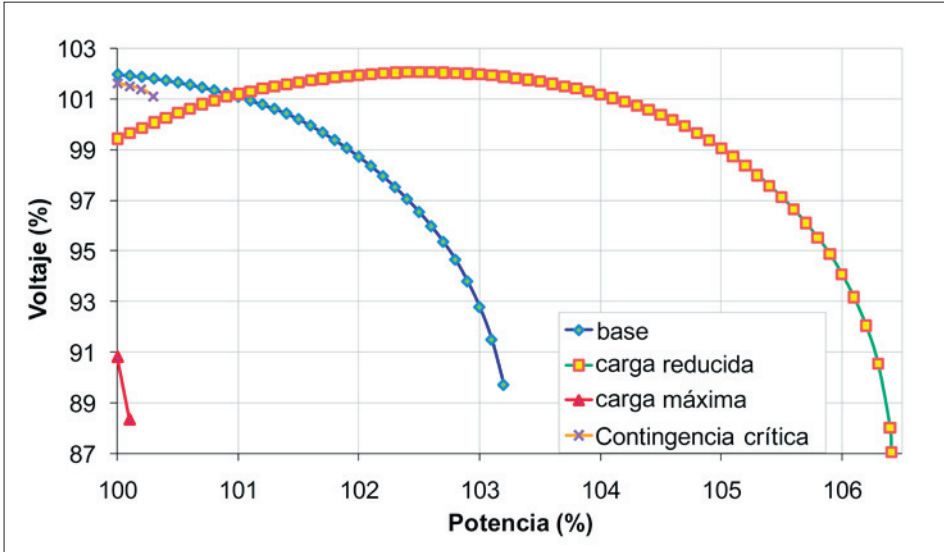


Figura 9. Curvas PV - nodo 37

En la figura 8 se puede apreciar que el sistema permanece estable para las cuatro condiciones de operación, puesto que todos los valores propios son positivos. Sin embargo, el sistema tiende a ser inestable cuando opera en las condiciones de cargabilidad máxima y de contingencia crítica. En la condición de cargabilidad máxima se presenta la condición de operación más crítica, debido a que se obtiene un modo débil, identificado por el valor propio cercano a cero, y que además se obtiene el margen de estabilidad de voltaje más pequeño, como se mostró en la figura 9.

Análisis de estabilidad de voltaje. Este tipo de análisis se realiza para todos los sistemas de estudio, con el fin de conocer las diferentes respuestas del sistema ante distintas condiciones de operación. En las figuras 10 y 11 se muestran los resultados para la condición de operación más crítica (cargabilidad máxima) antes y después de la inclusión de los FACTS.

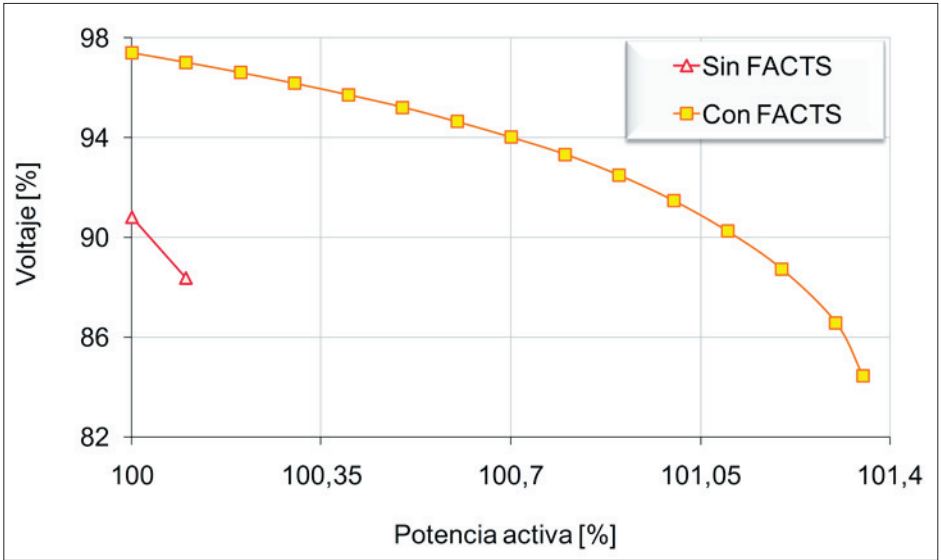


Figura 10. Curvas PV sin FACTS y con FACTS, nodo 37

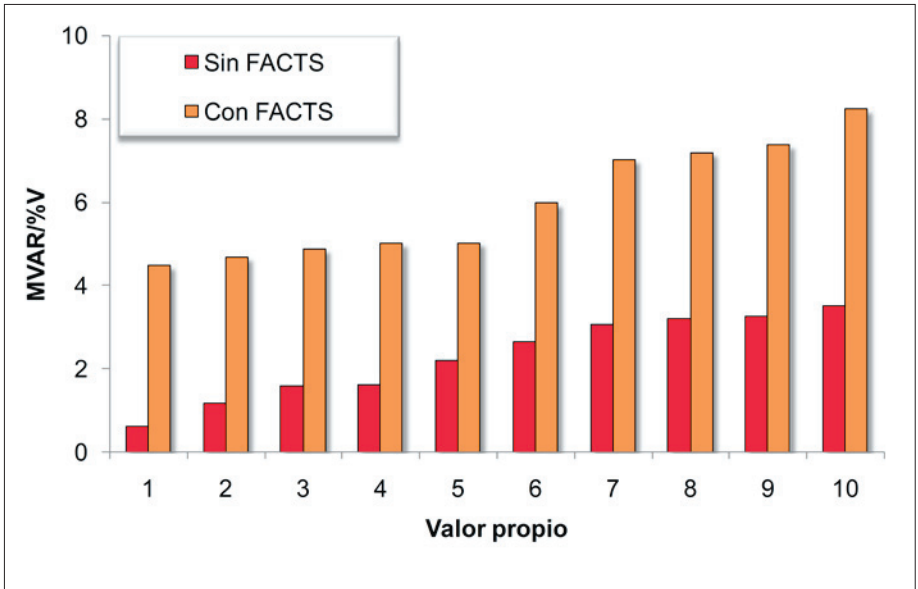


Figura 11. Análisis modal sin FACTS y con FACTS

Los resultados obtenidos para los sistemas: base, de cargabilidad reducida y de contingencia crítica, fueron semejantes [10]. Estos resultados muestran claramente el aumento del margen de estabilidad de voltaje y del valor propio cuando se utilizan los dispositivos FACTS serie y paralelo en el sistema.

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para el sistema de cargabilidad máxima utilizando FACTS serie ubicados en diferentes sitios. El TCSC fue configurado para mantener constante la reactancia de la línea y el SSSC fue configurado para mantener constante la caída de voltaje en la línea, inyectar potencia activa al sistema y mantener constante el flujo de potencia activa y reactiva en la línea.

Tabla 1. Resultados con FACTS serie – cargabilidad máxima

| FACTS serie | | Sólo ubicación 1 | Sólo ubicación 2 | Sólo ubicación 3 | Al tiempo 1, 2 y 3 |
|------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|
| Sin FACTS | Valor propio (MVAR/%V) | 0,6147 | 0,6147 | 0,6147 | 0,6147 |
| | Margen Estabilidad (%) | 0,1000 | 0,1000 | 0,1000 | 0,1000 |
| TCSC (x=const) | Valor propio (MVAR/%V) | 0,8134 | 0,7452 | 0,6585 | 0,9063 |
| | Margen Estabilidad (%) | 0,5600 | 0,2500 | 0,1000 | 0,8000 |
| SSSC (Vs=const) | Valor propio (MVAR/%V) | 0,8065 | 0,7433 | 0,6531 | 0,8918 |
| | Margen Estabilidad (%) | 0,4200 | 0,2700 | 0,1300 | 0,5100 |
| SSSC (P inyec.) | Valor propio (MVAR/%V) | 0,8865 | 0,7643 | 0,6791 | 0,9230 |
| | Margen Estabilidad (%) | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| SSSC (P,Q=const) | Valor propio (MVAR/%V) | 0,4014 | 0,7150 | 0,5217 | 0,5401 |
| | Margen Estabilidad (%) | 0,0000 | 0,1700 | 0,0010 | 0,0600 |

La ubicación de los dispositivos FACTS se realizó con un método basado en la aplicación de la técnica del análisis modal utilizando los resultados de los factores de participación del valor propio crítico. Este método alterna en la instalación de FACTS serie y paralelo, y garantiza que siempre se instale el compensador en el elemento del sistema con el factor de participación más alto.

Comparación de resultados. La comparación de los FACTS serie TCSC y SSSC se realiza para los diferentes sistemas de estudio: base, cargabilidad máxima, cargabilidad reducida y contingencia crítica; los resultados se ilustran en la tabla 2. Los índices de comparación se realizan con el margen de estabilidad y el valor propio; estos índices califican el desempeño de cada dispositivo FACTS como:

1. Disminución el margen de estabilidad o el valor propio
2. No se produce cambio del margen de estabilidad o el valor propio
3. Incremento del margen de estabilidad o el valor propio
4. Mayor incremento del margen de estabilidad o el valor propio
5. Mayor efectividad para mejorar el margen de estabilidad o el valor propio

Tabla 2. Tabla comparativa de resultados

| Sistemas de Estudio | Cargabilidad máxima | | Base | | Cargabilidad reducida | | Contingencia crítica G63 | | General | |
|-----------------------------|---------------------|--------------|--------|--------------|-----------------------|--------------|--------------------------|--------------|---------|--------------|
| | Margen | Valor propio | Margen | Valor propio | Margen | Valor propio | Margen | Valor propio | Margen | Valor propio |
| TCSC | 5 | 4 | 5 | 3 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 |
| SSSC (voltaje serie) | 4 | 3 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| SSSC (inyección potencia P) | 1 | 5 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 1 | 4 |
| SSSC (control potencia PQ) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 2 |

El margen de estabilidad dado en la curva PV indica la inestabilidad de voltaje del sistema debido al incremento de potencia activa. El valor propio crítico indica la inestabilidad de voltaje por deficiencia de potencia reactiva; esto da a entender que el sistema puede ser inestable por voltaje por efectos del aumento de la potencia activa o reactiva en las cargas.

Se observa que cuando el dispositivo TCSC controla la reactancia de la línea de transmisión tiene mayor efectividad para mejorar la estabilidad de voltaje de estado estacionario, debido a que aumenta mucho más el margen de estabilidad y los valores propios del sistema de potencia.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se determinó el efecto de los FACTS serie sobre la estabilidad de voltaje y se realizó un análisis de la estabilidad de voltaje para el sistema de potencia IEEE300 nodos, bajo diferentes condiciones de operación del sistema de potencia y para la instalación de dispositivos FACTS en diferentes partes del sistema. De los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- Cuando el dispositivo SSSC opera manteniendo un flujo de potencia constante en la línea de transmisión reduce la estabilidad de voltaje para todos los estudios de cargabilidad considerados. No se recomienda utilizar este dispositivo en un sistema de potencia de cargabilidad alta como el IEEE300 si sólo se pretende mejorar la estabilidad de voltaje de estado estacionario.
- Cuando el dispositivo SSSC opera inyectando potencia activa en la línea de transmisión aumenta el valor propio crítico en condiciones de aumento de carga y en presencia de contingencias. Sin embargo, reduce el margen de estabilidad de voltaje; por esta razón no es recomendable utilizar este dispositivo en este modo de operación para mejorar la estabilidad de voltaje de estado estacionario de un sistema de potencia como el IEEE300.
- Cuando los dispositivos SSSC y TCSC operan manteniendo un voltaje serie constante en la línea de transmisión mejoran el margen de estabilidad y el valor propio crítico en el sistema. Estos dispositivos pueden ser utilizados para mejorar la estabilidad de voltaje, en cualquier condición

de operación del sistema de potencia. Su mayor efecto se produce cuando se reduce la carga del sistema, debido a que hay un menor flujo de corriente y, por lo tanto, hay mayor compensación en la impedancia de la línea porque el voltaje se mantiene constante.

Los resultados mostraron el impacto que genera la instalación de un dispositivo FACTS serie en un sistema de potencia complejo como el IEEE300. Los efectos de estos resultados dependen principalmente de la ubicación del dispositivo FACTS, la cargabilidad del sistema y el tipo de contingencia presentada en el sistema de potencia.

Referencias

- [1] P. Kundur, *Power system stability and control*, EPRI. NY: McGraw-Hill, 1994, pp. 120-236.
- [2] N. G. Hingorani, *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible transmission systems*. Piscataway, NJ: Wiley - IEEE, 1999, pp. 2-29, 226, 261-262.
- [3] C. Taylor, *Power system voltage stability*, EPRI, McGraw-Hill, 1994, pp. 27-41.
- [4] J. Melo, *Metodologías de estudio de la estabilidad de voltaje*. Cali: Universidad del Valle, Grupo de Investigación en Alta Tensión, pp. 12-28, 2006.
- [5] P. Kundur, B. Gao and G. K. Morison, "Practical application of modal analysis for increasing voltage stability margins," in *Proceeding Power Tech*, Athens (Grecia), 1993, pp. 22-227.
- [6] C. Silva, R. Braegger, S. Silva, "FACTS e a estabilidade", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto-FEUP, pp. 10-12, May, 2005. [on line]. Available: <http://paginas.fe.up.pt/~fmb/DESE>
- [7] A. Vargas, "Metodologías para el control de dispositivos FACTS en sistemas eléctricos de potencia". Tesis de grado, Magíster en sistemas de generación de energía eléctrica, Universidad del Valle, Grupo de Investigación en Alta Tensión. Cali (Colombia), pp. 31-77, 2004.
- [8] J. Lozano, "Compensador estático serie para el mejoramiento de la calidad de energía en redes eléctricas". Tesis de grado, Maestro en ciencias ingeniería eléctrica. CINVESTAV, p. 51, abril, 2006.
- [9] University of Washington, College of Engineering, Electrical Engineering, 300 Bus Power Flow Test Case, Power Systems Test Case Archive. Seattle WA: University of Washington, IEEE, 1999. Available: http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf300/pg_tca300bus.htm.
- [10] L. H. Ramírez y D. Burbano, "Efecto de los FACTS serie en el mejoramiento de la estabilidad de voltaje". Tesis de grado, Ingeniería eléctrica, Universidad del Valle, Grupo de Investigación en Alta Tensión. Cali (Colombia), 2008.

- [11] J. E. Candelo, "Metodología para mejorar la estabilidad de voltaje mediante la coordinación de FACTS". Tesis de grado, Doctorado en ingeniería eléctrica, Universidad del Valle, Grupo de Investigación en Alta Tensión. Cali (Colombia), 2008.
- [12] Y. Mansour, W. Xu, F. Alvarado and C. Rinzin, "SVC placement using critical modes of voltage instability," *IEEE transactions on power systems*, Vol. 9, N°2, pp. 757-763, May, 1994.
- [13] S. Granville and C. M. Abib, "Application of decomposition techniques to var planning: methodological & computational aspects." *IEEE transactions on power systems*, vol. 9, N° 4, noviembre, 1994.
- [14] S. Gerbex, R. Cherkaoui and J. A. Germond, "Optimal location of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms." *IEEE transactions on power systems*, vol. 16, N° 3, Aug., 2001.