

Modelo simplificado de compensador estático de potencia reactiva en el flujo de cargas con inyección de corriente



SIMPLIFIED MODEL OF STATIC VAR COMPENSATOR IN CURRENT INJECTION POWER FLOW

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7491> | Recibido: 03/12/2014 • Aceptado: 16/02/2015

Salah Kamel^{1,2} y Francisco Jurado¹

¹ UNIVERSIDAD DE JAÉN. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Calle Alfonso X, 28 - 23700 EPS Linares (Jaén). Tfno: +34 953648518. skamel@ujaen.es

² ASWAN UNIVERSITY. Department of Electrical Engineering. 81542 Aswan. EGYPT skamel@aswu.edu.eg

ABSTRACT

• This paper describes Newton-Raphson (NR) current injection power flow model of a Static Var Compensator (SVC) to reduce the complexities of the computer load flow program codes of a network containing this device. This model is based on power mismatch approach. The SVC controlled buses in the network are converted to PV buses with zero active power generation at the required voltage magnitudes. The power mismatch equations for these connected buses are included and updated in NR current injection load flow algorithm.

While, the load buses are represented by current mismatch equations. Moreover, the parameters of SVC can be calculated using an iterative process and the final value is updated after the convergence is achieved.

The developed SVC model enhances the reusability of load flow program by avoiding modifications in the Jacobian matrix. This model is considered the simplest and the best representation of shunt control devices. The feasibility of the SVC model has been validated on the WSCC 9-bus and IEEE 57-bus transmission systems.

• **Keywords:** FACTS, SVC, Current injection NR load flow.

RESUMEN

Este artículo describe el modelo en el flujo de cargas Newton-Raphson (NR) con inyección de corriente de un compensador estático de potencia reactiva (SVC) para reducir la complejidad de los códigos del programa del flujo de cargas de la red que contiene este dispositivo.

Este modelo se basa en el método de los residuos de potencia. Las barras controladas por SVC en la red se convierten en barras PV con generación de potencia activa cero con los módulos de tensión requeridos. Las ecuaciones de los residuos de potencia para estas barras conectadas se incluyen y actualizan en el algoritmo del flujo de cargas NR con inyección de corriente. Mientras, las barras de carga se representan por las ecuaciones de los residuos de corriente. Además, los parámetros del SVC pueden ser calculados usando un proceso iterativo y el valor se actualiza una vez alcanzada la convergencia.

El modelo de SVC mejora la reutilización del programa de flujo de cargas evitando las modificaciones de la matriz Jacobiana. Este modelo se considera la más simple y la mejor representación de los dispositivos de control en paralelo. La viabilidad del modelo SVC ha sido validada en los sistemas de transporte WSCC 9-barras e IEEE 57-barras.

Palabras Clave: FACTS, SVC, flujo de cargas Newton-Raphson con inyección de corriente.

1. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica se considera la forma más popular de energía, ya que se transporta fácilmente con una elevada eficiencia y a precio razonable. La electricidad juega un papel importante en la sociedad industrializada moderna. Los sistemas de potencia que proporcionan esta electricidad se están volviendo progresivamente más complicados y sofisticados. Estos sistemas contienen tres componentes principales: el sistema de generación, el sistema de transporte, y el sistema de distribución. Cada componente es esencial para suministrar la energía eléctrica desde el lugar de generación hasta el consumidor.

Con el rápido desarrollo de los sistemas de potencia, especialmente el uso cada vez mayor de instalaciones de transporte debido a una mayor producción industrial y la desregulación, se hace necesario explorar nuevas formas de maximizar la transferencia de potencia en las instalaciones de transporte existentes, mientras que al mismo tiempo se precisa mantener unos niveles aceptables de fiabilidad y estabilidad de la red.

Por otra parte, el rápido desarrollo de la electrónica de potencia ha convertido a los dispositivos FACTS en una prometedora solución para el sistema de potencia del futuro. Los FACTS se utilizan para controlar los flujos de potencia en una red de transporte con el fin de aumentar la capacidad de transferencia de potencia y mejorar el control.

El concepto de flexibilidad del transporte de energía eléctrica implica la capacidad para adaptarse a los cambios en el sistema de transporte eléctrico o a las condiciones de funcionamiento mientras se mantiene un estado estacionario y márgenes transitorios [1]. Los SVCs, uno de los dispositivos FACTS más importantes, se han utilizado durante los últimos años para mejorar la economía de la línea de transporte solventando los problemas dinámicos de tensión.

Los SVCs se caracterizan por su precisión, disponibilidad y rápida respuesta capaz de proporcionar un control de la tensión en régimen estacionario y transitorio en comparación con la compensación paralelo clásica. Los SVCs se utilizan también para amortiguar las oscilaciones de potencia, mejorar la estabilidad transitoria, y reducir las pérdidas del sistema optimizando el control de la potencia reactiva.

Se han publicado muchos trabajos que han incluido los dispositivos FACTS en el algoritmo del flujo de cargas [2-12]. En estos trabajos, los dispositivos FACTS como el SVC, el UPFC y el SSSC se suponen ideales despreciando las pérdidas de conmutación.

En general, la implementación de los dispositivos FACTS en los flujos de cargas existentes aumenta la complejidad de los códigos de programa [8-12]. Las siguientes modificaciones se requieren en el análisis de los flujos de carga con el fin de incorporar los dispositivos FACTS: en primer lugar, la incorporación de los FACTS en una línea de transporte requiere la adición de barras auxiliares en el sistema. En segundo lugar, las impedancias de los FACTS se deben incluir en la matriz de admitancias. En tercer lugar, las potencias aportadas por los dispositivos FACTS se deben incluir en las ecuaciones del flujo de cargas. Y por último, la matriz Jacobiana del sistema contiene nuevas sub-matrices que se relacionan exclusivamente con los dispositivos FACTS.

Debido a los requisitos anteriores, la investigación en este tema se ha dirigido a incorporar los FACTS con modificaciones mínimas en los códigos de los flujos de potencia convencionales. En [5-6], los parámetros de control de los FACTS se presentan como variables independientes y sus valores se encuentran a través del proceso iterativo del flujo de cargas. Este método aumenta el tamaño de la matriz Jacobiana con objeto de considerar las variables independientes adicionales. La convergencia del método se muestra muy sensible al valor inicial de los parámetros de control del FACTS [7]. Otras técnicas no tienen la capacidad de juzgar si los parámetros están dentro de los límites preestablecidos [3]. Para reducir la complejidad de los códigos de programación, y mejorar la capacidad de reutilización, se desarrollaron modelos de FACTS indirectos en [8-10]. En estos modelos, los FACTS se representan mediante una red equivalente aumentada. El programa que implementa el método NR se ajusta para incluir los modelos de FACTS, sin embargo también en estos modelos, se deben crear unos nuevos códigos relativos a los FACTS.

Este artículo se centra en el desarrollo del modelo para el SVC y su implementación en el flujo de cargas NR con inyec-

ción de corriente. El modelo del SVC se basa en el método del residuo de potencia. La principal ventaja de este modelo es evitar la modificación de la matriz Jacobiana y la mejora de la capacidad de reutilización del programa del flujo de cargas con el SVC.

2. MODELO DE INYECCIÓN DE POTENCIA DEL SVC

Un SVC es un generador o receptor de potencia reactiva conectado en derivación cuya salida se ajusta para intercambiar corriente capacitiva o inductiva a fin de mantener o controlar la tensión de la barra específica del sistema de potencia. El SVC puede proporcionar una regulación de tensión suave y continua, que evita el colapso de tensión, mejora la estabilidad del transporte y amortigua las oscilaciones de potencia [1, 5, 13, 14].

En este trabajo se tratará sólo la aplicación del SVC para el control de la tensión de una barra específica utilizando el flujo de cargas. El SVC combina un banco de condensadores en paralelo con una inductancia controlada por tiristor, como se muestra en la Fig. 1. El SVC se modela como una admitancia variable, como se indica en la Fig. 2.

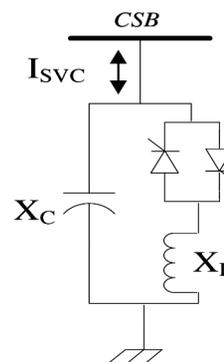


Fig. 1: Diagrama esquemático del SVC

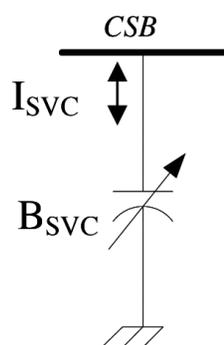


Fig. 2: Circuito equivalente del SVC.

El modelo propuesto de residuos de potencias se basa en la conversión de la barra conectada del sistema (CSB) a barra de generación (barra PV) con potencia activa inyectada nula y con el módulo de tensión deseado, tal como se describe en la Fig. 3. Por otra parte, las barras PQ se representan como

ecuaciones de residuos de corriente real e imaginaria, de forma similar al flujo de cargas clásico NR con inyección de corriente [15, 16]. También, el resto de barras PV se representan mediante las ecuaciones de residuos [17, 18]. Los parámetros del SVC se puede calcular tras un proceso iterativo y el valor final se actualiza una vez que la convergencia se alcanza.

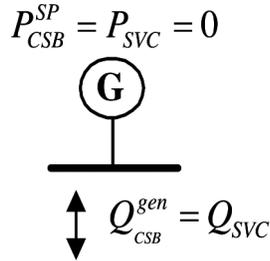


Fig. 3: Modelo de inyección de potencia del SVC

3. FLUJO DE CARGAS NR CON INYECCIÓN DE CORRIENTE CON EL MODELO DE SVC DESARROLLADO

De esta forma, el modelo de SVC se puede integrar fácilmente. La barra conectada se convierte en barra PV con el valor de la tensión especificado. El algoritmo se indica en (2) con las ecuaciones para las barras PV y CSB. La inyección de corriente compleja se supone en la barra PQ y se puede expresar por (1).

$$I_t = I_t^{sp} - \left(\frac{P_t^{sp} - jQ_t^{sp}}{E_t^*} - \sum_{i=1}^n Y_{ti} E_i \right) \quad (1)$$

Así, (1) se puede reescribir con partes real e imaginaria,

$$I_{rt} = I_{rt}^{sp} - \left(\frac{P_t^{sp} V_{rt} + Q_t^{sp} V_{mt}}{V_{rt}^2 + V_{mt}^2} \right) + \sum_{i=1}^n (G_{ti} V_{ri} - B_{ti} V_{mi}) \quad (3)$$

$$I_{mt} = I_{mt}^{sp} - \left(\frac{P_t^{sp} V_{mt} - Q_t^{sp} V_{rk}}{V_{rt}^2 + V_{mt}^2} \right) + \sum_{i=1}^n (G_{ti} V_{mi} - B_{ti} V_{ri}) \quad (4)$$

La potencia activa en la barra PV (k) se calcula mediante (5),

$$P_k = \sum_{i=1}^n |V_k| |V_i| (G_{ki} \cos \delta_{ki} + B_{ki} \sin \delta_{ki}) \quad (5)$$

Los elementos de la matriz Jacobiana

a) Barras PQ. Elementos que no pertenecen a la diagonal

$$\frac{\partial I_{mt}}{\partial V_{ri}} = B_{ti} \quad (6)$$

$$\frac{\partial I_{rt}}{\partial V_{mi}} = -B_{ti} \quad (7)$$

$$\frac{\partial I_{mt}}{\partial V_{mi}} = G_{ti} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{m1} \\ \Delta I_{r1} \\ \Delta I_{m2} \\ \Delta I_{r2} \\ \vdots \\ \Delta P_{PV} \\ \vdots \\ \Delta P_{CSB} \\ \vdots \\ \Delta I_{mn} \\ \Delta I_{rn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{m1}}{\partial V_{r1}} & \frac{\partial I_{m1}}{\partial V_{m1}} & \frac{\partial I_{m1}}{\partial V_{r2}} & \frac{\partial I_{m1}}{\partial V_{m2}} & \dots & \frac{\partial I_{m1}}{\partial \delta_{PV}} & \dots & \frac{\partial I_{m1}}{\partial \delta_{CSB}} & \dots & \dots & \frac{\partial I_{m1}}{\partial V_m} & \frac{\partial I_{m1}}{\partial V_{mn}} \\ \frac{\partial I_{r1}}{\partial V_{r1}} & \frac{\partial I_{r1}}{\partial V_{m1}} & \frac{\partial I_{r1}}{\partial V_{r2}} & \frac{\partial I_{r1}}{\partial V_{m2}} & \dots & \frac{\partial I_{r1}}{\partial \delta_{PV}} & \dots & \frac{\partial I_{r1}}{\partial \delta_{CSB}} & \dots & \dots & \frac{\partial I_{r1}}{\partial V_m} & \frac{\partial I_{r1}}{\partial V_{mn}} \\ \frac{\partial I_{m2}}{\partial V_{r1}} & \frac{\partial I_{m2}}{\partial V_{m1}} & \frac{\partial I_{m2}}{\partial V_{r2}} & \frac{\partial I_{m2}}{\partial V_{m2}} & \dots & \frac{\partial I_{m2}}{\partial \delta_{PV}} & \dots & \frac{\partial I_{m2}}{\partial \delta_{CSB}} & \dots & \dots & \frac{\partial I_{m2}}{\partial V_m} & \frac{\partial I_{m2}}{\partial V_{mn}} \\ \frac{\partial I_{r2}}{\partial V_{r1}} & \frac{\partial I_{r2}}{\partial V_{m1}} & \frac{\partial I_{r2}}{\partial V_{r2}} & \frac{\partial I_{r2}}{\partial V_{m2}} & \dots & \frac{\partial I_{r2}}{\partial \delta_{PV}} & \dots & \frac{\partial I_{r2}}{\partial \delta_{CSB}} & \dots & \dots & \frac{\partial I_{r2}}{\partial V_m} & \frac{\partial I_{r2}}{\partial V_{mn}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{r1}} & \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{m1}} & \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{r2}} & \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{m2}} & \dots & \frac{\partial P_{PV}}{\partial \delta_{PV}} & \dots & \frac{\partial P_{PV}}{\partial \delta_{CSB}} & \vdots & \vdots & \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_m} & \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{mn}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_{CSB}}{\partial V_{r1}} & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial V_{m1}} & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial V_{r2}} & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial V_{m2}} & \dots & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial \delta_{PV}} & \dots & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial \delta_{CSB}} & \dots & \dots & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial V_m} & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial V_{mn}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_{CSB}}{\partial V_{r1}} & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial V_{m1}} & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial V_{r2}} & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial V_{m2}} & \dots & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial \delta_{PV}} & \dots & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial \delta_{CSB}} & \dots & \dots & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial V_m} & \frac{\partial P_{CSB}}{\partial V_{mn}} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial I_{mn}}{\partial V_{r1}} & \frac{\partial I_{mn}}{\partial V_{m1}} & \frac{\partial I_{mn}}{\partial V_{r2}} & \frac{\partial I_{mn}}{\partial V_{m2}} & \dots & \frac{\partial I_{mn}}{\partial \delta_{PV}} & \dots & \frac{\partial I_{mn}}{\partial \delta_{CSB}} & \dots & \dots & \frac{\partial I_{mn}}{\partial V_m} & \frac{\partial I_{mn}}{\partial V_{mn}} \\ \frac{\partial I_{rn}}{\partial V_{r1}} & \frac{\partial I_{rn}}{\partial V_{m1}} & \frac{\partial I_{rn}}{\partial V_{r2}} & \frac{\partial I_{rn}}{\partial V_{m2}} & \dots & \frac{\partial I_{rn}}{\partial \delta_{PV}} & \dots & \frac{\partial I_{rn}}{\partial \delta_{CSB}} & \dots & \dots & \frac{\partial I_{rn}}{\partial V_m} & \frac{\partial I_{rn}}{\partial V_{mn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{r1} \\ \Delta V_{m1} \\ \Delta V_{r2} \\ \Delta V_{m2} \\ \vdots \\ \Delta \delta_{PV} \\ \vdots \\ \Delta \delta_{CSB} \\ \vdots \\ \Delta V_{rm} \\ \Delta V_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\frac{\partial I_{ri}}{\partial V_{ri}} = G_{ri} \quad (9)$$

Elementos de la diagonal principal

$$\frac{\partial I_{mt}}{\partial V_{rt}} = B_{rt} - \left[\frac{Q_t^{sp} (V_{rt}^2 - V_{mt}^2) - 2P_t^{sp} V_{rt} V_{mt}}{V_t^4} \right] \quad (10)$$

$$\frac{\partial I_{rt}}{\partial V_{mt}} = -B_{rt} - \left[\frac{Q_t^{sp} (V_{rt}^2 - V_{mt}^2) - 2P_t^{sp} V_{rt} V_{mt}}{V_t^4} \right] \quad (11)$$

$$\frac{\partial I_{mt}}{\partial V_{mt}} = G_{rt} - \left[\frac{P_t^{sp} (V_{rt}^2 - V_{mt}^2) + 2V_{rt} V_{mt} Q_t^{sp}}{V_t^4} \right] \quad (12)$$

$$\frac{\partial I_{rt}}{\partial V_{rt}} = G_{rt} + \left[\frac{P_t^{sp} (V_{rt}^2 - V_{mt}^2) + 2V_{rt} V_{mt} Q_t^{sp}}{V_t^4} \right] \quad (13)$$

Donde,

$$P_t^{sp} = P_t^G - P_t^L \quad (14)$$

$$Q_t^{sp} = Q_t^G - Q_t^L \quad (15)$$

Estos parámetros se actualizan durante el proceso iterativo en la solución del flujo de cargas.

b) Barras PV y CSB

Los elementos de la matriz Jacobiana relacionados con las barras PV y CSB se puede expresar

El algoritmo

- 1 | Inicializar las tensiones y ángulos
- 2 | Construir la matriz de admitancias Y-Barra
- 3 | **Convertir la barra conectada del SVC a barra PV con el valor especificado**
 | Determinar ΔI_r e ΔI_m para las barras PQ y ΔP para los tipos PV y CSB
 Si $(\Delta P_{max} \text{ y } \Delta Q_{max} \leq \text{tolerancia})$
 | Ir al paso 4
 De lo contrario
 | Resolver el flujo de cargas (1)
 | **calcular Q_{svc} entonces actualizar B_{svc} usando (23)**
 | terminar si
 Si $h \geq$ número máximo de iteraciones
- 4 | Ir al paso 4
 De lo contrario
 | Ir al paso 3
 | terminar si
 Imprimir los resultados incluyendo el **valor final de B_{svc}**

Tabla 1: Algoritmo para el flujo de cargas NR inyección de corriente con SVC

Elementos que no pertenecen a la diagonal

$$\frac{\partial I_{mt}}{\partial \delta_k} = V_k (G_{tk} \cos \delta_k - B_{tk} \sin \delta_k) \quad (16)$$

$$\frac{\partial I_{rt}}{\partial \delta_k} = -V_k (G_{tk} \sin \delta_k + B_{tk} \cos \delta_k) \quad (17)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{mt}} = V_k (G_{kt} \sin \delta_k - B_{kt} \cos \delta_k) \quad (18)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{rt}} = V_k (G_{kt} \cos \delta_k + B_{kt} \sin \delta_k) \quad (19)$$

Elementos de la diagonal principal

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = -V_k \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n V_i (G_{ki} \sin \delta_{ki} - B_{ki} \cos \delta_{ki}) \quad (20)$$

Después de la solución del flujo de cargas en (1), la potencia reactiva generada en la barra CSB se calcula usando (21).

$$Q_{CSB}^{gen} = \sum_{i=1}^n |V_{CSB}| |V_i| \left(\begin{matrix} G_{CSB,i} \sin \delta_{CSB,i} \\ B_{CSB,i} \cos \delta_{CSB,i} \end{matrix} \right) + Q_{CSB}^l \quad (21)$$

Este valor es igual a la potencia reactiva generada por el SVC.

$$Q_{svc} = Q_{CSB}^{gen} \quad (22)$$

Entonces, el parámetro (B_{svc}) requerido para el control del SVC se calcula mediante un proceso iterativo mediante (23),

$$B_{svc} = -\frac{Q_{svc}}{V_{CSB}^2} \quad (23)$$

El proceso computacional se indica en la Tabla 1. Se puede observar que el modelo desarrollado no requiere ninguna modificación de la matriz Jacobiana. El SVC se puede añadir sin ningún cambio en los componentes principales del algoritmo de flujo de cargas. Por lo tanto, se reducirán el tiempo de cálculo y el tamaño necesario de la memoria. Por último, el modelo mejora la reutilización del programa de flujo de cargas.

4. RESULTADOS

El método propuesto se ha probado en el sistema de 9 barras del *Western System Coordinating Council* (WSCC) [20] y en el sistema de 57 barras del IEEE. Para todos los casos, la tolerancia de la convergencia es 10^{-4} para la potencia activa y reactiva. Toda la programación se ha escrito en C++. Además, la biblioteca SuperLU se ha utilizado para realizar todos los cálculos matriciales [19].

A. Sistema de 9 barras del WSCC

El diagrama unifilar del sistema WSCC 9 se indica en la Fig. 4. El sistema consta de tres generadores en las barras 1, 2 y 3. La barra 1 es considerada como la barra de compensación (slack). El SVC funcionando en el modo de control de tensión se conecta a la barra 9. El objetivo del control es mantener la tensión en el barra 9 igual a 1.04 p.u. La Tabla 2 proporciona los módulos de las tensiones y los ángulos de fase para todas las barras del sistema con y sin SVC. Las Figs. 5 y 6 muestran la convergencia para la solución iterativa con y sin SVC. Se puede observar que los dos casos presentan una convergencia

aceptable. Por tanto, se considera que el modelo propuesto es adecuado. El valor final de la susceptancia equivalente para el SVC se calcula después de la convergencia y se presenta en la Tabla 3.

Este sistema se ha seleccionado para representar un sistema a gran escala [21]. Se han ubicado los SVCs en tres barras (19, 41 y 57). Las posiciones de los SVC se muestran en la Fig. 7. Los SVC se sitúan en estas barras con objeto de mantener los valores de tensión en 1.04 p.u. Los resultados (con y sin SVC) se presentan en la Tabla 4. Las características de la convergencia se muestran en las Figs. 8 y 9. Los flujos de

Barra No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sin SVC	V (p.u)	1.0400	1.0250	1.0250	1.0259	0.9961	1.0124	1.0274	1.0199	1.0311
	δ (grado)	0.0000	9.5276	4.3876	-2.2166	-3.8936	-3.7883	3.9767	1.0686	1.6866
Con SVC	V (p.u)	1.0400	1.0250	1.0250	1.0279	0.9986	1.0171	1.0304	1.0265	1.0400
	δ (grado)	0.0000	9.4474	4.2514	-2.2113	-3.8917	-3.7903	3.9128	1.5735	

Tabla 2: Módulos de las tensiones y ángulos de fase para el sistema de 9 barras del WSCC sin y con SVC

	WSCC 9-barras	IEEE 57-barras
	SVC	SVC (1) SVC (2)
B_{svc} (p.u)	0.2116	0.1634 0.2066 0.2059

Tabla 3: La susceptancia equivalente del SVC después de la convergencia

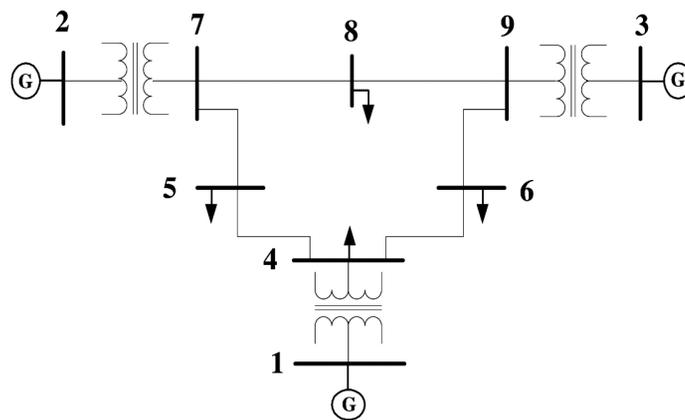


Fig. 4: Sistema de 9 barras del WSCC

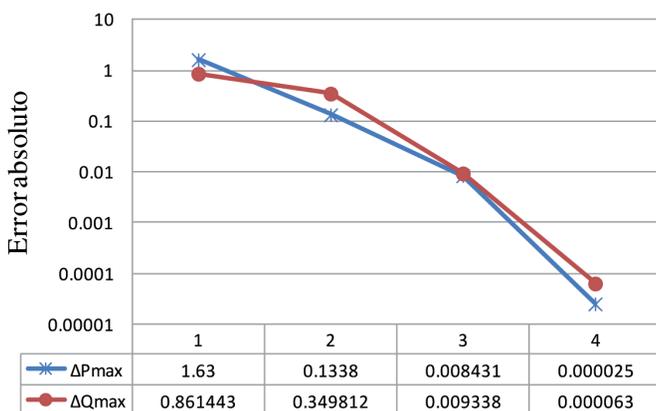


Fig. 5: Convergencia del sistema de 9 barras del WSCC sin SVC

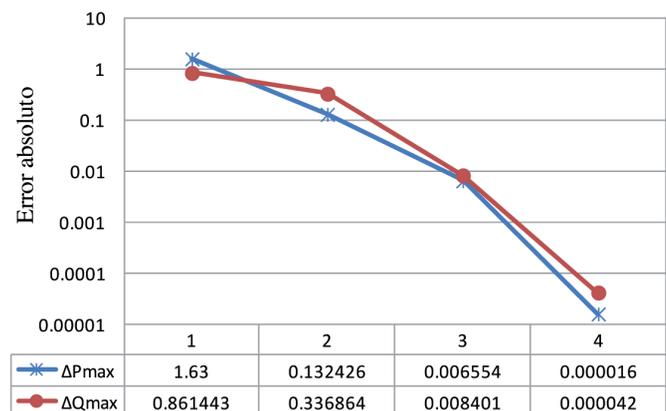


Fig. 6: Convergencia del sistema de 9 barras del WSCC con SVC

cargas con y sin SVCs convergen en 3 iteraciones. El valor final de la susceptancia equivalente para el SVC se indica en la Tabla 4.

5. CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado el modelo para el flujo de cargas NR con inyección de corriente de un SVC. Los residuos

Barra No.	Sin SVC		Con SVC		Tipo de Barra
	V (p.u)	δ (grado)	V (p.u)	δ (grado)	
1	1.0400	0.0000	1.0400	0.0000	Slack
2	1.0100	-1.1961	1.0100	-1.1910	PV
3	0.9850	-6.0212	0.9850	-6.0001	PV
4	0.9804	-7.3872	0.9833	-7.4038	PQ
5	0.9764	-8.6247	0.9773	-8.5863	PQ
6	0.9800	-8.7659	0.9800	-8.7031	PV
7	0.9820	-7.7102	0.9833	-7.6522	PQ
8	1.0050	-4.5562	1.0050	-4.4899	PV
9	0.9800	-9.6238	0.9800	-9.5580	PV
10	0.9834	-11.5249	0.9856	-11.4527	PQ
11	0.9730	-10.2212	0.9878	-10.4201	PQ
12	1.0150	-10.4817	1.0150	-10.4279	PV
13	0.9815	-9.8149	0.9881	-9.8834	PQ
14	0.9738	-9.3339	0.9812	-9.4235	PQ
15	0.9873	-7.1926	0.9919	-7.2512	PQ
16	1.0134	-8.8663	1.0134	-8.8278	PQ
17	1.0174	-5.3996	1.0175	-5.3796	PQ
18	0.9711	-12.0944	1.0014	-11.9244	PQ
19	0.9333	-13.6951	1.0400	-15.9126	PQ→PV
20	0.9229	-13.9334	1.0042	-14.9478	PQ
21	0.9214	-13.5635	0.9529	-14.3104	PQ
22	0.9218	-13.4992	0.9463	-13.9146	PQ
23	0.9201	-13.5709	0.9444	-13.9744	PQ
24	0.9087	-13.8912	0.9277	-14.1377	PQ
25	0.8793	-20.0149	0.9057	-19.9505	PQ
26	0.9101	-13.5307	0.9277	-13.8015	PQ
27	0.9385	-11.9760	0.9471	-12.0318	PQ
28	0.9560	-10.8729	0.9613	-10.8516	PQ

Barra No.	Sin SVC		Con SVC		Tipo de Barra
	V (p.u)	δ (grado)	V (p.u)	δ (grado)	
29	0.9713	-10.1198	0.9745	-10.0423	PQ
30	0.8560	-20.7178	0.8847	-20.6725	PQ
31	0.8239	-21.6100	0.8573	-21.6596	PQ
32	0.8371	-20.5535	0.8751	-20.9356	PQ
33	0.8345	-20.6046	0.8727	-20.9824	PQ
34	0.8745	-15.1353	0.9173	-16.0080	PQ
35	0.8821	-14.8564	0.9250	-15.7756	PQ
36	0.8926	-14.5414	0.9353	-15.5053	PQ
37	0.9008	-14.2752	0.9405	-15.1679	PQ
38	0.9251	-13.3445	0.9484	-13.6961	PQ
39	0.8992	-14.3311	0.9422	-15.3688	PQ
40	0.8914	-14.6131	0.9377	-15.6747	PQ
41	0.9330	-14.9282	1.0400	-14.6009	PQ→PV
42	0.8910	-16.4266	1.0115	-16.1895	PQ
43	0.9604	-11.5952	1.0003	-11.7226	PQ
44	0.9375	-12.4211	0.9569	-12.6763	PQ
45	0.9754	-9.6915	0.9868	-9.7480	PQ
46	0.9601	-11.3031	0.9725	-11.3639	PQ
47	0.9377	-12.9412	0.9549	-13.0543	PQ
48	0.9340	-13.0958	0.9528	-13.2799	PQ
49	0.9400	-13.3301	0.9553	-13.3881	PQ
50	0.9311	-13.9105	0.9426	-13.8874	PQ
51	0.9722	-12.8712	0.9763	-12.7546	PQ
52	0.9333	-11.9011	0.9359	-11.8163	PQ
53	0.9198	-12.6799	0.9221	-12.5929	PQ
54	0.9399	-11.9984	0.9412	-11.9141	PQ
55	0.9699	-10.9186	0.9703	-10.8376	PQ
56	0.8830	-16.8531	1.0133	-16.9411	PQ
57	0.8745	-17.4695	1.0400	-18.5227	PQ→PV

Tabla 4: Módulos de las tensiones y ángulos de fase para el sistema de 59 barras del IEEE

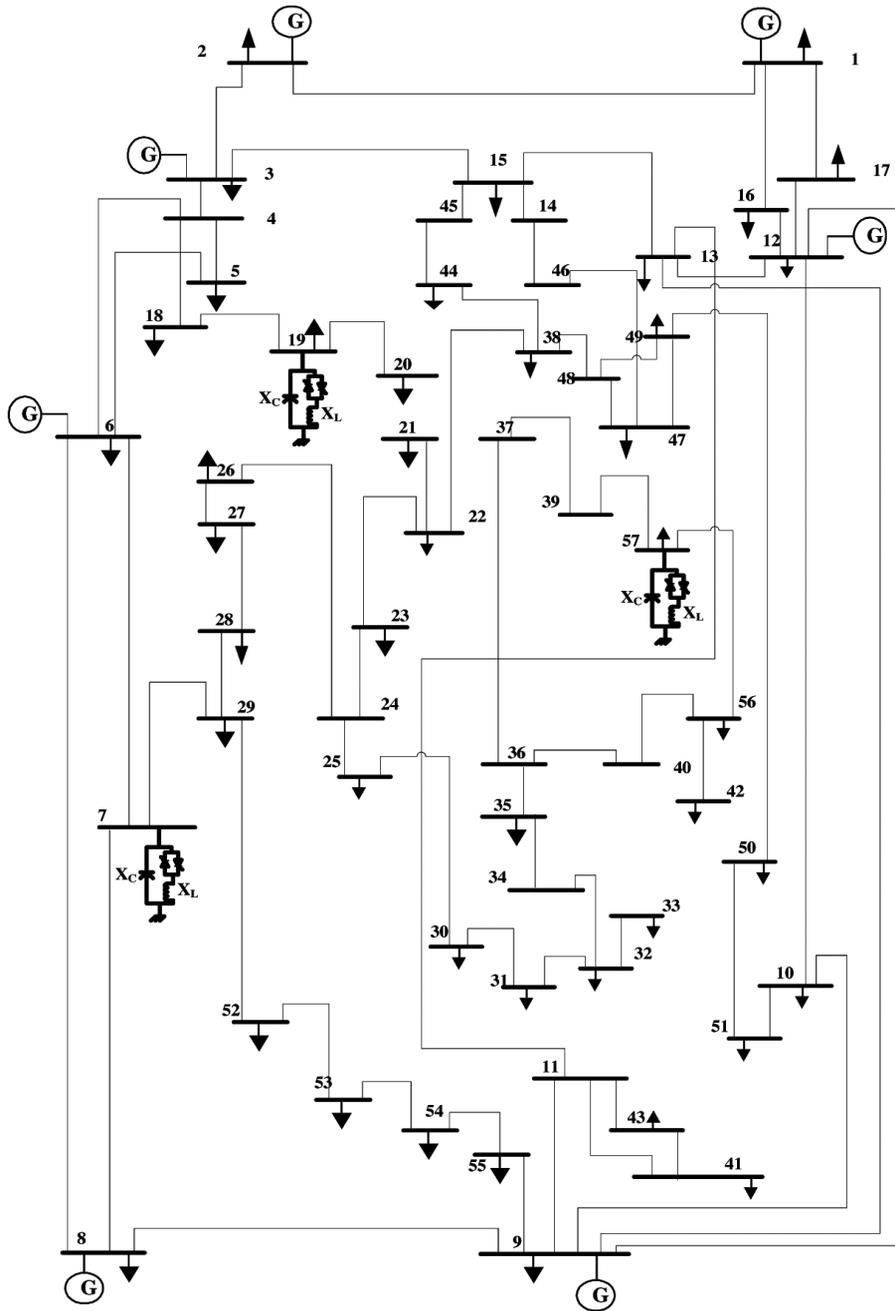


Fig. 7: Sistema de 57 barras del IEEE

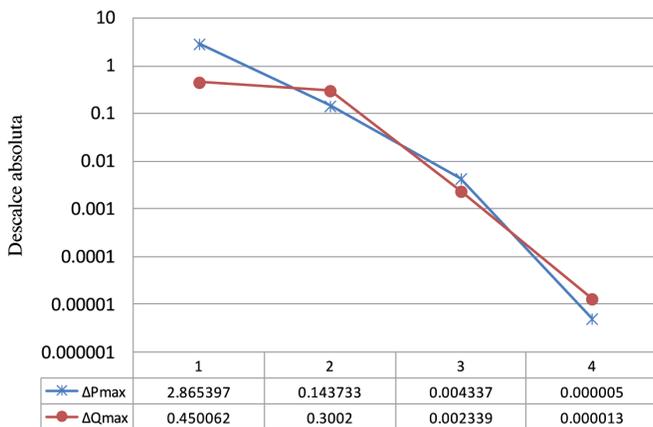


Fig. 8: Convergencia del sistema de 57 barras del IEEE sin SVCs

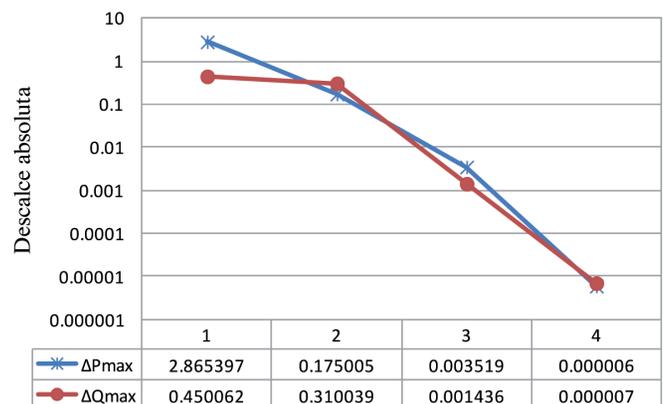


Fig. 9: Convergencia del sistema de 57 barras del IEEE con SVCs.

de potencia se actualizan en cada iteración, mientras que las barras de carga se representan mediante ecuaciones de residuos o errores de corriente. Además, los parámetros del SVC se pueden calcular mediante un proceso iterativo y el valor final se actualiza una vez que la convergencia se logra. El modelo se considera más adecuado para dispositivos FACTS en derivación.

El modelo ha mejorado la reutilización de la programación del flujo de cargas, evitando la modificación de la matriz Jacobiana. También en el flujo de cargas sólo una ecuación se requiere para representar la barra controlada en la formulación de inyección de corriente. El modelo de SVC ha sido validado utilizando el sistema de 9 barras del WSCC y el sistema de 57 barras del IEEE con un comportamiento excelente de la convergencia.

NOMENCLATURA

FACTS	Flexible AC Transmission Systems
IEEE	Institute of Electrical Electronic Engineering
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
SVC	Static VAR Compensator

UPFC	Unified Power Flow Controller
WSCC	Western System Coordinating Council
BSVC	Susceptancia del SVC
CSB	Barra conectada del sistema
G, B	Partes real e imaginaria de la matriz de admitancia
gen	Subíndices relativos a los valores generados
I	Corriente inyectada
I_{SVC}	Corriente inyectada del SVC
k, i, t	Subíndices relativos a las barras
n	Número total de barras
P, Q	Potencia activa y reactiva
r, m	Subíndices relativos a las partes real e imaginaria
sp	Subíndices relativos a los valores especificados
X_c	Reactancia capacitiva
X_L	Reactancia inductiva
V	Módulo de la tensión de barra
δ	Angulo de la tensión de barra
Δ	Errores de las variables
barra PV	barra cuyos valores son la potencia activa P y el módulo de tensión V

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Zhang XP, Rehtanz C, Pa B. "Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control". Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [2] Zhang XP. "Modelling of the Interline Power Flow Controller and the generalized unified power flow controller in Newton power flow". IEE Proceedings of Generation, Transmission, and Distribution, May. 2003. Vol. 150. No. 3. P. 268–274.
- [3] Nabavi-Niaki A, Iravani MR. "Steady State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power System Studies". IEEE Transactions on Power Systems. November 1996. Vol. 11. No. 4. P. 1937–1943.
- [4] Gyugyi L, Schauder CD, Sen KK. "Static synchronous series compensator: a solid state approach to the series compensation of transmission lines". IEEE Transactions on Power Delivery. January 1997. Vol. 12, No. 1, P. 406–417.
- [5] Amhriz-Perez H, Acha E, Fuerte-Esquivel CR. "Advanced SVC Models for Newton-Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies". IEEE Transactions on Power Systems. February 2000. Vol. 15. NO. 1. P. 129 – 136.
- [6] Fuerte-Esquivel R, Acha E, Ambriz-Perez H. "A comprehensive Newton-Raphson UPFC model for the quadratic power flow solution of Practical power networks". IEEE Transactions on Power Systems. February 2000. Vol. 15. No. 1. P. 102–109.
- [7] Fuerte-Esquivel R, Acha E. "Unified power flow controller: a Critical comparison of Newton-Raphson UPFC algorithms in Power flow studies". IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution. September 1997. Vol. 144. No. 5. P. 437–444.
- [8] Bhowmick S, Das B, Kumar N. "An Indirect UPFC Model to Enhance Reusability of Newton Power Flow Code". IEEE Transactions on Power Delivery. October 2008. Vol. 23. NO.4. P. 2079 – 2088.
- [9] Bhowmick S, Das B, Kumar N. "An Advanced IPFC Model to Reuse Newton Power Flow Codes," IEEE Transactions on Power Systems. May 2009. Vol. 24. No. 2. P. 525–532.
- [10] Bhowmick S, Das B, Kumar N. "An Advanced Static Synchronous Compensator Model to Reuse Newton and Decoupled Power Flow Codes," Electric Power Components and Systems. October 2011. Vol. 39. P.1647–1666.
- [11] Nor KM, Mokhlis H, Ghani T. "Reusability Techniques in Load Flow Analysis Computer Program". IEEE Transactions of Power Systems. November 2004. Vol. 19. No. 4. P. 1754–1762.
- [12] Haque MH, Yam CM. "A simple method of solving the controlled load flow problem of a power system in the presence of UPFC". Electric Power Systems Research. April 2003. Vol. 65. P.55–62.
- [13] Mondal M, Chakrabarti A, Sengupta A. "Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem". Electric Power Systems Research. November 2012. Vol. 42. P. 334–340.
- [14] Jurado F, Rodriguez JA. "Optimal location of SVC based on system loadability and contingency analysis". IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA. 1999. P.1193–1199.
- [15] da Cost V M, Martins N, Pereira JLR. "Developments in the Newton-Raphson power flow formulation based on current injections". IEEE Transactions on Power Systems. November 1999. Vol. 14. No. 4. P. 1320–1326.
- [16] Kamel S, Jurado F. "Power Flow Analysis with Easy Modeling of Interline Power Flow Controller". Electric Power Systems Research. March 2014. Vol. 108. P. 234–244.
- [17] Kamel S, Abdel-Akher M, Jurado F, RuizRodriguez FJ. "Modeling and Analysis of Voltage and Power Control Devices in Current Injections Load Flow Method". January 2013. Electric Power Components and Systems. Vol. 41. P. 324–344.
- [18] Kamel S, Abdel-Akher M, Jurado F. "Improved NR Current Injection Load Flow Using Power Mismatch Representation of PV Bus". International Journal of Electrical Power and Energy Systems. December 2013. Vol. 53. P. 64–68.
- [19] Demmel JW, Gilbert JR. SuperLU User Guide. <https://www.nersc.gov/users/software/programming-libraries/math-libraries/tpsl/>
- [20] Radman G, Raju RS. "Dynamic model for power systems with multiple FACTS controllers". Electric Power Systems Research. March 2008. Vol. 78, P. 361–371.
- [21] Power systems test case archive. University of Washington, Seattle. [Online]. Available: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.