

CASO DE ESTUDIO:

REGULACIÓN DE VOLTAJE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

por Ings. María Gutiérrez Pol y Francini Aguilera, 2025-06-30.

SINOPSIS

La estabilidad del voltaje en sistemas eléctricos representa un factor decisivo para asegurar la continuidad operativa de cargas críticas y la calidad del suministro. Ante perturbaciones como las caídas de voltaje, los dispositivos compensadores se presentan como una solución tecnológica efectiva. Esta nota técnica aborda la selección óptima de dichos dispositivos para regulación de voltaje en redes de distribución, desde los fundamentos teóricos hasta la aplicación práctica, incluyendo el análisis de un caso real que ilustra el impacto de estas tecnologías en el desempeño de un sistema de potencia.

REGULACIÓN DE VOLTAJE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

El fenómeno de la caída de voltaje ha sido ampliamente identificado como una de las perturbaciones más frecuentes y perjudiciales en sistemas eléctricos modernos. Estas caídas pueden ser provocadas por cortocircuitos, arranque de grandes motores de inducción o fallos en líneas de transmisión. En muchos casos, afectan de forma directa a la operación de equipos sensibles, como los basados en electrónica de potencia o sistemas automatizados de producción, con consecuencias económicas significativas (Tang et al., 2022).

En la práctica, el tratamiento de este tipo de perturbaciones se puede abordar desde distintas estrategias. Por un lado, están los dispositivos de compensación reactiva como el Compensador Estático de VAR (SVC), que mediante el control de reactores y capacitores conmutados por tiristores permite estabilizar la tensión mediante el control del flujo de potencia reactiva. Por otro lado, destacan los sistemas de compensación dinámica como el Restaurador de Voltaje Dinámico (DVR), que actúa inyectando en serie la tensión faltante en situaciones de caída, restableciendo así el perfil de tensión al nivel nominal (Mohammed et al., 2013).

El uso combinado de transformadores con tomas o taps variables y compensadores tipo SVC ha demostrado mejorar de forma significativa la estabilidad en estado estacionario (El-Sadek et al., 1998). Esta combinación permite ajustar el nivel de tensión en la carga con flexibilidad, mientras el SVC reacciona a fluctuaciones más rápidas, ajustando continuamente la potencia reactiva inyectada o absorbida. Determinando la combinación óptima entre la relación de transformación del tap y los parámetros del SVC, incluyendo la ganancia del controlador, la referencia de tensión y la susceptancia equivalente, es posible mantener estable el voltaje terminal de carga. Esta solución puede modelarse mediante una fuente de Thevenin con una carga compleja y elementos de compensación en serie (El-Sadek et al., 1998).

La configuración óptima se logra al ajustar los valores de ganancia y pendiente del regulador del SVC en función del comportamiento dinámico del sistema y la relación del transformador.

CASO REAL

El estudio realizado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Assuti, Egipto, demuestra cómo la combinación de transformadores con tomas variables y compensadores estáticos SVC mejora significativamente la estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de gran escala (El-Sadek et al., 1998). Para el análisis, el sistema se modela mediante su equivalente de Thevenin, donde la fuente de tensión V_s y la impedancia del sistema $Z_s = R_s + jX_s$ son referidas a la barra de carga a través de un transformador con relación de tap t , como se muestra en la siguiente figura:

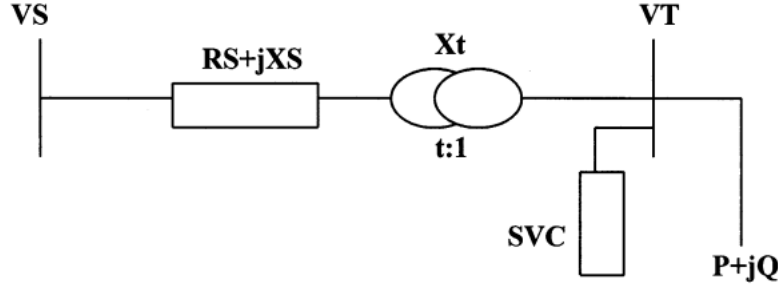


Fig. 1: Modelo de Thevenin con SVC y transformador.

El voltaje terminal de carga V_t se calcula en estado estacionario considerando la caída de tensión en la impedancia total:

$$\Delta V = \frac{V_s}{t} - V_t = \frac{X_s + X_t}{t^2} \cdot Q + \frac{R_s}{t^2} \cdot P$$

La acción del SVC se representa mediante su susceptancia B_{svc} , cuya corriente inyectada es:

$$I_s = B_{svc} \cdot V_t$$

El control del SVC se basa en un regulador cuya función de transferencia puede expresarse como:

$$G_1 = \frac{\frac{1}{slope} \cdot (1 + T_2 s)}{(1 + T_2 s) \cdot (1 + T_3 s)}$$

Con el objetivo de mantener el voltaje en $V_t \approx V_{ref}$, mediante el ajuste automático de la susceptancia equivalente en función del error de voltaje. El modelo completo permite derivar una expresión para el voltaje terminal:

$$V_t = \frac{G \cdot Z_s}{t^2} (V_R - V_{TH}) + \left[\frac{V_s}{t} - \frac{R_s}{t^2} \cdot \frac{P}{V_t} - \frac{X_s + X_t}{t^2} \cdot \frac{Q}{V_t} \right]$$

Se demuestra que, al incrementar la ganancia del controlador del SVC, la potencia máxima transferible incrementa significativamente. Para diferentes ganancias, la potencia es capaz de aumentar desde 2.0 p.u. hasta 12.0 p.u., lo que representa un incremento del 600%.

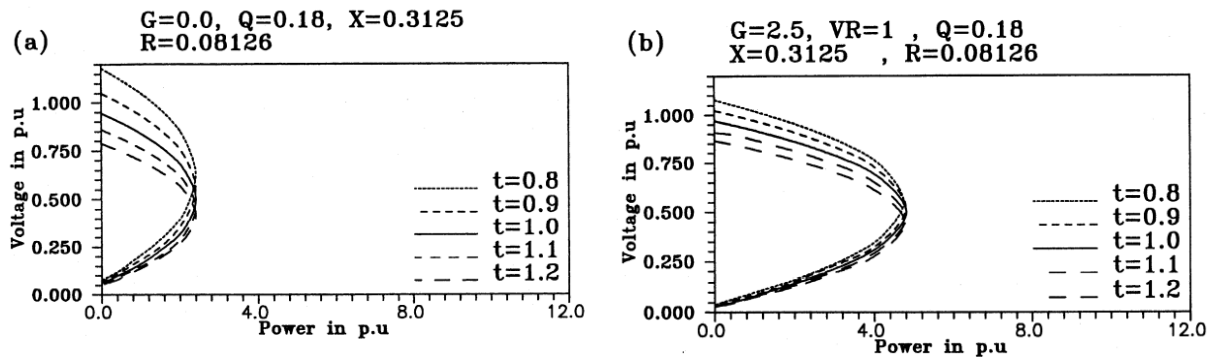


Fig. 2: Aumento de potencia con SVC.

Este comportamiento evidencia que, mientras el transformador con tap ajusta el nivel general de tensión, el SVC proporciona soporte dinámico ante variaciones de carga o perturbaciones. La ganancia y pendiente del controlador del SVC deben adaptarse según el tap seleccionado, lo cual justifica el uso de controladores para mantener una tensión constante de carga y optimizar el uso del compensador.

CONCLUSIÓN

El principal desafío en redes de distribución es mantener el voltaje terminal dentro de los rangos aceptables bajo condiciones particulares o perturbaciones transitorias, minimizando los costos de implementación y operación de las diferentes soluciones. El análisis muestra que la selección adecuada de compensadores, es fundamental para la estabilidad y regulación del sistema. La combinación de transformadores con taps y SVC resulta efectiva y flexible para redes extensas con alta demanda de confiabilidad. Por su parte, los DVR son apropiados en entornos industriales con cargas sensibles, dada su capacidad de respuesta inmediata ante caídas de tensión.

REFERENCIAS

- El-Sadek, M. Z., Dessouky, M. M., Mahmoud, G. A., & Rashed, W. I. (1998). Combined use of tap-changing transformer and static VAR compensator for enhancement of steady-state voltage stabilities. *Electric Power Systems Research*, 45(1), 47–55.
- Tang, L., Han, Y., Yang, P., Wang, C., & Zalhaf, A. S. (2022). A review of voltage sag control measures and equipment in power systems. *Energy Reports*, 8, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.158>
- Mohammed, S. A., Cerrada, A. G., Abdel-Moamen, M. A., & Hasanin, B. (2013). Dynamic voltage restorer (DVR) system for compensation of voltage sags, state-of-the-art review. *International Journal of Computational Engineering Research*, 3(1), 177–183.