

## **Regulación del voltaje\* en estado estable mediante compensación reactiva controlada**

*Guillermo E. Vinasco\*\**  
(Recibido el 15 de agosto de 2002)

### **Resumen**

El presente artículo revisa el concepto de compensación paralela controlada, y desarrolla un modelo analítico simple (pero muy genérico y útil) para ella. Este modelo permitirá el estudio y análisis en estado estable, útil para problemas como el del dimensionamiento óptimo de compensación reactiva para una carga, en el cual pueden requerirse estrategias combinadas de compensación serie-paralela .

----- *Palabras clave:* compensación reactiva, control de voltaje, estabilidad de voltaje, colapso de voltaje.

## **Voltage regulation under stable state using reactive controlled compensation**

### **Abstract**

This paper review the controlled shunt compensations, and develops a single (but very general and powerful) analytical model for it. This analytical model will permit us the analysis in steady state, very useful for the optimum sizing of reactive compensation, that in some cases only can be achieve using combined strategies series-shunt.

----- *Key words:* reactive compensation, voltage control, voltage stability, voltage collapse.

---

\* La tendencia normativa es hacia el uso del término “tensión” en lugar de “voltaje”, pero aún es un asunto en discusión.  
\*\* Ingeniero, MsC. Conexión Eléctrica S.A. Medellín. [gevinasco@isa.com.co](mailto:gevinasco@isa.com.co)

### Introducción

Al contrario de la regulación de la frecuencia que sólo es posible en las plantas de generación, la regulación y el control del voltaje tienen múltiples opciones, que deben ser explotadas para no echar mano de medidas extremas como las generaciones de seguridad, la apertura de circuitos, etc, seguramente imposibles en un futuro basado en la búsqueda de mejor servicio, a costos menores, y con calidad superior.

El voltaje tiene relación íntima con la razón de ser de un sistema de potencia: la carga, la cual es la primera variable que el usuario percibe (y que lo afecta), por lo que existe un deseo natural de aprovechar todo lo que la tecnología pueda brindar para su control; dicha tecnología es el objeto de discusión en el presente trabajo.

### La potencia reactiva y el control del voltaje

A pesar de que se prevé el uso masivo de la corriente continua en el futuro, ésta no puede producirse en cantidades masivas, así que deberá coexistir con la corriente alterna; parte importante de una sana coexistencia es atacar el inconveniente natural de la corriente alterna: la necesidad de proveer potencia reactiva; allí yace el secreto del control del voltaje.

Con la tecnología convencional, el control de la potencia reactiva era imposible o requería de una red inviable para las nuevas restricciones económicas y ambientales, pero desde hace años ha sido posible la compensación reactiva mediante la instalación de reactores o capacitores en la red; ahora, mediante válvulas electrónicas, es posible controlar de forma continua la magnitud de dicha compensación, pudiendo mediante un control de lazo cerrado ajustar su magnitud automáticamente a la requerida por el sistema en cualquier instante de tiempo.

La figura 1 [1] ilustra un dispositivo típico para ello, el SVC (Static Var Compensator), una com-

pensación paralela que mediante el control del ángulo de disparo de tiristores en TCR (Thyristor controlled reactors), y TSC (Thyristor switched capacitor) inyecta potencia reactiva en un rango capacitivo o inductivo. Hay otros aspectos de la compensación diferentes de la regulación del voltaje, igualmente importantes y que no serán tratados (tal como su contribución a la estabilidad angular [1]).

La aplicación típica de un SVC se ilustra en la figura 2; se trata de una gran carga que debe alimentarse a través de un alimentador, a decenas o cientos de kilómetros.

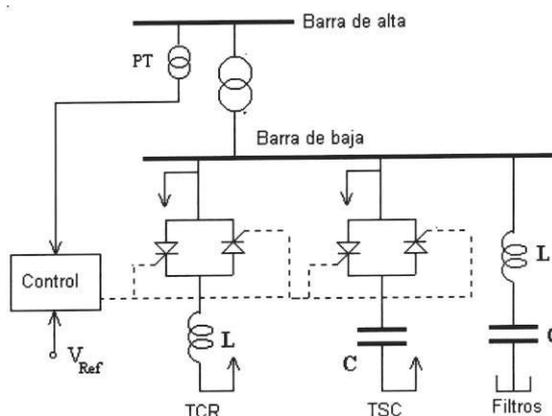


Figura 1 Esquema constitutivo de un SVC típico (basado en [1])

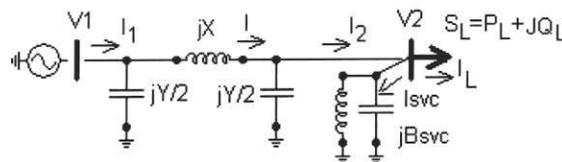


Figura 2 Aplicación típica de un SVC

Para estudiar la regulación del voltaje, se parte del sistema de la figura 2, planteando la relación entre las tensiones  $V_1$  y  $V_2$ :

$$V_1 = V_2 + jXI \quad (1)$$

La corriente, "I", es la suma de tres componentes; la que fluye por la susceptancia propia de la línea, la del compensador " $I_{svc}$ " y la de la carga " $I_L$ ", es decir:

$$I = \frac{jY}{2}V_2 + I_{svc} + I_L \quad (2)$$

Finalmente, conviene expresar cada componente en función de  $V_2$  (o su complejo conjugado  $V_2^*$ ) así:

$$I = \frac{jY}{2}V_2 + jB_{svc}V_2 + I_L = \quad (3)$$

$$j\left(\frac{Y}{2} + B_{svc}\right)V_2 + \frac{P_L - jQ_L}{V_2^*}$$

En las ecuaciones (2) y (3), se puede reemplazar  $V_2$  por sus componentes real e imaginaria ( $V_2 = e + jf$ ), y separar en la expresión resultante las componentes real e imaginaria:

$$e^2\left(1 - X\left(\frac{Y}{2} + B_{svc}\right)\right) + e(-V_1) + \quad (4)$$

$$(XQ_L - f^2\left(1 - X\left(\frac{Y}{2} + B_{svc}\right)\right)) = 0$$

$$f = -\frac{XP_L}{V_1} \quad (5)$$

Las dos ecuaciones anteriores relacionan la componentes de  $V_2$  (e,f) con la carga ( $P_L, Q_L$ ), el sistema ( $V_1$ , la reactancia de la línea X) y la magnitud de la compensación ( $B_{svc}$ ), aproximando un flujo de carga real, pues entre otras cosas no se tienen en cuenta las pérdidas; pero, a pesar de su simplicidad, permiten obtener una cantidad enorme de información sobre la compensación y el control de voltaje con ésta. En [2] y [3] se pueden consultar modelos más exactos para la línea y algoritmos para el cálculo de flujos de cargas; no obstante, la práctica muestra que incluso las susceptancias capacitivas son despreciables en líneas de 230/115 kV, y que su efecto es pequeño en líneas de 500 kV de menos de 150 km.

Las ecuaciones también son aplicables a los otros casos de compensación: compensación serie ( $B_{svc} = 0$  y  $X = X_{linea} - X_{comp}$ ), compensación serie-shunt ( $B_{svc} \neq 0$  y  $X = X_{linea} - X_{comp}$ ), e incluso en el análisis de la compensación y su desempeño ante las contingencias en líneas (pueden simularse por cambios en el valor de X).

### Análisis de un ejemplo numérico

Si se asume  $V_1 = 1$  p.u. (fuente infinita), es posible resolver (4) y (5) para cualquier valor de carga ( $P_L, Q_L$ ), o grado de compensación ( $B_{svc}$ ). Como  $V_2$  será la incógnita, se obtiene primero un valor para "f" de (4); luego, con éste en la ecuación (3) se obtienen 2 soluciones de "e", y por consiguiente 2 soluciones para  $V_2$ . Esto se ilustrará con el siguiente ejemplo numérico (figura 2); sea:

$$MVA_{base} = 1000 \text{ MVA} \quad x = 0,5 \text{ ohm/km}$$

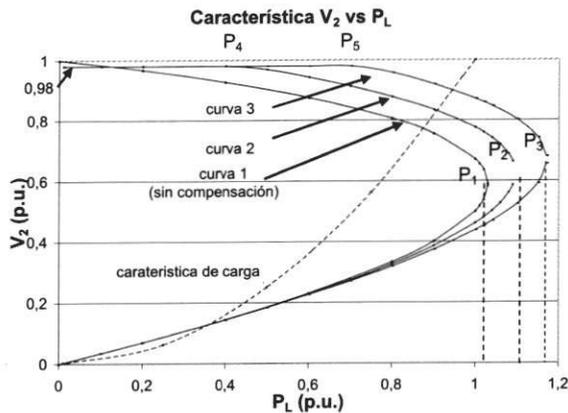
$$KV_{base} = 500 \text{ kV} \quad L = 150 \text{ km}$$

(luego  $X = 0,3$  p.u.)

$$Z_{base} = 250 \text{ ohms} \quad Y = \text{se desprecia.}$$

Con lo datos anteriores se elaboró una rutina, para obtener a partir de (4) y (5) las características de carga ilustradas en las figuras 3 y 4; por facilidad, se supone que el factor de potencia de

la carga es siempre 0,89, atrasado (el anexo incluye un comentario sobre esta rutina).



**Figura 3** Características de carga (curva 1 sin SVC, curva 2 SVC capacidad máxima 0,2 p.u., curva 3 SVC capacidad máxima 0,4 p.u.)

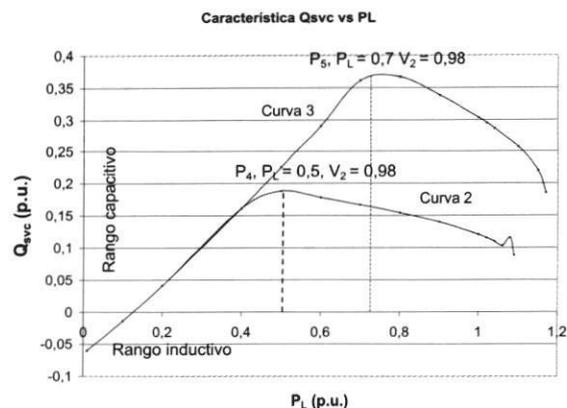
En la figura 3 se observa que para cada valor de  $P_L$  existen dos posibles valores de  $V_2$  (de allí la forma de la curva, denominada “nariz de voltaje”), el primer valor de  $V_2$  es de magnitud mayor y estable, el otro de magnitud menor, donde no es posible la operación del sistema, un análisis más detallado se puede consultar en [4, 5].

Independientemente de la fortaleza de la fuente, o de la magnitud de la compensación, hay un límite para la cantidad de potencia por transferir, de lo contrario  $V_2$  se deprime a niveles inaceptables e, incluso, más allá de ciertos puntos críticos ( $P_1, P_2, P_3$ )  $V_2$  desaparece “misteriosamente” ya que ocurre su colapso; esto se observa en la solución de la ecuación (4), cuando el discriminante se hace negativo y es imposible obtener raíces reales.

Para analizar el efecto de la compensación sobre el voltaje, se toma la curva 2 (SVC de capacidad máxima 0,2 p.u.) y la curva 3 (SVC de capacidad máxima 0,4) de la figura 3, en ambas los SVC regulan a  $V_2$  objetivo de 0,98 p.u., se deduce que:

- La compensación paralela extiende la capacidad de transmisión, los puntos críticos ( $P_2$  y  $P_3$ ) ocurren a mayores valores de “ $P_L$ ”.
- El punto de operación será la intersección de las curva encontradas con la característica de la carga (la magnitud de una carga suele depender del voltaje que la alimenta). Para un nivel de carga deseado “ $P_L$ ” puede ocurrir que el voltaje sea inaceptable (se requiere compensar para pasar a otra característica mejor), o peor aún que no exista punto de intersección, caso en el cual no sería posible esta magnitud en la transferencia de potencia.
- Hay mejor calidad del servicio, siendo  $V_2$  más insensible ante cambios en “ $P_L$ ” cuanto mayor sea la capacidad del SVC (por eso es mejor la regulación sobre la curva 3 que sobre la curva 2).

Es importante observar qué ocurre con la potencia reactiva (el costo de regular  $V_2$ ), observando cómo evoluciona la magnitud de la potencia reactiva inyectada por el SVC ( $Q_{SVC}$ ) en función de  $P_L$ :



**Figura 4** Características de regulación de carga (curva 2 SVC capacidad máxima 0,2 p.u., curva 3 SVC capacidad máxima 0,4 p.u.)

- A valores bajos de  $P_L$ , aun sin incluir la susceptancia capacitiva de las líneas, se requiere que ambos SVC absorban potencia reactiva para lograr  $V_2 = 0,98$ ; así se puede determinar el rango inductivo requerido para el compensador.

- Si se incrementa  $P_L$ , la situación se revierte; el compensador empieza a entregar reactivos con  $V_2 = 0,98$ , hasta llegar a los puntos  $P_4$  y  $P_5$  (los mismos ilustrados en la figura 3), allí los SVC ven copada toda su capacidad, y a la derecha de  $P_4$  y  $P_5$ ,  $V_2$  se deprime; a pesar de que las compensaciones están en su máxima capacidad, éstas sólo pueden entregar reactivos en relación con el cuadrado del voltaje presente. Esto diferencia el soporte de voltaje obtenido de una compensación clásica, con el de una máquina sincrónica o una compensación de última generación (STACOM: Static Compensator), estos últimos y las máquinas sincrónicas pueden entregar una cantidad de potencia reactiva que es independiente de la magnitud de su voltaje en terminales.
- Un incremento de la capacidad de compensación al doble, sólo permitió mantener la regulación de voltaje deseada (0,98) para un 40% más de  $P_L$  (de 0,5 a 0,7 p.u.), esta característica no lineal puede hacer prohibitiva la magnitud de si sólo se utiliza compensación paralela.

Tal como se observa, las relaciones (4) y (5), pese a su simpleza, permiten todo tipo de análisis sobre la compensación y su relación con la carga, pudiéndose obtener familias de curvas para multitud de combinaciones de variables ( $V_2$ ,  $P_L$ ,  $Q_L$ ,  $Q_{SVC}$  etc.), en multitud de formas de compensación (serie, paralelo, etc.) tal y como se había ya comentado.

### Conclusiones

La compensación reactiva será fundamental en el futuro para la calidad de la potencia, la conexión de fuentes de energía no convencionales (aerogeneradores, celdas de potencia, etc.), el acople de redes AC con sistemas DC, etc.

Se ilustró la forma como interactúan el control del voltaje en la carga (demanda) y la compensación, a partir de una metodología sencilla pero de amplia aplicación.

Con un flujo de carga tradicional es muy difícil (o imposible) construir las características de carga, pues éstos buscan una solución desde un valor inicial (generalmente 1 p.u.), y obtienen el valor de “voltaje alto”, mas no el de “voltaje bajo”, o peor aún, se llega a un punto en el cual el flujo no converge.

La situación anterior es similar a la operación real, sólo que allí no se puede llevar el sistema al colapso, reducir un poco la carga y empezar de nuevo, cobrando importancia los algoritmos o las técnicas como la ilustrada, que permitan conocer qué tan lejos (o cerca) se encuentran del colapso, y prevenir la caída en él antes de que sea demasiado tarde.

### Anexo

Para la construcción de una rutina que calcule la característica de carga se puede utilizar cualquier herramienta (tal como Matlab). Esta rutina tiene en cuenta la capacidad máxima de un SVC, verificando que nunca éste entregue una potencia reactiva más allá de ese límite:

$V_f$  es el valor de la fuente.

$X$  es la reactancia de la línea.

$+B_{svcMax}$ ,  $-B_{svcMax}$  son las capacidades máxima y mínima del SVC.

$Q_L$  es la potencia reactiva de la carga.

$fp$  es el factor de potencia de la carga.

Inicializar valores de

$V_f$ ,  $X$ ,  $B_{svcMax+}$ ,  $B_{svcMax-}$

Bucle desde  $PL=0$

Calcular  $Q_L = P_L * \text{raíz}(1/fp^2-1)$

Calcular  $f$  (ecuación 4)

Bucle desde  $B_{svc}=0$

Calcular  $e$  (ecuación 3)

Si la ecuación (3) tiene solución

Calcular  $|V_{21}|$  y  $|V_{22}|$  (siendo  
 $V_{21}=e1+jf$  y  $V_{22}=e2+jf$ )

Si  $|V_{21}| = 0,98$

Termine bucle desde Bsvc (se  
 alcanza un punto operación)

Si  $|V_{21}| < 0,98$

Incremente compensación Bsvc

Si  $|V_{21}| > 0,98$

decremente compensación Bsvc

Si ( $B_{svc} > B_{svc} Max+$ ) ó ( $B_{svc} <$   
 $B_{svc} Min-$ )

Termine Bucle desde  $B_{svc}=0$  (se  
 alcanza un lim. compensador)

Else la ecuación (3) NO tiene solución (se  
 alcanza el punto crítico)

Fin Bucle desde  $B_{svc}=0$

Si NO se alcanza el punto crítico

Incrementar  $P_L$

Else Termine desde  $P_L=0$

Fin Bucle desde  $P_L=0$

## Bibliografía

1. Gyugyi Laszlo. Fundamentals Of Thyristor Controlled Static Var Compensators In Electric. Power System Applications. IEEE applications of Static Var Compensators in Electric Power Systems. New York. IEEE Power System Engineering Committee.1987. p. 8.
2. Stevenson William D. Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia. McGraw-Hill Inc. 1979. pp. 100, 214.
3. Kundur Prabha. Power System Stability and Control. Palo Alto Electrical Power Research Institute (EPRI)-McGraw-Hill. 1994. pp. 202, 255.
4. Vinasco Guillermo. "El fenómeno del Colapso de Voltaje" en: Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. No. 22. Medellín. Junio de 2001.
5. Taylor, Carson. Power System Voltage Stability. Palo Alto. Electrical Power Research Institute (EPRI)-McGraw-Hill. 1994. p. 229.