

EFFECTO DE UN COMPENSADOR DE VAR ESTATICO EN EL AMORTIGUAMIENTO DE LAS OSCILACIONES

RESUMEN

Se utiliza un sistema de control de vars estático (SVC), conformado por un condensador fijo y una reactancia controlada por tiristores para ampliar los límites de estabilidad del sistema eléctrico. El SVC se conecta en el barraje del generador y se utilizan la tensión y la velocidad como señales de entrada. El esquema es aplicado a una máquina sincrónica conectada a un barraje infinito a través de una línea de transmisión. Se muestran los resultados obtenidos a través de simulación digital.

PALABRAS CLAVES: SVC, FACTS, TCR, Compensador estático

ABSTRACT

An SVC composed by a fixed capacitor and a reactor controlled by thyristors is used to increase the stability limits of one electric system. This SVC is placed at the generator bus terminal and the voltage and velocity signals are used as its input signals. This scheme is applied in an electric system composed by a synchronous machine connected to an infinite bus and the results are obtained using simulation.

KEYWORDS: SVC, FACTS, TCR, Static Compesator

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia han visto limitado su crecimiento debido a diversos factores entre ellos del tipo ambiental, económico y operativo. Con la liberación del sector eléctrico los diferentes entes generadores, y distribuidores deben aprovechar mejor la infraestructura existente y a la vez mejorar la confiabilidad en la prestación del servicio. Esto lleva a que el sistema trabaje en puntos cercanos a su límite de operación, por lo que es necesario utilizar dispositivos que permitan no sólo ampliar los límites de estabilidad del sistema sino a la vez mejorar algunos de los parámetros de operación.

Los compensadores de VARs estático han sido una alternativa para alcanzar los objetivos planteados en el párrafo anterior. Estos están basados en dispositivos de estado sólido, que los hace más económicos, confiables y de operación rápida [1] y se han venido aplicando cada vez mas en los sistemas eléctricos de potencia.

Los análisis de operación del sistema conformado por una maquina sincrónica conectada a un barraje infinito a través de una línea de transmisión para operación con pequeña señal han sido planteados desde hace algún tiempo y allí se han establecido los criterios básicos para garantizar la estabilidad de pequeña señal. Para estos análisis se utilizan modelos lineales de los componentes del sistema eléctrico.

El propósito del SVC es del mantener un perfil adecuado de tensión en el sistema eléctrico, proveer de un medio de generación o absorción de reactivos, y a la vez, ampliar los límites de estabilidad del sistema eléctrico. También se

ALFONSO ALZATE G.

Profesor Titular.

Universidad Tecnológica de Pereira

alalzate@utp.edu.co

JOHN ASDRUBAL HERRERA V.

Profesor Facultad de Tecnología

Universidad Tecnológica de Pereira.

asdru@utp.edu.co

OMAR E. CASTRO H.

Profesor Facultad de Tecnología

Universidad Tecnológica de Pereira.

ramo@utp.edu.co

puede pensar en el SVC como una alternativa para mejorar el amortiguamiento del sistema y tener una buena regulación de la tensión.

El esquema utilizado en este trabajo contiene una parte para el control de los reactivos y un compensador adicional del tipo PI para amortiguar las oscilaciones que aparecen cuando se presenta una perturbación. Este esquema provoca una variación en los coeficientes del modelo linealizado planteado en [5], tal que el torque sincronizador es positivo y esto asegura la estabilidad.

En la figura 1 se muestra la forma de conexión del SVC en el sistema conformado por una máquina sincrónica conectada a un barraje infinito a través de una línea de transmisión. Se observa que el SVC se conecta en el barraje del generador.

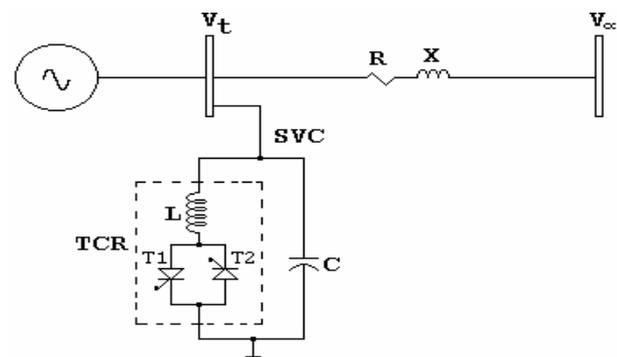


Figura 1. Esquema general a estudiar.

2. MODELO DEL COMPENSADOR DE VAR ESTÁTICO

Desde hace un tiempo se han planteado diferentes esquemas para los compensadores de VARs estático, encontrándose entre ellos el SVC basado en un condensador fijo y una reactancia cuya corriente es regulada en ambos semiciclos por medio de dos tiristores conectado en antiparalelo. La estructura de este tipo de SVC es mostrada en la figura 2.

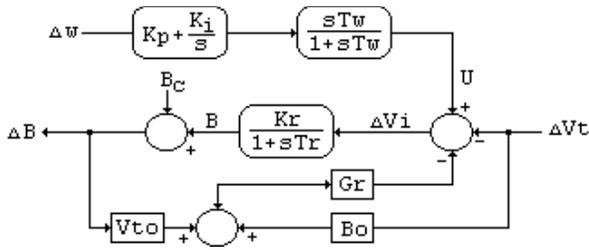


Figura 2. Modelo del SVC planteado.

La función primaria de este SVC es controlar la potencia reactiva y estabilizar el voltaje del sistema. La señal auxiliar U es aplicada a la entrada del controlador del SVC y al sistema de excitación de la máquina para amortiguar las oscilaciones del sistema cuando aparecen perturbaciones. El SVC está equipado con un regulador de tensión el cual incrementa el torque sincronizador. En general, la contribución al torque amortiguador con sólo el regulador de tensión es pequeña. Si se quiere amortiguamiento adicional, se requiere una acción de control suplementario, que en este caso es realizada por el controlador PI y el término “washout” para evitar que opere en régimen permanente. La señal usada como entrada es la velocidad, pero pueden usarse otras tales como la potencia eléctrica, la frecuencia o una combinación de varias señales.

3. METODO PROPUESTO

Se parte del modelo linealizado del sistema planteado inicialmente por Heffron-Phillips y luego por De Mello-Concordia, en el cual se calculan un conjunto de constantes K1 hasta K6 que dependen de los parámetros del sistema y del punto de operación (ver figura 3)

Los criterios para el calculo de K1 hasta K6 son dados en [5] y algunas aplicaciones se muestran en [6].

3.1 Modelo del Svc

El modelo usado para el SVC es el mostrado en la figura 2, y el punto de operación de estado estable es dado por:

$$I_S = BV_t \tag{1}$$

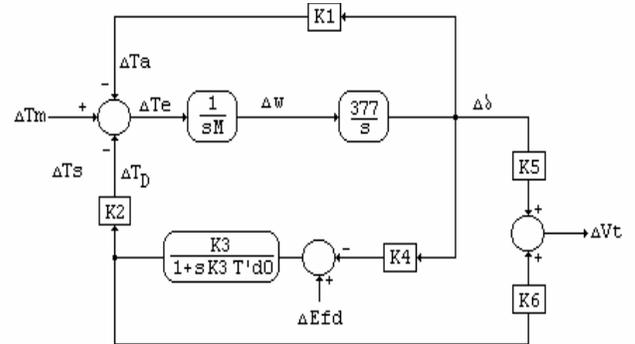


Figura 3. Modelo linealizado del sistema sin SVC

La ecuación (1) se linealiza alrededor de un punto de operación quedando:

$$\Delta I_S = B_0 \Delta V_t + V_{t0} \Delta B \tag{2}$$

La señal de entrada al sistema de control del SVC está expresada como:

$$\Delta V_i = U - \Delta V_t - G_I \Delta I_S \tag{3}$$

Partiendo de las ecuaciones (2) y (3) y planteando el resto con el modelo de la figura 2, se tiene:

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \tag{4}$$

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \tag{5}$$

$$\Delta E_{fd} = -K_A \Delta V_t + K_A U + K_A \Delta V_{ref} \tag{6}$$

$$\Delta E'_q = K_3 (\Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta) \tag{7}$$

Después de manipular el conjunto de ecuaciones (1) hasta la (6) se llega a:

$$\Delta T_e = K_{12} \Delta \delta + K_{13} \Delta B \tag{8a}$$

$$\Delta V_t = C \Delta \delta + w \Delta B \tag{9a}$$

La ecuación (8a) representa una nueva fórmula para expresar el torque electromagnético. El primer término representa el coeficiente del torque sincronizador, el cual debe ser positivo para asegurar la estabilidad del sistema. El segundo término representa el grado al cual un cambio en la susceptancia del SVC puede causar una relativa

aceleración de la máquina. Entre más alto sea este factor mejor la estabilidad del sistema. En la figura 4 se modelan las ecuaciones (8a) y (9a) mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales de segundo orden. Esta también es una versión modificada del modelo mostrado en la figura 1, pero con los efectos del SVC. En el anexo 1 se muestra el desarrollo realizado para la obtención de las ecuaciones (8a) y (9a).

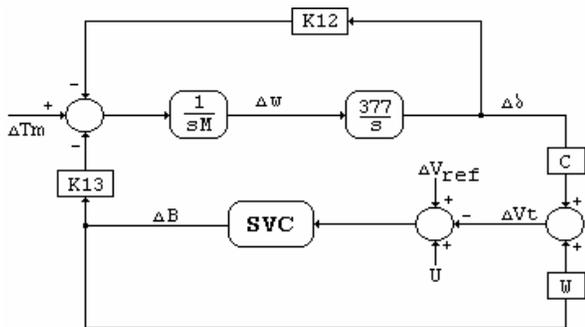


Figura 4. Modelo linealizado resultante obtenido al incluir el SVC

Los criterios de diseño para obtener los parámetros del controlador PI, Kp y Ki son dados en [3] y [6].

4. SIMULACIONES Y RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de realizar la simulación del sistema propuesto bajo diferentes condiciones de operación. Para todos los casos se tiene que a los 20 segundos se aplica una perturbación en la referencia de tensión al incrementarla de 1 a 1.05.

Posteriormente a los 30 segundos se produce un variación fuerte de carga del 50%. Asimismo se muestran los resultados para la simulación lineal del sistema y luego del sistema no lineal, puesto que en este último se reflejan mejor con respecto a la realidad los resultados obtenidos.

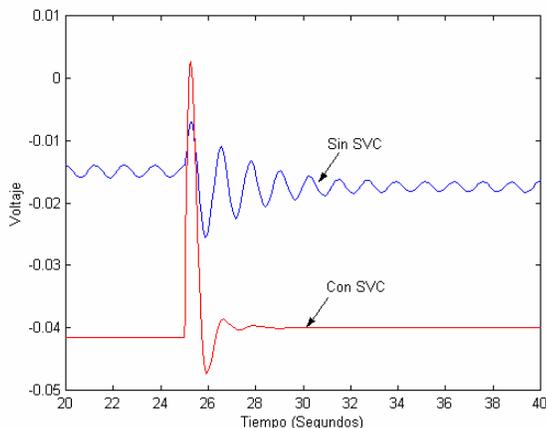


Figura 5. Respuesta de la tensión sin y con SVC.

En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos para la tensión en el barraje del generador sin y con SVC. Cuando no se tiene SVC el sistema trabaja sólo con el regulador automático de tensión, por lo que cuando se presenta una perturbación el AVR actúa, pero se siguen presentando oscilaciones. Cuando se utiliza el SVC las oscilaciones desaparecen, pero aparece un sobrepaso de elevada amplitud y corta duración que refleja en cierta forma el hecho de que estos elementos introducen armónicos en el sistema y cuyos efectos deben tenerse en cuenta para posteriores estudios.

Para esta misma situación se muestra también, en la figura 6, la respuesta del ángulo de par para ambos casos

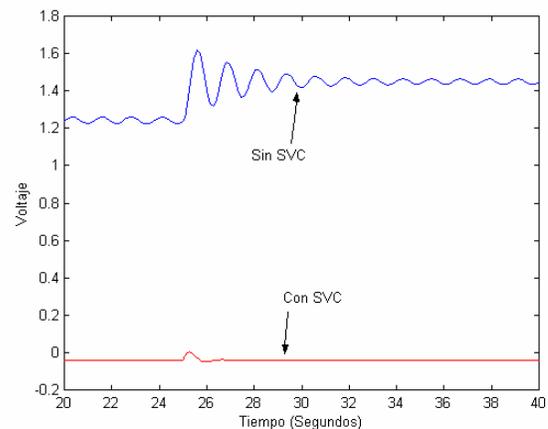


Figura 6. Respuesta del ángulo del par sin y con SVC.

La diferencia que se observa en los valores de régimen permanente muestran que la inclusión del SVC amplía los límites de estabilidad del sistema puesto que la excursión que realiza este parámetro ante una perturbación es menor.

Se realizó luego la simulación no lineal del sistema puesto que en esta se refleja de mejor manera los efectos de las perturbaciones y de las acciones de control que se apliquen.

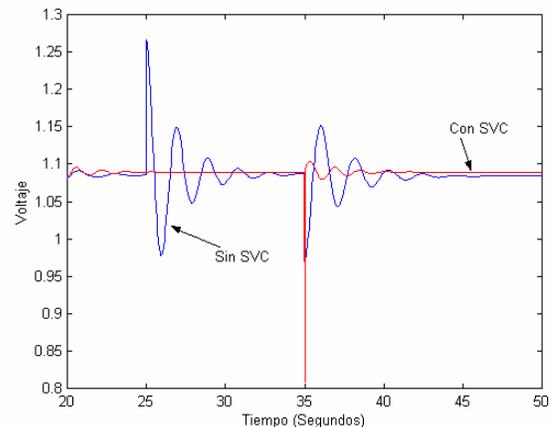


Figura 7. Respuesta de la tensión en la simulación no lineal.

Para este caso se aplica a los 20 segundos una variación en la referencia y a los 30 segundos una variación de la carga.

Inicialmente se muestra el comportamiento de la tensión sin y con SVC en la figura 7 donde se observan de nuevo los efectos benéficos del uso del SVC al hacer el sistema menos oscilatorio y con tensión mas regulada.

En la figura 8 se muestra el comportamiento del ángulo del par para la simulación no lineal ante las mismas perturbaciones.

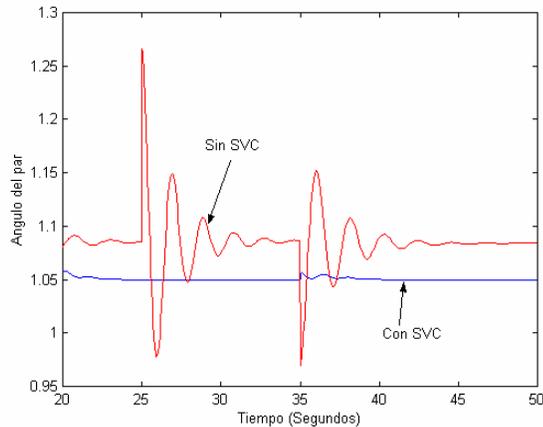


Figura 8. Respuesta del ángulo del par en la simulación no lineal.

De nuevo se observa de ella los efectos benéficos del uso del SVC.

5. CONCLUSIONES

Se ha mostrado el uso de un compensador de VARs estático para el control de reactivos y ampliación de los límites de estabilidad del sistema. El SVC usado consta de un condensador fijo y de una reactancia cuya corriente es regulada por dos tiristores, lo que garantiza que el SVC se comporte como una fuente o un sumidero de reactivos de acuerdo a las exigencias del sistema en el cual esta conectado. Se observaron mejoras en cuanto a la regulación de tensión y también se observó disminución en las oscilaciones cuando se presentaron perturbaciones. De acuerdo los resultados obtenidos se puede también concluir que una de las desventajas al usar estos dispositivos es que el contenido armónico en el sistema se incrementa, al utilizar la conmutación de dispositivos de estado sólido.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] MILLER, T. J. Reactive control in electric power systems. John Wiley, 1982.

[2] EL – EMARY ATEF. “Effect of static var compensator upon synchronising torque coefficient”. Electric Machines and Power Systems, vol 25, pp 371 – 386, 1997.

[3] WANG Li. “A comparative study of damping schemes on damping generator oscillations”. IEEE Transactions on Power systems, Vol 8, #2, May 1993, pp 613 – 619.

[4] OLIVERIA Sabastiao E.M. “Synchronizing and damping torque coefficients and power system steady state stability as affected by static var compensators”. IEEE Transactions on Power systems, Vol 9, #1, February 1994, pp 109 – 119.

[5] DE MELLO F.P., CONCORDIA C. “Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control”. IEEE Transactions on Power apparatus and systems, Vol PAS - 88, April 1969.

[6] ALZATE G. Alfonso. Dinámica de sistemas eléctricos: Estabilidad y control. Maestría en Ingeniería eléctrica 2000.

7. DATOS

Se utilizaron los siguientes datos:

Punto de operación: $P+jQ=0.6+j0.2$ $V_t=1.025$

Máquina sincrónica:

$X_d=1.930$, $X_q=1.77$, $X'q=0.5$, $X'd=0.230$, $R_s=0$
 $H=3.74$ $D=1.0$ $w=377$
 $T'd=5.2$ s, $T'q=0.81$

AVR: IEEE tipo 1 rápido

$K_a=100$ $T_a=0.05$

Línea de transmisión:

$R_e=0.0$ $X_e=0.81$

SVC:

$G_i=0.5$ $K_r=10$ $T_r=0.15$ $B_0=0.6$ $B_c=1.326$

$K_p=14$ $K_i=7$

Constantes del modelo linealizado de la máquina para el punto de operación definido

$K_1=0.64$ $K_2=0.75$ $K_3=0.38$

$K_4=1.28$ $K_5=0.121$ $K_6=0.63$

ANEXO 1

Se muestra el desarrollo realizado para obtener las ecuaciones (8a) y (9a).

Reemplazando (7) en (4)

$$\Delta V_t = (K_5 - K_3 K_4 K_6) \Delta \delta + K_3 K_6 \Delta E_{fd} \quad (8)$$

Haciendo $V_{ref}=0$ en (8):

$$\Delta V_t = \frac{K_d}{1 + K_c} \Delta \delta + \frac{K_c}{1 + K_c} U \quad (9)$$

con

$$K_d = K_5 - K_3 K_4 K_6 \quad K_c = K_A K_3 K_6$$

donde

$$H_Q = \frac{K_d}{1 + K_c} \quad y \quad \frac{K_c}{1 + K_c}$$

$$\Delta V_t = H_Q \Delta \delta + H_D U \quad (10)$$

Reemplazando (10) en (3):

$$\Delta V_i = -H_Q (1 + G_I B_o) \Delta \delta - G_I V_{t_o} \Delta B + [1 - H_D (1 + G_I B_o)] U \quad (11)$$

Ecuación del SVC:

$$\Delta B = K_r \Delta V_i \quad (12)$$

$$\Delta B = K_r \{ -H_Q (1 + G_I B_o) \Delta \delta - G_I V_{t_o} \Delta B + [1 - H_D (1 + G_I B_o)] U \}$$

$$\Delta B = -\frac{K_r H_Q (1 + G_I B_o)}{(1 + K_r G_I V_{t_o})} \Delta \delta + \frac{K_r [1 - H_D (1 + G_I B_o)]}{(1 + K_r G_I V_{t_o})} U \quad (13)$$

Simplificando:

$$U = \frac{1}{K_9} \Delta B + \frac{K_8}{K_9} \Delta \delta \quad (14)$$

(6) en (7):

$$\Delta E'_q = K_3 \{ -K_A \Delta V_t + K_A U - K_4 \Delta \delta \}$$

Ahora de (14):

$$\Delta E'_q = K_3 \left\{ -K_A \Delta V_t + K_A \left(\frac{1}{K_9} \Delta B + \frac{K_8}{K_9} \Delta \delta - K_4 \Delta \delta \right) \right\}$$

$$\Delta E'_q = K_3 \left[-K_A H_Q - \frac{K_A H_D K_8}{K_9} + \right. \quad (15)$$

$$\left. \left(\frac{K_A K_8}{K_9} - K_4 \right) \right] \Delta \delta + K_3 \left(\frac{K_A}{K_9} - \frac{K_A H_D}{K_9} \right) \Delta B$$

Entonces : $\Delta E'_q = [K_{10} \Delta \delta + K_{11} \Delta B$

$$\Delta T_e = [K_1 + K_2 K_{10}] \Delta \delta + [K_2 K_{11}] \Delta B$$

donde

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 (K_{10} \Delta \delta + K_{11} \Delta B)$$

donde

$$K_{10} = K_3 \left[-K_A H_Q - \frac{K_A H_D K_8}{K_9} + \right.$$

$$\left. \left(\frac{K_A K_8}{K_9} - K_4 \right) \right]$$

$$\Delta V_t = H_Q \Delta \delta + H_D U$$

$$\Delta T_e = K_{12} \Delta \delta + K_{13} \Delta B \quad (16)$$

$$\Delta V_t = H_Q \Delta \delta + \left(\frac{1}{K_9} \Delta B + \frac{K_8}{K_9} \Delta \delta \right) H_D$$

$$\Delta V_t = \left(H_Q + \frac{K_8 H_D}{K_9} \right) \Delta \delta + \frac{H_D}{K_9} \Delta B \quad (17)$$

Sistema resultante:

$$\Delta T_e = K_{12} \Delta \delta + K_{13} \Delta B \quad (8a)$$

$$\Delta V_t = C \Delta \delta + w \Delta B \quad (9a)$$