

Compensación reactiva en redes eléctricas de transmisión basado en programación no lineal considerando ubicación óptima de SVC

Reactive compensation in transmission electrical grids based on non-linear programming considering optimal SVC location

Jhon Ramirez ^{1*}, Diego Carrión ², Esteban Inga ²

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: jramirezg2@est.ups.edu.ec

RESUMEN— El subsistema de transmisión en sistemas eléctrico de potencia es muy importante, debido a que es el encargado de llevar la energía eléctrica desde la generación hasta la etapa de subtransmisión y posteriormente a ser distribuida. Las aplicaciones de los FACTS SVC en las barras del sistema eléctrico de potencia son variadas; estos dispositivos nos permiten modificar el flujo de potencia en el sistema de potencia, con el fin de aprovechar al máximo la capacidad de las líneas de transmisión; el ubicar estos elementos compensadores de potencia reactiva tiene un costo elevado, por lo que es necesario ubicarlos de forma óptima e inteligente, con el fin de hacer que la inversión sea factible. En la presente investigación se presenta una metodología para minimizar la desviación de las magnitudes de los perfiles de voltaje, para lo cual analizamos el comportamiento antes y después de la compensación reactiva en redes de transmisión mediante programación no lineal considerando ubicación óptima de SVC en los modelos de 14 y 30 barras del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Finalmente, la ubicación de compensadores de potencia reactiva en las barras del SEP mejora los perfiles de voltaje en cada una de sus barras, minimiza costos de inversión y reduce las pérdidas de potencia activa y reactiva en las líneas de transmisión.

Palabras clave— *Compensador estático VAR, optimización, flujo reactivo, sistema de transmisión AC flexible.*

ABSTRACT— Electrical transmission lines is one of the most important stage in electrical power systems, because it is responsible for carrying electrical energy from the generation to the sub-transmission stage and subsequently to be distributed. The applications of the SVC FACTS on the bars of the electric power system are varied; these devices allow us to modify the power flow in power system, to maximize the capacity of the transmission lines; locating these reactive power compensating elements has a high cost, so it is necessary to locate them optimally and intelligently, in order to make the investment feasible. In the present research, a methodology to minimize the deviation of the magnitudes of the voltage profiles is presented, for which we analyze the behavior before and after the reactive compensation by means of the optimal parameters of AC power in the IEEE 14 and 30 buses model. Finally, the location of reactive power compensators in buses of electrical power system improve the voltage profiles in each of its bus, minimizes investment costs and reduce the power losses in transmission lines.

Keywords— *Static compensator VAR, optimization, reactive flow, flexible AC transmission system.*

1. Introducción

En los sistemas eléctricos de potencia de los países desarrollados y subdesarrollados el uso de tecnologías como la generación distribuida y FACTS (Flexible AC Transmission System) ha incrementado considerablemente, con el fin de compensar potencia reactiva, de esta forma, mejorar los rendimientos generales del sistema eléctrico de potencia como

reducción de pérdidas de potencia activa y reactiva, minimización de la contaminación ambiental, maximización de la carga que puede soportar el sistema y mejorar perfiles de voltaje [1].

Los dispositivos FACTS son convertidores electrónicos de potencia que tienen la capacidad de controlar varios parámetros eléctricos en redes de transmisión, como flujo de potencia en estado estable y

Citación: J. Ramirez, D. Carrión y E. Inga, "Compensación Reactiva en Redes de Transmisión Eléctrica basado en Programación No Lineal considerando ubicación de SVC", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 20 de enero de 2020. **Recibido con correcciones:** 11 de enero de 2021. **Aceptado:** 11 de enero de 2021.

DOI:

Copyright: 2021 J. Ramirez, D. Carrión y E. Inga. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

el control de estabilidad dinámica [2]. El dispositivo FACTS más utilizado dentro de las redes de transmisión es el SVC (Static Synchronous Compensator) debido a su bajo costo, simplicidad y buen rendimiento en el sistema, este dispositivo se conecta en derivación en las diferentes barras del sistema con el fin de absorber o generar VAR (Voltio Amperio Reactivo), cuya salida se ajusta para mejorar la corriente capacitiva o inductiva y así controlar parámetros específicos del sistema eléctrico de potencia como los perfiles de voltajes [3].

El sistema de transmisión eléctrica es una de las etapas más importantes en el proceso de generación-consumo, debido a que es la etapa intermedia en la transferencia de energía eléctrica desde la estación central de generación hasta los consumidores. A medida que se van instalando grandes centrales de generación eléctrica, las redes de transmisión se están volviendo más complejas debido al aumento de carga y el patrón de carga dinámica que afecta de forma directa las líneas de transmisión, en donde están trabajando sobrecargadas o subcargadas; este tipo de desigualdad de la carga afecta directamente los perfiles de voltaje y hace que la seguridad del sistema se vuelva vulnerable a fallas, a su vez que el flujo de potencia activa y reactiva incrementa produciendo una pérdida de potencia suplementaria y aumentando caídas de tensión [4], [5].

Según [5], la planificación y operación del sistema eléctrico de potencia debe reformularse, debido a que el enfoque convencional de agregar nuevas líneas de transmisión en el sistema y construir nuevas instalaciones de generación de energía están sujetos a diversos factores, como los límites técnicos y económicos; si la demanda del consumidor es alta, las líneas de transmisión operarían cerca de su capacidad máxima o simplemente se sobrecargarían, haciendo que los flujos de potencia en la línea violen con facilidad los establecidos, llevando así a la inestabilidad de voltaje. Por lo tanto, la mejor solución es hacer uso óptimo de la red de generación y transmisión existente.

La estabilidad de voltaje es la capacidad que tiene un sistema eléctrico de potencia para mantener los voltajes en las barras dentro de los rangos aceptados y establecidos, ya sea trabajando en condiciones normales o bajo perturbaciones. Los FACTS son la mejor y efectiva alternativa para mejorar el rendimiento del

sistema de energía, en lugar de diseñar e instalar nuevas y complejas líneas de transmisión [6], [7].

Según [8] los problemas aliviados por una solución FACTS los han clasificado en dos grupos, como problemas de estado estacionario y de estabilidad transitoria. Los problemas de estado estacionario los han subdividido en tres secciones como son control de voltaje, optimización del sistema de energía, minimización de costos y análisis de contingencia. De la misma forma los problemas de estabilidad transitoria los ha subdividido en dos secciones; estabilidad de voltaje y estabilidad angular. En cada caso, el fin es alivianar tanto inestabilidad, costos, como también disminuir el esfuerzo de la red.

En [9] se propone la ubicación óptima de los SVC mediante análisis nodal y algoritmo genético (GA), para ellos la estabilidad del sistema eléctrico de potencia (SEP) se utiliza con índice o parámetro para la ubicación óptima de FACTS.

En [10], [11] se ubican de forma óptima los SVC mediante algoritmo genético con el fin de tener una estabilidad en el voltaje.

En [12] se realiza la ubicación óptima mediante la técnica HPSO (Hybrid Particle Swarm Optimization), el cual reduce costos de generación, pérdidas en transmisión e incrementa la capacidad de generación junto con la capacidad de transferencia de potencia en el SEP; este realiza su investigación sobre un modelo del IEEE de 30 barras utilizando de igual forma flujos óptimos de potencia.

En [13] se propone la ubicación óptima de SVC en base al modelo de optimización de enjambre de partículas (PSO), con el fin de minimizar las desviaciones de los perfiles de voltaje en las barras y las pérdidas que existen en la red.

En [14] se propone un enfoque en el cual se basa en la sensibilidad del índice de rendimiento de flujo de potencia real y el factor de distribución de interrupción de línea para decidir la ubicación óptima de FACTS como compensadores serie controlados por tiristores (TCSC) y los compensadores serie síncrono estáticos (SSSC) con el fin de mejorar la estabilidad y perfiles de voltaje en un modelo del IEEE de 30 barras.

Las limitaciones en el subsistema de transmisión derivan principalmente de los costos de inversión, por lo

que la implementación de estos dispositivos se presenta como una acción positiva [15].

Una de las ventajas que presenta la colocación de compensadores en las líneas de transmisión es la reducción en la cantidad de potencia reactiva (MVar) que se transporta, haciendo que la potencia activa (MW), que se puede transmitir aumente significativamente,

también ayuda a que el perfil de voltaje se encuentre en los límites aceptables.

La inserción de dispositivos SVC es altamente efectiva para prevenir la inestabilidad de voltaje, sin embargo, los beneficios y el rendimiento de estos

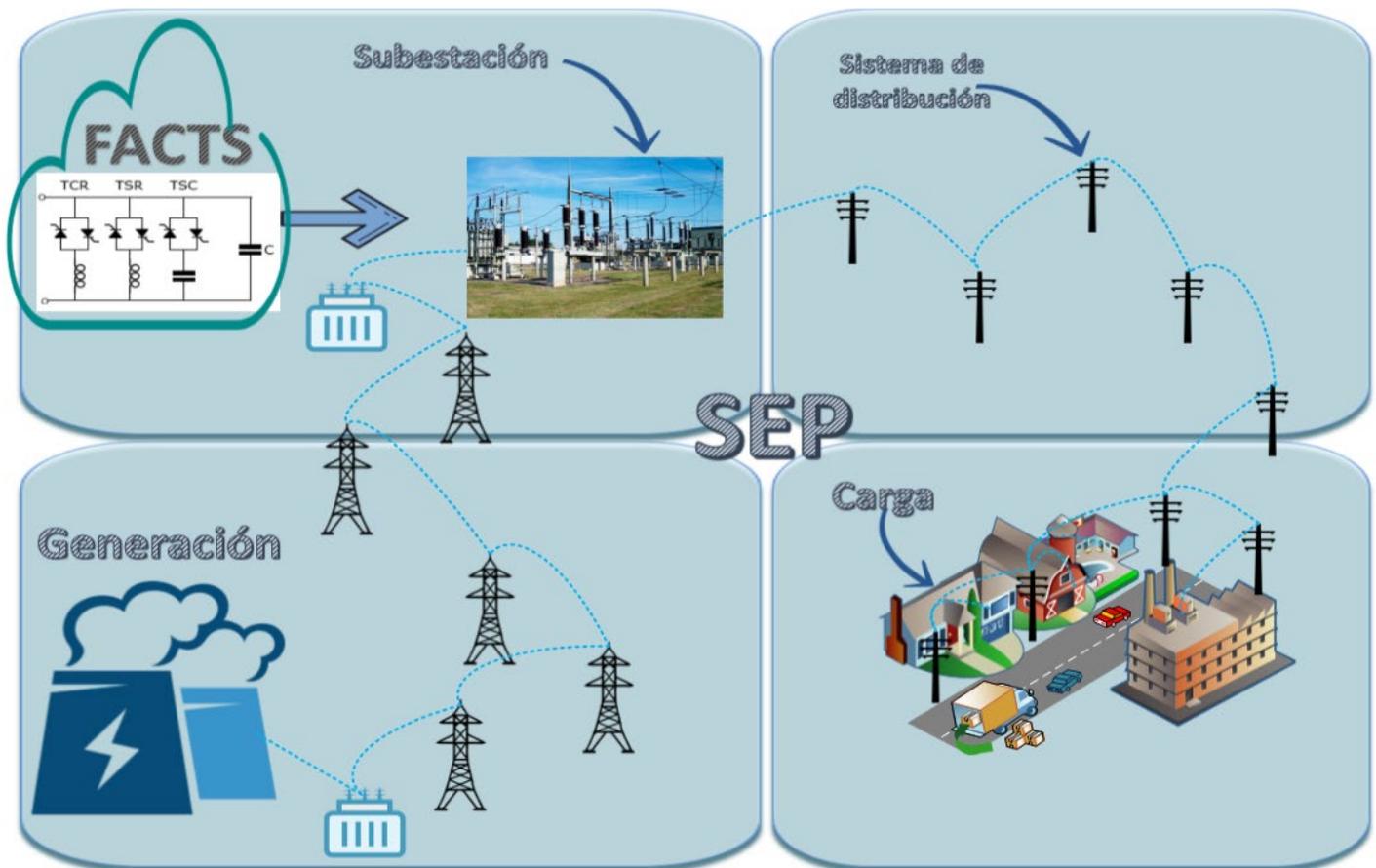


Figura 1. Infraestructura de ubicación de SVC en Sistemas eléctricos de potencia.

controladores están determinados por su ubicación y tamaño, debido a los altos costos que implica adquirir un número grande de estos controladores se debe minimizar la cantidad y sus beneficios se pueden maximizar a través de métodos de optimización eficiente [16].

En la figura 1 podemos observar de forma gráfica la infraestructura de ubicación de los SVC, los cuales se colocarán en las redes de transmisión, específicamente en las subestaciones.

En adelante el artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se describe la ubicación óptima de SVC. En la sección 3 se describe la metodología y formulación del problema. En la sección 4 se analiza el desempeño del algoritmo propuesto bajo diversas condiciones. Finalmente, las conclusiones del trabajo se presentan en 5.

2. Ubicación óptima de SVC

La ubicación óptima de SVC depende de las características de cada SEP, por esta razón es necesario identificar la matriz de conectividad (MC) del mismo. La matriz de conectividad (MC) es una matriz de datos binarios que representa la topología del sistema, la cual tiene dimensiones de $n * n$; siendo n la cantidad de barras del sistema [17].

Para la ubicación de los SVC es esencial encontrar los valores de potencia reactiva en cada una de las barras del SEP por lo que se propone encontrar estos valores mediante el método Newton-Raphson Desacoplado para flujos de potencia.

Dado que el Jacobiano es encontrado a partir de los datos del SEP es necesario formular las ecuaciones para este método.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (1)$$

Una vez encontrados los incrementos de potencia activa y reactiva, se procede a encontrar los $\Delta V/V$ y $\Delta \theta$ en cada una de las iteraciones hasta que ΔP y ΔQ sean menores a la tolerancia especificada [18].

La función de costos del SVC está dada de la siguiente forma:

$$C_{svc} = 0.0003s^2 - 0.3051s + 127.38 \quad (2)$$

Donde:

s ; representa la potencia reactiva del SVC.

2.1 Ubicación óptima de SVC con restricciones

Si en el SEP se tiene en consideración únicamente las potencias en cada barra y los costos de ubicar un SVC en esa barra para minimizar la cantidad de SVC a desplegar de forma óptima en (3); restringido por (4) la cual toma en cuenta que las barras del sistema tengan al menos una conexión, (5) evita que los SVC sean colocados en nodos donde existan generadores conectados [19], [20].

Función Objetivo.

$$\min n_{SVC} = \sum_{i=1}^n C_{svc_i} * X_i \quad (3)$$

Sujeto a:

$$f(x) \geq 1 \quad (4)$$

$$G(x) \leq 0 \quad (5)$$

Donde:

n_{SVC} ; representa el número de SVC.

C_{svc_i} ; representa el costo de implementar un SVC en la barra i .

X_i ; representa una variable binaria de ubicación de SVC en las barras.

3. Metodología y formulación del problema

La presente investigación es de categoría básica debido a su naturaleza, la cual emplea procesos de simulación. Esta tiene un enfoque cuantitativo, puesto que se busca encontrar el número mínimo de SVC en un Sistema eléctrico de potencia y que garantice los niveles de voltajes adecuados en el rango operativo estipulado, así permitiéndole a las líneas de transmisión trabajar a su máxima capacidad, con el menor monto de inversión. Para ello, el modelo propone un modelo de optimización y así proporcionar información útil para decidir la ubicación de los dispositivos de compensación y el número de ellos. Finalmente, al ser de carácter general es decir exploratorio, el modelo sugiere analizar diferentes casos de estudios.

Por lo tanto, la metodología propuesta en la presente investigación genera un algoritmo sujeto a valores iniciales, una función objetivo y sus respectivas restricciones, dando origen así, a un proceso de optimización que tiene como finalidad lograr encontrar el número mínimo y ubicación de los SVC requeridos para cada caso de estudio.

A continuación, presentamos la descripción formal del problema que se pretende resolver. El modelo propuesto emplea un algoritmo general que se encarga de encontrar las potencias en cada una de las barras a fin de utilizar estos datos como valores iniciales para así encontrar el número de dispositivos SVC y su ubicación respectiva en para cada caso de estudio, con la finalidad principal de mejorar los perfiles de tensión.

Como caso de estudios se toma en consideración los modelos de prueba del IEEE de 14 y 30 barras; en los

cuales se realizó un despliegue óptimo de SVC considerando restricciones del caso y comparar sus resultados.

Tabla 1: Notaciones y variables

Nomenclatura	Descripción
V_i	Voltaje en el nodo i del SEP
n	Número de barras en el SEP
Z_{ij}	Impedancia de la línea $i - j$
S_{gi}	Potencia generada en la barra i
S_{di}	Potencia demanda en la barra i
B_{ij}	Susceptancia de la línea $i - j$
Q_i	Potencia reactiva en la barra i
P_i	Potencia activa en la barra i
C_{svc}	Función de costos del SVC
s	Rango de operación del SVC
Y_i	Costo de instalación del SVC
X_i	Matriz de conexiones del SEP

Algoritmo 1. Ubicación óptima de dispositivos FACTS en líneas de transmisión

Paso 1: Variables

$$V, n, Q_i, Z_{ij}, S_g, S_d, B_{ij}$$

Paso 2: Input

$$MC_{n \times n}; \text{ Matriz de conectividad}$$

$$C_{svc}; \text{ Ecuación de costos para los SVC}$$

Paso 3: Encontrar potencia reactiva en el SEP mediante el método Newton-Raphson Desacoplado.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}$$

Paso 4: Minimización de SVC

Función Objetivo.

$$\min n_{SVC} = \sum_{i=1}^n C_{svc_i} * X_i$$

Sujeto a:

$$f(x) \geq 1$$

$$G(x) \leq 0$$

Paso 5: Mostrar resultados de la optimización

Terminar

ubicaciones más factibles al momento de ubicar SVC en los modelos estudiados, en la figura 2 y figura 3 se presenta de forma gráfica el lugar en el cual se encontrarán colocados los SVC, para el modelo de 14 barras del IEEE se encontrarán en los nodos 4, 5, 7, 11 y 13 y en el modelo de 30 barras del IEEE se encontrarán en los nodos 3, 6, 7, 9, 12, 16, 19, 22, 23, 26 y 29.

Siendo un total de cinco SVC para modelo de 14 barras y 11 SVC para el modelo de 30 barras.

Tabla 2. Valores de potencia para los SVC en cada una de barras encontradas

Modelo 14 barras	Caso 1 SVC	Caso 2 SVC	Caso 3 SVC	Modelo 30 barras	Caso 1 SVC	Caso 2 SVC	Caso 3 SVC
B4	10	15	30	B3	10	15	15
B5	10	15	30	B6	10	15	15
B7	10	15	10	B7	10	15	15
B11	10	15	10	B9	10	15	10
B13	10	15	20	B12	10	15	15
				B16	10	15	15
				B19	10	15	15
				B22	10	15	10
				B23	10	15	10
				B26	10	15	10
				B29	10	15	10

En la tabla 2 se presentan los valores de potencia de los SVC en las barras encontradas luego de aplicar el algoritmo 1 en cada modelo del IEEE, para realizar la comprobación de resultados, se ha procedido a plantearnos tres casos específicos. En el caso 1 se ubicará en cada uno de los nodos encontrados dispositivos SVC de 10 MVAR de capacidad; el caso 2 es la ubicación de SVC de 15 MVAR en cada barra y por último el caso 3, se ubicará SVC de diferentes capacidades como se muestra en la tabla 2.

4. Análisis de resultados

Sobre los modelos de 14 y 30 barras del IEEE se aplicó el algoritmo de ubicación óptima de SVC con varias restricciones y como resultado se encontró las

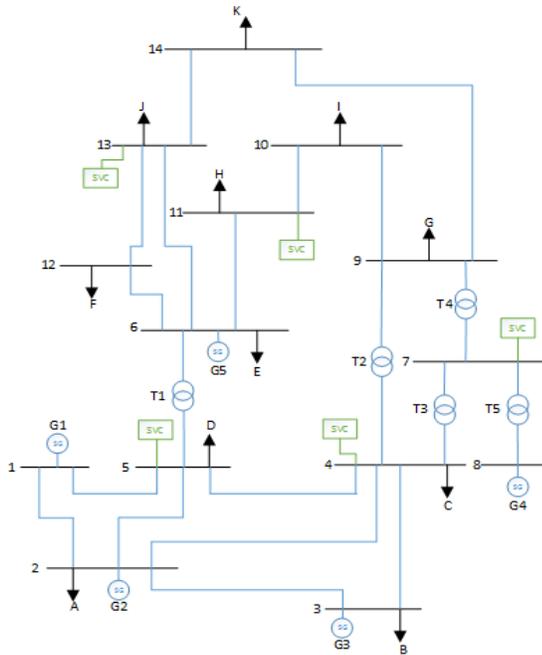


Figura 2. Ubicación óptima de SVC en el modelo de 14 barras del IEEE.

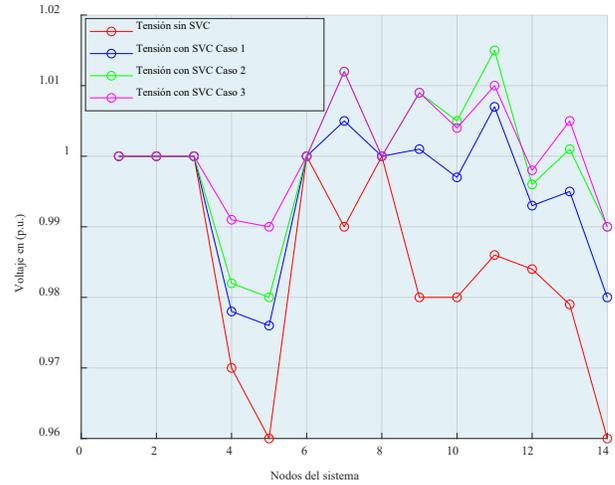


Figura 4. Perfiles de tensión en el sistema IEEE 14 barras.

Como se puede evidenciar en la figura 4, los perfiles de voltaje se encuentran en el rango de operación de $\pm 5\%$ para los voltajes en las barras. En la gráfica se observan cuatro curvas, en donde se aprecian los resultados obtenidos de colocar SVC de varias capacidades en las barras encontradas, todo esto aplicado en el modelo del IEEE de 14 barras.

El caso base (Tensión sin SVC), se presentan los resultados de voltaje en las barras para el modelo IEEE de 14 barras, en donde podemos observar que en las barras 5 y 14 del modelo tenemos un voltaje de 0.96 (p.u.), siendo así un valor bajo a ser corregido con la inserción de SVC al sistema; en el caso 1 (Tensión con SVC Caso 1), caso 2 (Tensión con SVC Caso 2) y caso 3 (Tensión con SVC Caso 3) se implementaron SVC de diferentes capacidades en cada una de las barras encontradas, teniendo un aumento considerado en los perfiles de voltajes.

En la figura 4 se presenta el caso 3 (Tensión con SVC Caso 3), como la opción más factible al momento de ubicar compensadores SVC en un SEP, debido a que los valores de voltajes son los más cercanos a 1 (p.u.) en cada barra del sistema, así aumentando los valores más bajos de voltaje y disminuyendo aquellos que se encontraban por debajo de 1 (p.u.).

Para el caso 3 las mejoras en cada una de las barras del SEP son considerables y dentro del rango de operación de $\pm 5\%$ para los voltajes en las barras; de esta forma obtenemos una mejora media en el SEP de 1.63%.

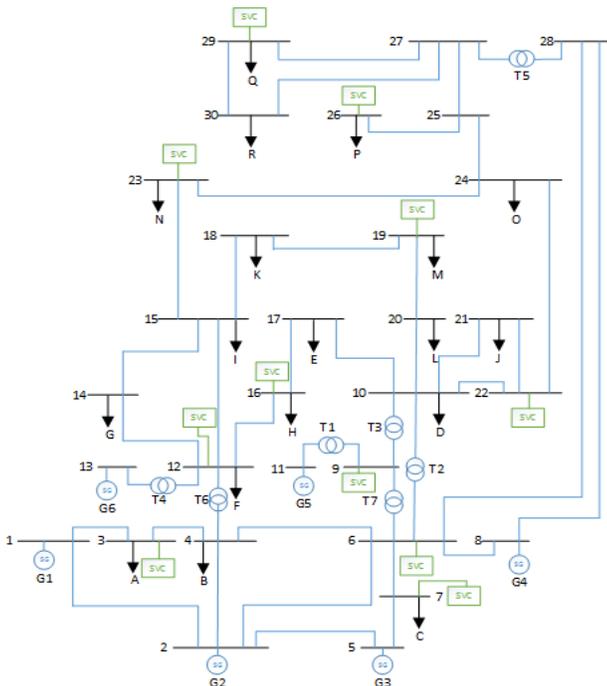


Figura 3. Ubicación óptima de SVC en el modelo de 30 barras del IEEE.

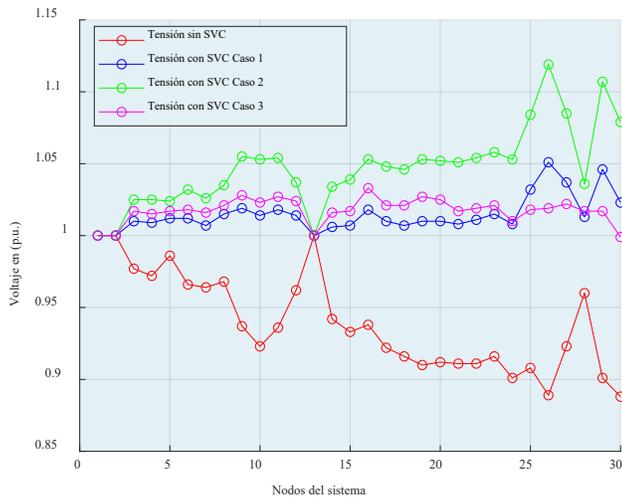


Figura 5. Perfiles de tensión en el sistema IEEE 30 barras.

Al igual que para el modelo anterior se implementan SVC de diferentes capacidades en cada una de las barras encontradas, estos casos se presentan en la tabla 2.

En la figura 5 los perfiles de voltaje se encuentran en los rangos de operación adecuados ($\pm 5\%$ para los voltajes en las barras) y podemos observar que la curva más cerca de 1 (p.u.) es la curva 4 (Tensión con SVC Caso 3), teniendo una mejora media en el SEP de 7.75%, de forma que se la presenta como la opción más factible al momento de ubicar compensadores SVC en un SEP.

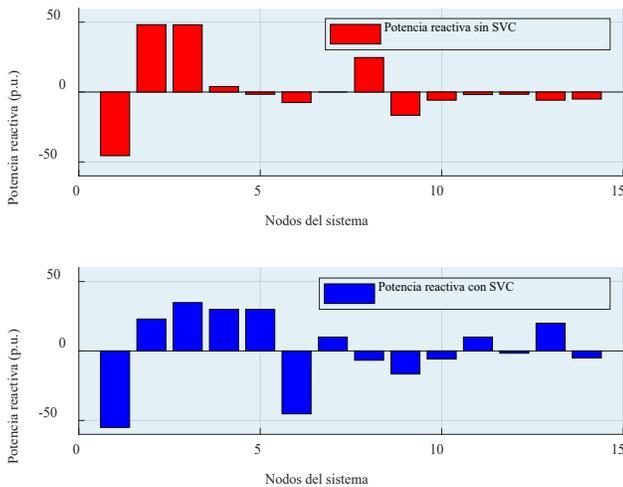


Figura 6. Potencia reactiva en los nodos del modelo IEEE 14 barras.

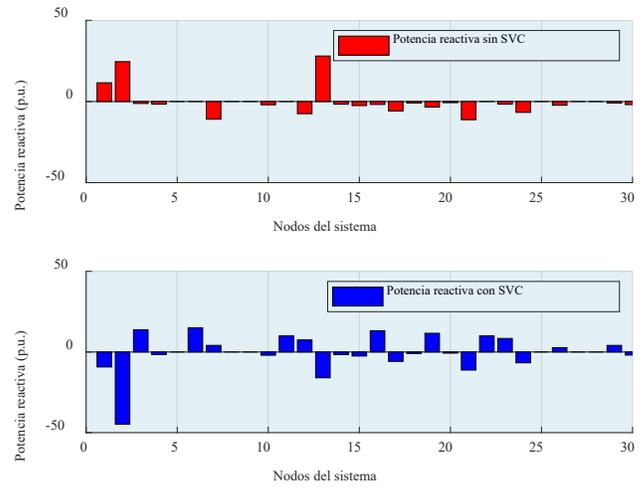


Figura 7. Potencia reactiva en los nodos del modelo IEEE 30 barras.

En la figura 6 y 7 se presentan las potencias reactivas en cada barra, sin SVC y con SVC, en donde se puede observar que al tener dispositivos SVC presentes en el sistema, las potencias reactivas en las barras se redistribuyen de forma que se alivia el flujo reactivo del sistema, es decir tanto en la generación y en las líneas de transmisión en los modelos del IEEE de 14 y 30 barras.

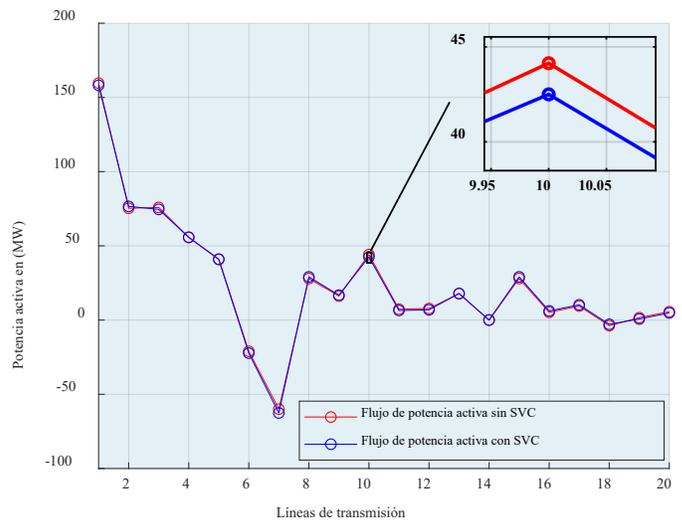


Figura 8. Flujo de potencia activa en las líneas de transmisión del modelo de 14 barras del IEEE.

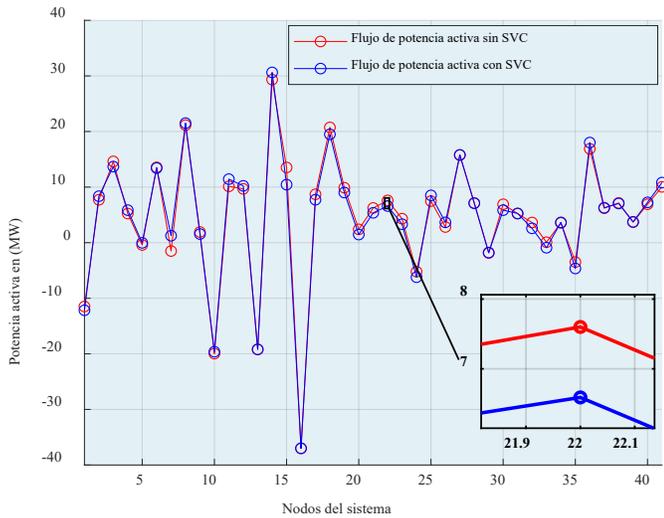


Figura 9. Flujo de potencia activa en las líneas de transmisión del modelo de 30 barras del IEEE.

En las figuras 8 y 9 podemos observar que, al insertar SVC en las barras de los sistemas, los flujos de potencia activa al igual que los flujos de potencias reactivas se redistribuyen, haciendo que las pérdidas de potencia en las líneas de transmisión disminuyan considerablemente en diferentes proporciones para cada una de las existentes.

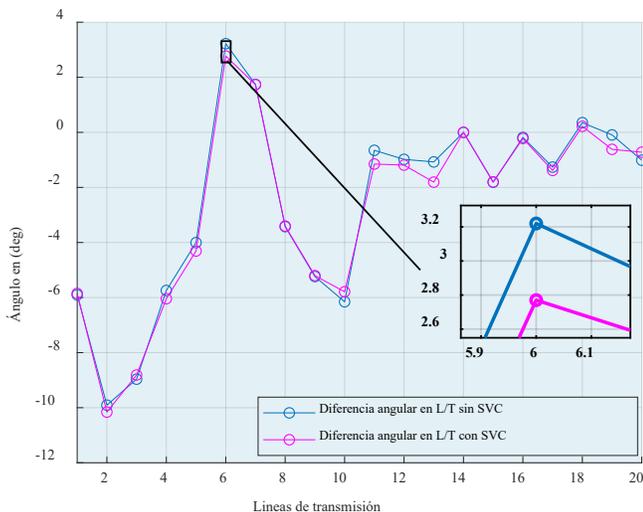


Figura 10. Diferencia angular en líneas de transmisión en el modelo de 14 barras del IEEE.

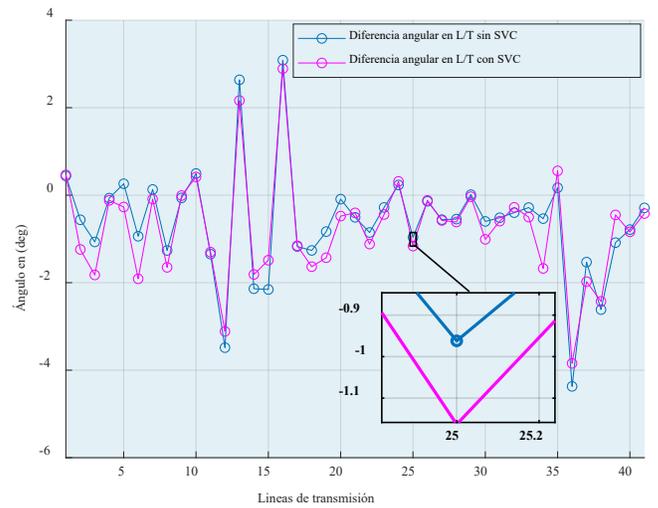


Figura 11. Diferencia angular en líneas de transmisión en el modelo de 30 barras del IEEE.

En las figuras 10 y 11 se observa la diferencia angular en que existen en las líneas de transmisión para cada uno de los modelos, en donde esta diferencia angular ayuda de una u otra forma a la estabilidad angular del sistema, al mismo tiempo que disminuye las pérdidas que ocurren en los flujos de potencias tanto activa como reactiva.

Esta diferencia angular hace que tanto pérdidas en potencia reactiva, como de potencia activa disminuyan considerablemente en cada una de las líneas de transmisión luego de colocar los SVC en las barras anteriormente dichas.

En el modelo del IEEE de 14 barras, las pérdidas de potencia reactiva disminuyen en un 1.23%, y de potencia activa disminuye en un 0.11% luego de colocar los SVC. A diferencia del modelo del IEEE de 30 barras, donde la reducción en las pérdidas de potencia reactiva en las líneas de transmisión llega a un 15.02% y en las pérdidas de potencia activa reducen en un 1.58%.

5. Conclusiones

Al finalizar el análisis previsto se observa que la ubicación de SVC que se realizó mediante herramientas de optimización logra la mínima implementación de dispositivos disminuyendo así, el costo de inversión; hay que tener en cuenta que, para cada modelo de sistemas eléctricos de potencia del IEEE la ubicación de los compensadores será diferente.

La implementación de los dispositivos SVC ayudan a mejorar los perfiles de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia en ciertas barras de tal manera que toman valores cercanos a 1 en (p.u.); teniendo así una mejora de 1.63% en el modelo del IEEE de 14 barras y una mejora de 7.75% en el modelo del IEEE de 30 barras.

Los beneficios que producen la implementación de estos dispositivos son: los flujos reactivos se redistribuyen de forma que disminuye la exigencia hacia los generadores, maximiza el rendimiento de las líneas de transmisión y mejora perfiles de tensión en las barras de los sistemas.

La implementación de dispositivos SVC en los diferentes modelos ayudan a disminuir pérdidas en las líneas de transmisión, no solo en pérdidas de potencia reactiva, sino también en las pérdidas de potencia reactiva debido a la diferencia angular que existe entre las barras.

REFERENCIAS

- [1] B. Singh, R. P. Payasi, y V. Shukla, "A taxonomical review on impact assessment of optimally placed DGs and FACTS controllers in power systems", *Energy Reports*, vol. 3, pp. 94–108, 2017.
- [2] N. Rawat, A. Bhatt, y P. Aswal, "A review on optimal location of FACTS devices in AC transmission system", *2013 Int. Conf. Power, Energy Control*, núm. ii, pp. 104–109, 2013.
- [3] R. Sirjani, A. Mohamed, y H. Shareef, "Optimal placement and sizing of Static Var Compensators in power systems using Improved Harmony Search Algorithm", núm. 7, pp. 214–218, 2011.
- [4] O. P. Mahela, D. Mittal, y L. Goyal, "Optimal Capacitor Placement Techniques in Transmission and Distribution Networks to Reduce Line Losses and Voltage Stability Enhancement : A Review", vol. 3, núm. 4, pp. 1–8, 2012.
- [5] V. Frolov, S. Backhaus, M. Chertkov, C. Analysis, y C. Murthy, "Optimal placement of FACTS devices using optimization techniques : A review Optimal placement of FACTS devices using optimization techniques : A review", 2018.
- [6] P. Choudekar, "Optimal location of SVC for improvement in voltage stability of a power system under normal and contingency condition", *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, 2017.
- [7] V. Kamaraj, "Enhancement of Voltage Stability by Optimal Location of Static Var Compensator Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization", vol. 5, núm. 1, pp. 70–77, 2014.
- [8] A. Hernandez, M. A. Rodriguez, E. Torres, y P. Eguia, "A Review and Comparison of FACTS Optimal Placement for Solving Transmission System Issues A Review and Comparison of FACTS Optimal Placement for Solving Transmission System Issues", núm. March, 2013.
- [9] M. M. Farsangi, H. Nezamabadi-pour, Y. Song, S. Member, y K. Y. Lee, "Placement of SVCs and Selection of Stabilizing Signals in Power Systems", vol. 22, núm. 3, pp. 1061–1071, 2007.
- [10] H. R. Baghaee *et al.*, "Improvement of Voltage Stability and Reduce Power System Losses by Optimal GA-based Allocation of Multi-type FACTS Devices", *11th Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equip.*, pp. 209–214, 2008.
- [11] M. Negnevitsky, "A Messy Genetic Algorithm Based Optimization Scheme for SVC Placement of Power Systems under Critical Operation Contingence", pp. 467–472, 2008.
- [12] K. Ravi, M. Rajaram, y B. Edward, "Hybrid Particle Swarm Optimization Technique for Optimal Location of FACTS devices using Optimal Power Flow", *Eur. J. Sci. Res. ISSN*, núm. October 2016, 2011.
- [13] V. K. Shende y P. P. P. Jagtap, "Optimal Location and Sizing of Static Var Compensator (SVC) by Particle Swarm Optimization (PSO) Technique for Voltage Stability Enhancement and Power Loss Minimization", vol. 4, núm. June, pp. 2278–2282, 2013.
- [14] P. S. Vaidya y V. P. Rajderkar, "Optimal Location of Series FACTS Devices for Enhancing Power System Security", *2011 Fourth Int. Conf. Emerg. Trends Eng. Technol.*, pp. 185–190, 2011.
- [15] K. Elango y S. R. Paranjothi, "Congestion management in restructured power systems by FACTS devices", vol. 1, núm. 4, pp. 767–776, 2011.
- [16] S. Sakthivel, D. Mary, y V. S. Kannan, "Optimal Location of SVC for Voltage Stability Enhancement under Contingency Condition through PSO Algorithm", vol. 20, núm. 1, pp. 30–36, 2011.
- [17] C. Jaramillo y D. Carrión, "Ubicación óptima de pmus basado en criterios de observabilidad y evaluación mediante búsqueda tabú", *Univ. Politécnica Sales.*, 2016.
- [18] E. Tenelema y C. Barrera, "Simulación de flujos de potencia en sistemas eléctricos de potencia usando métodos completos, desacoplados y linealizados".
- [19] D. Carrión y J. W. González, "Optimal PMU Location in Electrical Power Systems under N-1 Contingency", núm. 1, pp. 165–170, 2018.
- [20] J. Ramirez y D. Carrión, "Compensación reactiva en redes eléctricas de transmisión basado en ubicación óptima de svc y contingencia n-1", *Univ. Politécnica Sales.*, 2020.