

Ubicación de FACTS para mejorar la estabilidad de tensión

FACTS location to improve voltage stability

Henry Mauricio Rodríguez*

Gladys Caicedo Delgado**

Universidad del Valle (Colombia)

John Edwin Candelo Becerra***

Universidad del Norte (Colombia)

*Ingeniero Electricista, Universidad del Valle, Cali (Colombia). Actualmente es asistente de ingeniería en la Empresa Tableros Eléctricos S.A. hemaurod@hotmail.com

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

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

Correspondencia: Km 5 Vía Puerto Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bloque A Segundo Piso, Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia), Teléfono: (57)(5)3509509 Ext 4270.

Resumen

En este artículo se presenta una comparación de la respuesta de compensadores FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) ante diferentes condiciones de operación, ubicados por medio de métodos de análisis estáticos para el mejoramiento de la estabilidad de tensión en estado estacionario. El desarrollo de la investigación se dividió en tres etapas: la primera de modelado y estudio de la operación inicial del sistema de potencia; la segunda de ubicación de compensadores FACTS con técnicas como el análisis modal, sensibilidad e índice de flujo de línea; y la tercera de simulaciones para conocer las respuestas de los compensadores ante condiciones de operación inicial, carga máxima y contingencia crítica. La comparación de la efectividad de la compensación se realizó en el sistema de prueba IEEE 39, utilizando análisis modal, márgenes de estabilidad y curvas PV. Como resultado se estableció que para la operación inicial y carga máxima, los cuatro métodos de ubicación compensan adecuadamente y presentan un mejoramiento de estabilidad con pequeñas diferencias, pero para la contingencia crítica hay una mejor respuesta de los compensadores ubicados por medio de la técnica del índice de flujo de línea (LFI), siendo de gran importancia la capacidad de compensación de reactivos.

Palabras Clave: Análisis de sensibilidad, análisis modal, dispositivos FACTS, estabilidad de tensión, índice de flujo de línea, sistema de potencia.

Abstract

This article presents a comparison of the response of FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) at different operating conditions, located by means of static analysis methods to improve steady-state voltage stability. The development of this research was divided into three stages: the first one to model and study the initial operation of the power system, the second one to locate FACTS with techniques such as modal analysis, sensitivity and line flow index, and the third one to simulate the response of compensators during the initial condition, maximum load, and critical contingency. The comparison of the effectiveness of compensation was performed in the IEEE 39-bus power system case using modal analysis, stability margins, and PV curves. The results showed that for the initial operation and maximum load, the four location methods improved stability with slight differences, but for the critical contingency the response of compensators is better when they are located using the line flow index (LFI), being of great importance the capacity of reactive compensation.

Keywords: FACTS devices, line flow index, modal analysis, power system, sensitivity analysis, voltage stability.

Fecha de recepción: 23 de noviembre de 2011
Fecha de aceptación: 7 de febrero de 2012

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento continuo de los sistemas de potencia hace que se requiera identificar constantemente los riesgos de llegar a una inestabilidad durante la operación del sistema. La estabilidad de tensión está directamente relacionada con la disminución de la potencia reactiva [1] y debe garantizarse que todos los nodos del sistema se encuentran alejados de los límites de máxima entrega de reactivos.

Hoy en día existen nuevas técnicas para el control de la potencia reactiva y el mejoramiento de la estabilidad de tensión, una de ellas es la utilización de dispositivos FACTS [2]. Aunque surge como una solución al problema de suministro de potencia reactiva, en ocasiones resulta de gran complejidad determinar la mejor ubicación, la capacidad y los tipos de compensadores que se deben instalar en un sistema de potencia.

Algunas ubicaciones de compensadores de reactivos han sido propuestas para solucionar problemas de estabilidad de tensión [3], [4]; pero su comparación no ha sido realizada para diferentes condiciones de operación. Por lo tanto, este artículo se enfoca en mostrar la efectividad de la ubicación de compensadores FACTS para mejorar la estabilidad de tensión ante las condiciones de operación inicial, carga máxima o contingencia crítica, la cual permita una identificación de las diferencias de compensación y selección de las técnicas más apropiadas para la operación de la red.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo de la investigación se realizó en tres etapas: la primera para el modelado y el estudio inicial, la segunda para la ubicación de compensadores FACTS, y la tercera para las simulaciones y comparaciones de las respuestas de los compensadores. A continuación se describe en detalle cada etapa y se definen los parámetros utilizados para el estudio comparativo de la respuesta de compensadores de reactivos.

Modelado y estudio inicial

En esta etapa se seleccionó el sistema de potencia de prueba IEEE 39 mostrado en la figura 1, el cual cuenta con 39 nodos, 46 ramas, 10 generadores,

12 transformadores y 12 nodos de carga. Su base es de 100 MVA, su carga total es de 6150 MW y 1409 MVAR, su generación de potencia activa total es de 7665,6 MW y su capacidad de entrega de reactivos varía entre -2870 MVAR y 2870 MVAR.

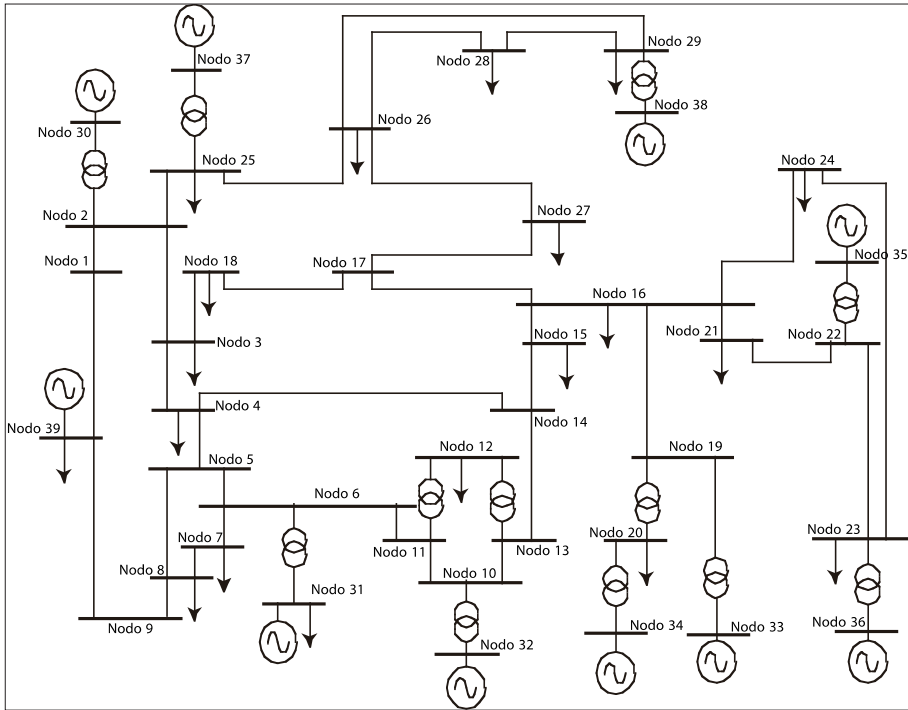


Figura 1.

Diagrama del sistema de potencia IEEE 39

Los modelos implementados para las simulaciones corresponden a los utilizados comúnmente para un análisis estático o de flujo de carga [1]. Los FACTS implementados para la comparación fueron los TCSC (*capacitor serie controlado por tiristor*) y los SVC (*compensador de Vares estático*), debido a que comúnmente se utilizan para las soluciones de estabilidad de tensión [5].

El TCSC se compone de un capacitor de valor fijo en paralelo con un inductor controlado por tiristores (TCR) [2]. Tiene cuatro modos operativos que se ajustan según las necesidades de la red, tales como inductivo, capacitivo, bypass y bloqueo. La impedancia equivalente del TCSC puede expresarse como en la ecuación (1) [6], [7]:

$$X_t(\alpha) = \frac{X_L * X_C}{\frac{X_C}{\pi} * (2 * (\pi - \alpha) + \text{sen} 2\alpha) - X_L} \quad (1)$$

Donde:

X_t : Impedancia del TCSC

X_L : Impedancia inductiva del dispositivo

X_C : Impedancia capacitiva del dispositivo

α : Ángulo o pulso de disparo que se le da al TCR

La reactancia inductiva variable del TCR puede igualar en magnitud a la reactancia capacitiva, ocasionando resonancia. Para evitar este problema el TCSC tiene límites en el ángulo de disparo en sus dos rangos de operación: rango capacitivo $\alpha_{\text{Cmin}} \leq \alpha \leq \pi/2$ y rango inductivo $0 \leq \alpha \leq \alpha$. El compensador opera dentro de los límites de reactancia máximo y mínimo, expresados por la ecuación (2) [5], [7].

$$X_{\text{TCSC-}l}^{\text{min}} \leq X_{\text{TCSC-}l} \leq X_{\text{TCSC-}l}^{\text{max}} \quad (2)$$

Donde:

$X_{\text{TCSC-}l}$: Valor de la reactancia equivalente del TCSC ubicado en la rama l .

$X_{\text{TCSC-}l}^{\text{max}}$: Valor máximo de la reactancia equivalente del TCSC ubicado en la rama l .

$X_{\text{TCSC-}l}^{\text{min}}$: Valor mínimo de la reactancia equivalente del TCSC ubicado en la rama l .

l : Número de la rama.

El SVC consta de un grupo de condensadores conmutados por tiristores (TSC), en conjunto con un grupo de bobinas conmutadas por tiristores (TSR) o controladas por tiristores (TCR) [2], [8]. El modelo para el SVC se expresa mediante la ecuación (3) [6], [7].

$$B_{\text{SVC}} = \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L * \pi} [(2(\pi - \alpha) + \text{sen } 2\alpha)] \quad (3)$$

Donde:

B_{SVC} : Susceptancia equivalente del compensador SVC.

X_L : Reactancia inductiva del compensador de reactivos.

X_C : Reactancia capacitiva del compensador de reactivos.

α : Ángulo de disparo de los tiristores.

El compensador de reactivos SVC puede variar su susceptancia entre los valores máximo y mínimo, como se indica en la ecuación (4).

$$B_{SVCi}^{\min} \leq B_{SVCi} \leq B_{SVCi}^{\max} \quad (4)$$

Donde:

B_{SVCi} : Susceptancia equivalente del SVC ubicado en el nodo i .

B_{SVCi}^{\max} : Susceptancia máxima del SVC ubicado en el nodo i .

B_{SVCi}^{\min} : Susceptancia mínima del SVC ubicado en el nodo i .

i : Número de nodo

Este dispositivo se utiliza para controlar la tensión del nodo de conexión, inyectando la potencia reactiva necesaria para alcanzar la tensión objetivo ajustada " V_{obj} ". Los tiristores se disparan y controlan la tensión del nodo, hasta que el compensador alcanza los límites de susceptancia mostrados anteriormente. Cuando se alcanzan los límites, el compensador suministra potencia reactiva fija y su cantidad de inyección depende de la tensión del nodo [2]. Estos modelos son utilizados para la compensación de potencia reactiva del sistema y por esta razón se determinará la ubicación y capacidad de cada uno de los compensadores de reactivos.

Ubicación de compensadores FACTS

Para realizar una ubicación de compensadores de reactivos, se deben definir inicialmente los criterios de compensación que serán utilizados para establecer la cantidad y capacidad de los elementos a instalar; luego se deben definir las técnicas de análisis de estabilidad de tensión a utilizar; y finalmente el procedimiento para la ubicación adecuada.

Criterios de compensación

Para definir una ubicación y comparar la respuesta ante diferentes condiciones de operación ha sido necesario utilizar los siguientes criterios de compensación de reactivos: máximo 10 dispositivos FACTS conectados en serie y con una compensación no mayor al 20% de la impedancia de la línea [4], [9] y máxima compensación en paralelo de 300 MVAR. De acuerdo con los procedimientos encontrados en la literatura, la ubicación se realiza para una condición de operación del sistema; en esta investigación se tomó como base la ubicación de compensadores en el punto de operación de carga máxima y se determinaron los nodos y líneas a compensar mediante técnicas de análisis de sensibilidad, análisis modal e índices de flujo de línea.

Técnicas de análisis de estabilidad

- *Análisis de sensibilidad:* se basa en el estudio de las variaciones de la tensión con respecto a la inyección de potencia reactiva de los nodos de carga, lo cual ayuda a identificar los puntos más sensibles del sistema. La ecuación (5) muestra la forma de representar estas variaciones de tensión con respecto al cambio de potencia reactiva.

$$\Delta V = J_R^{-1} * \Delta Q \quad (5)$$

Donde:

ΔV : Cambio incremental en la magnitud de la tensión del nodo (vector).

ΔQ : Cambio incremental en la inyección de potencia reactiva en el nodo (vector).

J_R : Matriz Jacobiana reducida.

Los elementos de la matriz Jacobiana reducida inversa J_R^{-1} se conocen como sensibilidades V-Q. Los elementos de la diagonal de esta matriz son las auto-sensibilidades $\delta V_i / \delta Q_i$ y los elementos fuera de la diagonal son las sensibilidades mutuas $\delta V_k / \delta Q_i$ [1]. Un valor de sensibilidad positiva, indica estabilidad y entre menor sea su magnitud más alejado se encuentra de los límites; el valor se incrementa a medida que se acerca al límite de estabilidad y llega a ser infinito en el punto crítico [1]. Cuando el valor de la sensibilidad es negativo, indica que la inyección de potencia reactiva

reduce la tensión y el sistema se vuelve no controlable [1]. Esta técnica de análisis de la estabilidad se utiliza para ubicar compensadores FACTS, porque ayuda a identificar nodos y zonas críticas que requieren mayor inyección de reactivos. En este trabajo se ha utilizado este índice para la ubicación de compensadores y el estudio de las respuestas ante diferentes condiciones de operación.

• *Análisis modal*: es una técnica que usa la información de los valores y vectores propios de la matriz Jacobiana reducida inversa, para identificar los modos de operación del sistema. En la ecuación (6) se muestra un análisis de sensibilidad de tensión con respecto a la potencia reactiva para el modo k , teniendo en cuenta que las magnitudes de los valores propios proveen una medida relativa de proximidad a la inestabilidad y los vectores propios proveen información relacionada con los factores que contribuyen a la inestabilidad como los nodos y las áreas críticas del sistema [1].

$$\Delta V = \sum_k \frac{\xi_k \eta_k}{\lambda_k} \cdot \Delta Q \quad (6)$$

Donde:

ξ : Vector propio derecho de la matriz Jacobiana reducida.

η : Vector propio izquierdo de la matriz Jacobiana reducida.

λ : Valor propio de la matriz Jacobiana reducida.

k : Modo de operación del sistema.

Si todos los valores propios son positivos, esto indica que el sistema tiene estabilidad de tensión y entre menor sea su magnitud más cerca se encuentra de la inestabilidad. Si al menos uno de los valores propios es igual a cero, esto indica que la estabilidad de tensión del sistema se encuentra en un punto crítico. Si al menos uno de los valores propios es negativo, esto indica que el sistema ha pasado el punto crítico de estabilidad de tensión [1].

El análisis modal es útil para identificar las áreas críticas de estabilidad de tensión y los elementos de mayor influencia en cada modo; esto se realiza por medio del factor de participación de nodos y ramas del sistema de potencia.

En la ecuación (7) se define el factor de participación de los nodos del sistema para el modo k [1]. Este factor ayuda a identificar los nodos del sistema que contribuyen a la estabilidad de tensión en el modo de operación.

$$P_{ki} = \xi_k \eta_k \quad (7)$$

Donde:

P_{ki} : Factor de participación del nodo i en el modo k .

El factor de participación de ramas se representa mediante la ecuación (8) [1]. Este factor representa la participación de cada rama de la red en las pérdidas reactivas del sistema para el modo k , lo cual se relaciona con las ramas que consumen más potencia reactiva o son más débiles ante un cambio incremental en la carga reactiva. El término del numerador ($\Delta Q_{\text{pérdidas-rama } l}$) corresponde a las pérdidas que se producen en la rama l y el término del denominador ($\Delta Q_{\text{pérdidas-ramas}}$) las pérdidas de todas las ramas de la red.

$$P_{kl} = \frac{\Delta Q_{\text{pérdidas-rama } l}}{\max \Delta Q_{\text{pérdidas-ramas}}} \quad (8)$$

P_{kl} : Factor de participación de la rama l en el modo k .

La técnica de análisis de sensibilidad se utiliza para ubicar compensadores FACTS, porque ayuda a identificar nodos que requieren mayor inyección de reactivos. En este trabajo de investigación se estudian las respuestas de los compensadores ante diferentes condiciones de operación.

- *Índices de flujo de línea:* en esta técnica, el flujo de potencia a través de una línea de transmisión es examinado desde ambas direcciones, es decir, el flujo de potencia desde el nodo de envío (nodo i) al nodo de recibo (nodo j) y viceversa [4]. Para el sistema de potencia de dos nodos mostrado en la figura 2, sea R_{ij} y X_{ij} la resistencia y la reactancia de la línea que une los nodos i y j , P_i y Q_i representan la potencia activa y reactiva que fluye desde el nodo i . P_j y Q_j representan la potencia activa y reactiva que entra al nodo j .

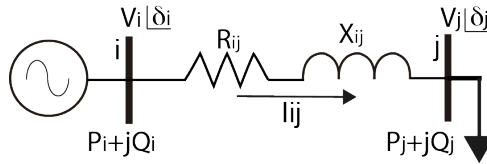


Figura 2.
Sistema de potencia de dos nodos

La potencia activa P_j que entra al nodo de recibo está dada por la ecuación (9) [4].

$$P_j = P_i - \frac{R_{ij} (P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} \quad (9)$$

Donde:

P_i : Potencia activa que fluye desde el nodo i.

Q_i : Potencia reactiva que fluye desde el nodo i.

R_{ij} : Resistencia de la línea que une los nodos i y j.

V_i : Tensión del nodo i.

Reacomodando la ecuación (9) e igualándola a cero, queda la expresión mostrada en la ecuación (10).

$$\frac{R_{ij}}{V_i^2} * P_i^2 - P_i + P_j + \frac{R_{ij}}{V_i^2} * Q_i^2 = 0 \quad (10)$$

De la ecuación (10) se pueden obtener las raíces P_i , mediante la ecuación (11).

$$P_i = \frac{V_i^2 \pm \sqrt{-(4 * R_{ij}^2 * Q_i^2 + 4 * P_j * V_i^2 * R_{ij} - V_i^4)}}{2 * R_{ij}} \quad (11)$$

Debido a que P_i debe tener un valor real, se debe satisfacer el término dentro de la raíz para que sea mayor que cero y queda representado como en la ecuación (12) [4].

$$1 - 4 * \frac{R_{ij}}{V_i^2} \left(P_j + \frac{R_{ij}}{V_i^2} * Q_i^2 \right) \geq 0 \quad (12)$$

Esta expresión resulta siendo el índice de flujo de línea para la potencia activa, vista desde el nodo de envío. De igual forma se pueden obtener los índices de flujo de línea vistas desde ambos nodos, usando de la ecuación (13) a la (16) [4]:

$$\text{LFISP:} \quad 4 \frac{R_{ij}}{V_i^2} * \left(P_j + \frac{R_{ij}}{V_i^2} * Q_i^2 \right) \quad (13)$$

$$\text{LFIRP:} \quad 4 \frac{R_{ij}}{V_j^2} * \left(-P_i + \frac{R_{ij}}{V_j^2} * Q_j^2 \right) \quad (14)$$

$$\text{LFISQ:} \quad 4 \frac{X_{ij}}{V_i^2} * \left(Q_j + \frac{X_{ij}}{V_i^2} * P_i^2 \right) \quad (15)$$

$$(10) \quad \text{LFIRQ:} \quad 4 \frac{X_{ij}}{V_j^2} * \left(-Q_i + \frac{X_{ij}}{V_j^2} * P_j^2 \right) \quad (16)$$

Donde:

LFISP: Índice de flujo de línea para la potencia activa vista desde el nodo de envío.

LFIRP: Índice de flujo de línea para la potencia activa vista desde el nodo de recibo.

LFISQ: Índice de flujo de línea para la potencia reactiva vista desde el nodo de envío.

LFIRQ: Índice de flujo de línea para la potencia reactiva vista desde el nodo de recibo.

Los índices de línea con valor cercano a 1 son considerados críticos, debido a que las raíces tienden a volverse imaginarias. El nodo de recibo de la línea crítica se identifica como el nodo más débil desde el punto de vista de estabilidad de tensión [4]. En este trabajo de investigación esta técnica ha sido utilizada para una de las ubicaciones de compensadores que se muestran a continuación.

Procedimiento para la ubicación

Los métodos de ubicación de compensadores de reactivos estudiados en este artículo consideran los criterios de estabilidad de tensión revisados anteriormente y utilizan los parámetros de compensación para realizar una selección del número de compensadores y las capacidades que se van a implementar. Se compararon los métodos de ubicación que utilizan el análisis modal, el análisis de sensibilidad y el índice de flujo de línea, porque han sido los métodos más usados para la compensación de acuerdo con la literatura encontrada [4], [10]-[17]. Los procedimientos de ubicación utilizados en este trabajo son similares a los trabajados en [10], los cuales se basan en encontrar ubicaciones de compensadores ante máxima carga del sistema. A continuación se presenta la descripción de cada uno de estos métodos de ubicación utilizados para la solución de la estabilidad de tensión.

- *Método 1*

Corresponde a la ubicación de compensadores de reactivos utilizando los valores propios del análisis modal [10], identificando los nodos y ramas débiles del sistema. Para la ubicación de los FACTS se utilizan los resultados del análisis modal del punto de carga máxima del sistema de potencia [11]- [15]. Mediante este método se busca ubicar un compensador serie y uno paralelo para los factores de participación más altos en cada iteración.

El procedimiento es el siguiente:

- Definir la condición inicial de operación del sistema que cumpla con las restricciones eléctricas.
- Determinar la carga máxima del sistema.
- Calcular los valores propios alrededor del punto de carga máxima.
- Determinar los factores de participación de nodo y de rama más altos, para cada valor propio crítico.

- Determinar el nodo y la rama candidatos a compensación de reactivos, utilizando el factor de participación de nodo y de rama más alto.
- Repetir el paso anterior hasta alcanzar el límite de compensación serie y paralelo.

- *Método 2*

Corresponde a la ubicación de compensadores de reactivos utilizando los valores propios del análisis modal [10], identificando los nodos y ramas débiles del sistema [4], [13], [16], [17]. A diferencia del método 1, este método ubica un solo compensador serie o paralelo por cada iteración, siendo analizada la estabilidad de tensión con cada modificación de la red. Este tipo de ubicación permite incrementar la cantidad de reactivos a medida que se va mejorando la estabilidad de tensión.

- Definir la condición inicial de operación del sistema que cumpla con las restricciones.
- Determinar la carga máxima del sistema.
- Iniciar el contador en 1 ($c=1$)
- Realizar un análisis modal.
- Si el contador es impar, encontrar la rama con el factor de participación más alto correspondiente al modo crítico e instalar un dispositivo FACTS en serie.
- Si el contador es par, encontrar el nodo con el factor de participación más alto correspondiente al modo crítico e instalar un dispositivo FACTS en paralelo.
- El contador se aumenta en 1 ($c=c+1$)
- Repetir el procedimiento desde el análisis modal, hasta calcular los compensadores necesarios en serie y paralelo.

- *Método 3*

Corresponde a la ubicación de compensadores mediante el análisis de sensibilidad V-Q para encontrar los nodos débiles y el factor de participación de ramas para determinar las líneas débiles a ser compensadas. Este método utiliza un procedimiento similar al método 2 [10], pero el análisis de compensación de nodos se realiza por medio de sensibilidades [1].

El procedimiento de ubicación de compensadores de reactivos es el siguiente :

- Definir una condición de operación inicial teniendo en cuenta restricciones.
- Determinar el punto de carga máxima o la contingencia crítica.
- Ajustar el sistema para la operación de carga máxima o contingencia crítica.
- Iniciar un contador en 1 ($c=1$)
- Realizar el análisis de estabilidad de tensión, obteniéndose de esta forma los factores de sensibilidad y el valor propio crítico del sistema.
- Si el contador es par, encontrar la rama con el factor de participación más alto correspondiente al valor propio crítico e instalar un dispositivo FACTS en serie.
- Si el contador es impar, encontrar el nodo con el factor de sensibilidad más alto e instalar un dispositivo FACTS en paralelo.
- El contador se aumenta en 1 ($c=c+1$)
- Se repite el procedimiento desde el análisis de estabilidad, hasta que alcance el límite de compensación en serie y paralelo.

• *Método 4*

Corresponde a la ubicación de compensadores por medio del método de índices de flujo de línea [4], con el fin de determinar los puntos que requieren compensación.

El procedimiento de ubicación de compensadores de reactivos es:

- Definir una condición inicial de operación del sistema; para este estudio se elige una condición en la cual se cumplen las restricciones de tensión.
- Determinar el punto de carga máxima del sistema o la contingencia crítica.
- Configurar el sistema para la operación en la condición de carga máxima o contingencia crítica.
- Calcular los índices de flujo de línea del sistema para cada una de las líneas de transmisión, obteniéndose de esta forma los lugares de ubicación de los compensadores.
- Ubicar los dispositivos FACTS de acuerdo al índice más alto.

- Repetir los pasos desde el cálculo de los índices de línea, hasta alcanzar el límite de compensación en serie y paralelo.

Estos cuatro métodos se utilizaron para encontrar la ubicación de compensadores con criterios de máxima carga, con el fin de realizar las comparaciones ante diferentes condiciones de operación de un sistema de potencia. A continuación se presentan los criterios definidos para realizar las comparaciones de las respuestas de los compensadores en serie y paralelo.

Simulaciones y comparaciones de respuesta

Para la comparación de la compensación de reactivos se han realizado simulaciones para tres condiciones del sistema de potencia: operación inicial, carga máxima y contingencia crítica. A continuación se describen las características consideradas para cada condición de operación.

Condiciones de operación

- *Condición inicial:* a través de un flujo de carga se determinan los parámetros de la condición inicial de operación del sistema, el cual tiene sólo restricciones de entrega de potencia reactiva de los generadores. El método de estudio utilizado para resolver un flujo de carga fue Newton Raphson extendido, teniendo en cuenta las restricciones eléctricas de tensión mínima de 0,94 p.u. y tensión máxima de 1.06 p.u. Para esta condición de operación se prueba la respuesta de cada compensador y se establece la mejor compensación de reactivos del sistema.
- *Carga máxima:* para llevar el sistema a la condición de carga máxima se aumenta la potencia activa y reactiva de todas las cargas a un factor de potencia constante, desde su valor nominal hasta un valor máximo "k", en el cual el flujo de carga del sistema no converge. Cuando el sistema opera en este punto, las cargas del sistema consumen la potencia máxima permitida y opera cerca del límite de estabilidad de tensión. Un análisis de estabilidad de tensión, por medio de flujos progresivos, permitió identificar que el sistema de potencia IEEE 39 alcanza la carga máxima en un incremento del 16,3% de su valor nominal. Para esta condición de operación, se realizan las comparaciones de los valores propios críticos y se definen el mejoramiento de la estabilidad de tensión.

- *Contingencia crítica*: la selección de las contingencias es realizada con la herramienta computacional de sistemas de potencia COORDCOMP [5]. Esta herramienta cuenta con un módulo de selección de contingencias “contselec”, el cual entrega las contingencias N-1 más críticas para la estabilidad de tensión [5]. Como resultado de la selección, la contingencia más crítica es la desconexión del generador G09 ubicado en el nodo 38, la cual presenta una reducción superior al 65% del margen de operación inicial [3], [16].

Comparaciones de respuesta

La comparación de la efectividad de compensación de los dispositivos FACTS para la solución de problemas de estabilidad de tensión se realiza con las técnicas de análisis de la estabilidad de tensión como el valor propio del análisis modal, el margen de estabilidad y las curvas PV.

- *Valor propio crítico*: es obtenido mediante un análisis modal y es un indicador de la debilidad del sistema y sus puntos críticos de la red. Cuando el sistema es débil y cuenta con problemas de estabilidad de tensión, el valor propio crítico tiende a cero e indica que debe realizarse compensación de reactivos para mejorar la condición de operación. Un incremento de la estabilidad de tensión corresponderá al aumento del valor propio crítico. La comparación de la efectividad de la compensación de potencia reactiva mediante este índice, corresponde a definir el método de ubicación que más incrementa el valor propio para las diferentes condiciones de operación del sistema.

- *Margen de estabilidad*: corresponde a la indicación de la distancia que tiene cada nodo de la red al máximo valor de entrega de potencia activa y reactiva. Este es un indicador que permite identificar los nodos débiles de la red y que sirve para realizar una comparación de respuestas de compensadores, ya que el incremento del margen se relaciona con la cantidad de reactivos disponibles por cada nodo. Este indicador permitirá evaluar la cantidad de reactivos que se utilizan para alejar el sistema de los límites de estabilidad de tensión y la efectividad de cada ubicación de compensadores de reactivos.

- *Curvas PV*: este método de estudio de la estabilidad también permite identificar el mejoramiento de las tensiones a medida que cambia la po-

tencia activa y reactiva suministrada por cada nodo. La comparación de las curvas de los nodos críticos permite identificar la efectividad de cada una de las respuestas de los compensadores de reactivos, para realizar un mejoramiento de la estabilidad de tensión de la red. La comparación se realiza para cada nodo crítico del sistema y se evalúan las curvas PV que ayudan a identificar los límites de entrega de potencia reactiva y la tensión que alcanzaría cada nodo utilizando la ubicación propuesta.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de realizar los ajustes del sistema y las simulaciones para las diferentes condiciones de operación, se compararon las respuestas de los compensadores FACTS usando los valores propios del análisis modal, el margen de estabilidad y las curvas PV. En la tabla 1, se pueden observar los resultados de comparación de los compensadores de reactivos estudiados mediante el análisis modal y el margen de estabilidad de tensión para las tres condiciones de operación.

Tabla 1
Comparación de los métodos de ubicación por índices de estabilidad de tensión

Condición de operación	Índice de estabilidad	Sin FACTS	Con FACTS en serie y paralelo ubicados mediante:			
			Método 1 (Modal 1)	Método 2 (Modal 2)	Método 3 (Sens.)	Método 4 (LFI)
Inicial o normal	Valor propio [MVA/%V]	15,29	18,78	18,71	18,68	19,28
	Margen [%]	16,3	18,90	18,91	18,8	18,8
Carga máxima	Valor propio [MVA/%V]	1,41	9,45	9,46	9,41	9,06
	Margen [%]	0,05	2,41	2,42	2,38	2,35
Contingencia crítica	Valor propio [MVA/%V]	2,93	5,66	5,71	19,00	13,76
	Margen [%]	1,99	4,60	4,61	7,07	7,1

En la tabla anterior, se observa que los FACTS mejoran la estabilidad de tensión ante las diferentes condiciones de operación, pero su efectividad varía de acuerdo con la ubicación de los compensadores de reactivos en el sistema de potencia. Aunque el método 1 y 2 difieren en el procedimiento de ubicación, sus resultados de mejoramiento de la estabilidad son muy similares, por lo cual se podría utilizar cualquiera de los dos métodos para mejorar la estabilidad de potencia en sistemas pequeños como el analizado en esta investigación.

En esta tabla se puede observar que para la operación normal del sistema, la compensación de reactivos es similar para todos los métodos de ubicación de compensadores, y existe muy poca diferencia entre márgenes y valores propios estudiados. Esto se debe a la cantidad de potencia reactiva disponible en el sistema para la compensación de los nodos críticos y que los compensadores aportan mayor cantidad de reactivos para mantener mejores condiciones de estabilidad durante el aumento de la carga.

Cuando el sistema se encuentra ante una cargabilidad máxima, tiene muy poca potencia reactiva para suministrar a los nodos críticos. Ante esta condición, los métodos se comportan de forma similar y ampliando levemente los márgenes de estabilidad de tensión. La ubicación por medio del análisis modal muestra una mejor ampliación de los márgenes que los otros dos métodos, pero las diferencias no son muy amplias para concluir que uno de los métodos funciona mejor para esta condición de operación. Debido a que la ubicación de compensadores se ha realizado en esta investigación para la carga máxima, el mejoramiento de la estabilidad de tensión ante esta condición de operación es similar y no ofrece una ampliación del margen grande por la dificultad de transferir la potencia reactiva a través de las líneas con sobrecarga.

Para la operación después de contingencias, la compensación de reactivos se convierte en una buena opción para ampliar los márgenes de estabilidad ante esta condición crítica. La ubicación por medio de flujo de línea y sensibilidad resulta ser mejor que los métodos de ubicación por medio del análisis modal. La ubicación mediante el método de análisis de sensibilidad amplía más el valor propio, pero ambos métodos se comportan en forma similar para el mejoramiento de la estabilidad de tensión ante contingencias.

En la figura 3, se muestra la comparación de compensación de reactivos en la máxima carga mediante el uso de curvas PV. En estas curvas se pueden estudiar los márgenes de estabilidad y las variaciones de las tensiones del nodo ante los diferentes métodos de ubicación de compensadores.

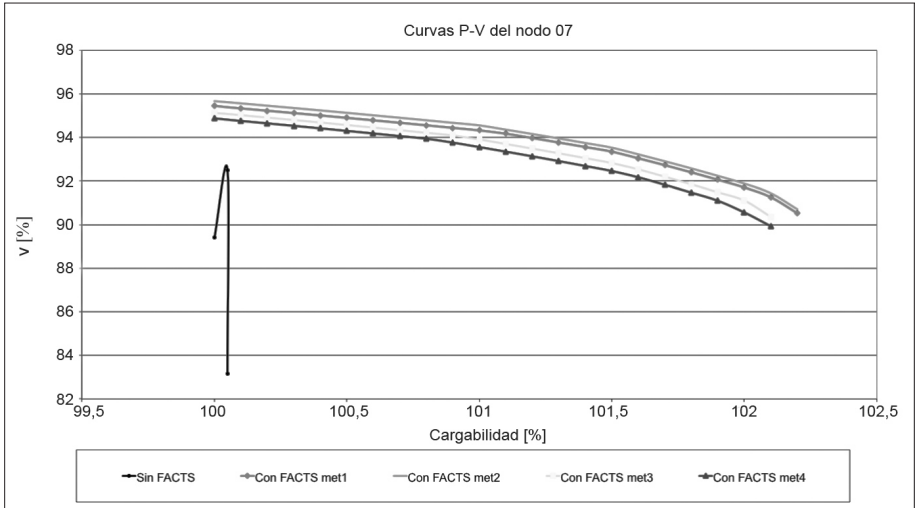


Figura 3. Curvas P-V para carga máxima

La comparación de los cuatro métodos de ubicación de compensadores de reactivos muestra el mejoramiento de los márgenes y los niveles de tensión a través del aumento de potencia de la carga. Ante esta condición de operación, los cuatro métodos muestran que mantienen la tensión en niveles similares durante el aumento de la carga. El mejoramiento de los márgenes de estabilidad de tensión es mayor para los métodos de análisis modal y no se presenta mucha diferencia entre el método 1 y 2 aunque los procedimientos de ubicación son diferentes. El mejoramiento mediante los métodos 3 y 4 no está tan alejado de los otros métodos y puede considerarse también una buena opción para la compensación de reactivos ante condiciones de carga máxima.

En la figura 4, se muestra la comparación de las respuestas de los compensadores después de una contingencia crítica, utilizando curvas PV. Se ha realizado la comparación para los cuatro métodos de ubicación de compensadores de reactivos y se muestra el mejoramiento de la estabilidad y las variaciones de la tensión ante el aumento de la potencia de la carga.

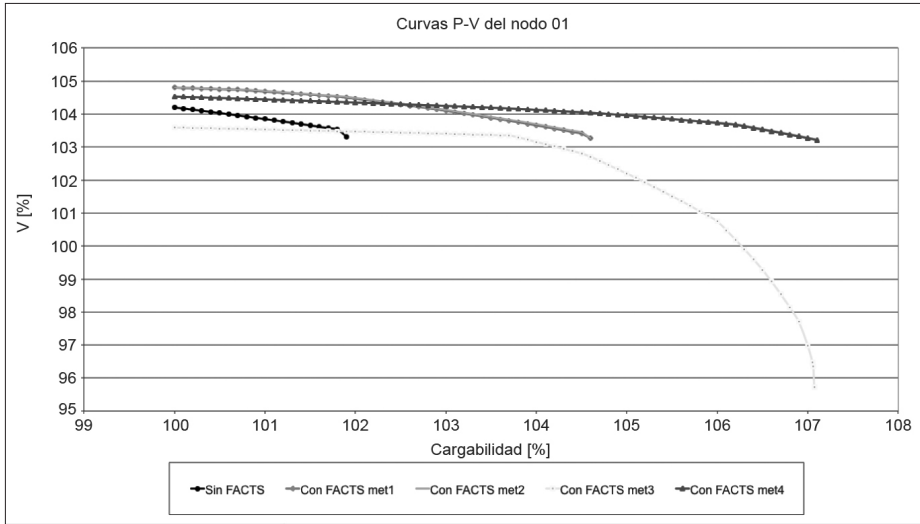


Figura 4. Curvas P-V para contingencia crítica

En esta curva se puede observar que los métodos de ubicación por análisis modal (métodos 1 y 2) muestran mejoramientos similares de las tensiones y de los márgenes de estabilidad de tensión, a pesar de haber sido ubicados con procedimientos diferentes. Los métodos más efectivos para el mejoramiento de los márgenes de estabilidad de tensión son los de sensibilidad (método 3) y flujo de línea (método 4); pero comparando las magnitudes de tensión ante el aumento de carga, se encuentra que el método más adecuado es el de flujo de línea porque mantiene variaciones pequeñas a medida que se acerca al punto máximo de entrega de potencia.

Esta metodología para la comparación de la ubicación de compensadores fue utilizada para estudiar los comportamientos de los nodos de carga del sistema IEEE 39. Se comparó la efectividad de la compensación de reactivos de acuerdo con cada ubicación del sistema, variando la capacidad de cada compensador de reactivos (50 MW, 100 MW y 150 MW), y con una máxima compensación del sistema entre 200 MW y 300 MW.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado la comparación de las respuestas de compensadores de reactivos FACTS ubicados mediante cuatro procedimientos

que utilizan análisis estáticos de la estabilidad de tensión. La implementación se realizó en el sistema de potencia IEEE 39 nodos, estudiando la operación bajo tres condiciones: operación inicial, carga máxima y contingencia crítica. A continuación se describen las conclusiones más importantes de este trabajo de investigación:

Durante la operación inicial y ante condiciones de carga máxima, los métodos de compensación funcionan adecuadamente para mejorar la estabilidad y mantienen los niveles de tensión de los nodos del sistema. Los cuatro métodos presentan un mejoramiento similar para mantener las magnitudes y los márgenes de estabilidad de tensión.

Ante contingencias críticas se presenta una gran reducción de los márgenes de estabilidad de tensión y las respuestas de los compensadores son diferentes ante esta condición de operación, siendo de gran importancia la localización y capacidad de los compensadores para ampliar el margen. Los métodos de ubicación mediante análisis de sensibilidad y flujo de línea muestran un mejoramiento amplio de la estabilidad de tensión después de contingencias, pero el índice de flujo de línea (LFI) entrega los mejores resultados en cuanto al margen y las magnitudes de tensión, siendo esta más adecuada para la operación del sistema.

En trabajos futuros será importante revisar los métodos de ubicación para sistemas de potencia grandes, teniendo en cuenta un número mayor de compensadores de reactivos y la capacidad de compensación máxima. También será importante el desarrollo de nuevos métodos de ubicación o mejoramiento de los actuales, que permitan el incremento de los márgenes de estabilidad y funcionen para los diferentes problemas de la operación del sistema de potencia y bajo la acción coordinada de un grupo de compensadores de reactivos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las instituciones Universidad del Valle y Universidad del Norte por su apoyo en el desarrollo de esta investigación. Agradecimientos especiales al Grupo de Investigación en Alta Tensión (GRALTA) de la Universidad del Valle, Cali (Colombia) y al Grupo de investigación en Sistemas Eléctricos de Potencia (GISEL) de la Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia).

REFERENCIAS

- [1] P. Kundur, *Power system stability and control*. New York, NY: McGraw-Hill, 1994.
- [2] N. G. Hingorani, and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible transmission systems*. New York, NY: Wiley-IEEE Press, 1999, pp.2-29, p 226, pp. 261-262.
- [3] Y. Mansour *et al.*, "SVC placement using critical modes of voltage instability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, pp. 757-763, May 1994.
- [4] N. K. Nikhlesh *et al.*, "A novel placement strategy for FACTS controllers," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, pp. 982-987, Jul. 2003.
- [5] J. E. Candelo, "Metodología para mejorar la estabilidad de tensión mediante la coordinación de FACTS y compensadores de reactivos suicheados mecánicamente," Tesis de Doctorado, Escuela de Ingenierías Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2008.
- [6] J. H. Vivas, and J. Zambrano, "Modelación del capacitor serie controlado por tiristores (TCSC) en ATP-EMTP," in *Memorias de la III Jornada de Ingeniería Eléctrica*, Pto. Ordaz, Venezuela, 1993, pp. 1-6.
- [7] E. Acha *et al.*, *FACTS: Modelling and simulation in power networks*. New York, NY: John Wiley & Sons, 2004.
- [8] J. C. Gonzales, and J. Cidrás. (2003). Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC), Univ. Vigo, España [Online]. Available: <http://webs.uvigo.es/carrillo/publicaciones/SVC.pdf>
- [9] H. M. Rodríguez, "Comparación de métodos de ubicación de FACTS serie y paralelo para mejorar el margen de estabilidad de tensión en el sistema IEEE de 39 nodos", Proyecto final, Escuela de Ingenierías Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2009.
- [10] L. H. Ramírez *et al.*, "Efecto de los FACTS serie en el mejoramiento de la estabilidad de tensión". *Revista Ingeniería y Desarrollo*, Vol. 26, pp. 117-138, 2009.
- [11] Y. Mansour *et al.*, "SVC placement using critical modes of voltage instability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, n° 2, pp. 757-763, May 1994.
- [12] S. Granville, and C. M. Abib, "Application of decomposition techniques to var planning: methodological & computational aspects," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, n° 4, pp. 1780-1787, Nov. 1994.
- [13] 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 Trans. Power Syst.*, vol. 16, n° 3, Aug. 2001.
- [14] H. G. Sarmiento, G. Pampin and J. D. de Leon, "FACTS solutions for voltage stability problems in a large metropolitan area," in *IEEE PES Power Syst. Conf. and Exp.* vol. 1, 2004, pp. 275-282.
- [15] M. A. Perez, A. R. Messina, and C. R. Fuerte-Esquivel, "Application of FACTS devices to improve steady state voltage stability," in *IEEE Power Eng. Soc. Summer Meet.*, Seattle, WA, USA, vol. 1, 2000, pp. 1115-1120.
- [16] P. Kundur, B. Gao, and G. K. Morison, "Practical application of modal analysis for increasing voltage stability margins," in *Proc. Athens Power Tech.*, Athens, Greece, vol. 1, 1993, pp. 222-227.
- [17] N. Yorino *et al.*, "A new formulation for FACTS allocation for security enhancement against voltage collapse," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, n°1, pp. 3-10, Feb. 2003.