

CASO DE ESTUDIO:

Estudio de Swell por Energización de un Banco de Capacitores de Subestación

Escrito por Ing. Edwin José Vásquez Vargas e Ing. Fabricio Arguijo Cantillo

Sinopsis:

Este estudio analiza el swell de tensión originado por la energización de bancos de capacitores en subestaciones eléctricas, fenómeno que provoca incrementos temporales del voltaje RMS y puede afectar la confiabilidad del sistema. Se utiliza un modelo RLC para describir el comportamiento oscilatorio y las condiciones que generan el sobrevoltaje, con apoyo de normas internacionales de calidad de energía. Además, se revisan los efectos del swell sobre transformadores y protecciones, y se presentan técnicas de mitigación —como resistencias o reactores de preinserción, MOVs y conmutación sincrónica— que permiten reducir la magnitud del evento y mejorar la operación de la subestación.

Teoría:

De acuerdo con IEEE Std 1159-2019, un swell es un incremento temporal del voltaje RMS entre 1.1 p.u. y 1.8 p.u., con duración entre 0.5 ciclos y 1 minuto [1]. En sistemas de distribución, este evento suele originarse por la energización de bancos de capacitores, ya que la inyección súbita de potencia reactiva provoca un aumento momentáneo de la tensión. El fenómeno puede agravarse si el banco opera incorrectamente e inyecta potencia reactiva excesiva durante condiciones de carga ligera [2].

La Figura 1 ilustra un swell típico al 130%, donde la envolvente del voltaje aumenta temporalmente luego de una perturbación. Este comportamiento coincide con la definición IEEE del fenómeno y con el incremento de tensión asociado a la inyección repentina de potencia reactiva durante la energización de capacitores.

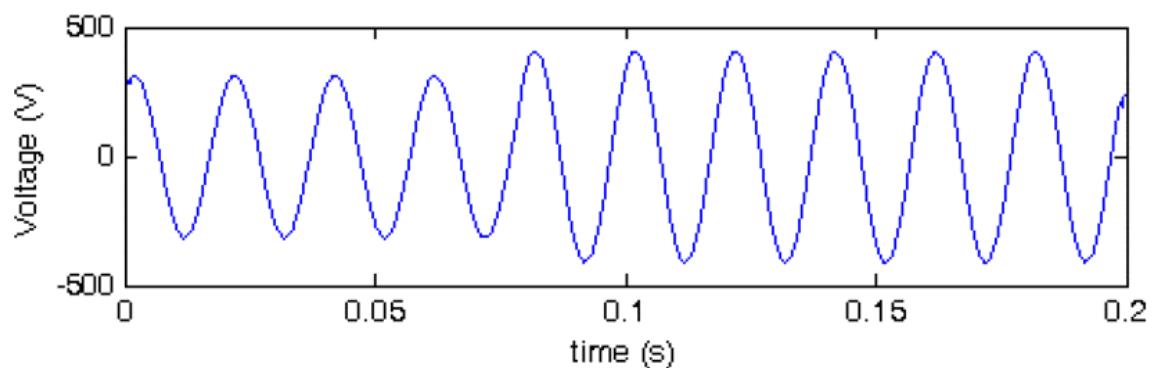


Figura 1. Swell al 130% [11]

La magnitud del swell depende principalmente de la relación entre la impedancia de Thevenin de la red ($Z_{THEVENIN}$) y la reactancia capacitiva total conectada (X_C) [3]. Cuando esta

relación reduce la impedancia equivalente a la frecuencia fundamental, la tensión en la barra aumenta en proporción a $\frac{Z_{THEV}}{X_c}$ [3].

Durante la conexión del banco, el sistema puede modelarse como un circuito RLC serie, cuya respuesta transitoria depende de R, L y C. Para valores bajos de resistencia, el sistema presenta un comportamiento subamortiguado, característico de las oscilaciones observadas durante la energización de bancos de capacitores. Este comportamiento se describe mediante la ecuación diferencial de segundo orden [4], [5]:

$$L \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = 0$$

La solución de esta ecuación depende de la relación entre R, L y C; si la resistencia es pequeña, el sistema presenta oscilaciones amortiguadas típicas del régimen subamortiguado, características observadas durante la conexión de bancos de capacitores en subestaciones eléctricas [4], [5].

Estos swells pueden producir sobreexcitación en transformadores, sobrecalentamiento, disparos indeseados en protecciones y afectaciones en la coordinación del sistema, ya que las sobretensiones pueden propagarse hacia alimentadores aguas abajo [6], [7].

Para mitigar estos efectos, se emplean técnicas como resistencias o reactores de preinserción, descargadores tipo MOV y esquemas de conmutación sincrónica al cruce por cero, los cuales reducen significativamente los transitorios y las sobretensiones instantáneas [8], [9].

Caso real:

Durante la planificación del sistema eléctrico de la región suroeste de Puerto Rico, la Autoridad de Energía Eléctrica (PREPA) evaluó la instalación de un banco de capacitores trifásico de 10.4 MVAR en la subestación Lajas (38 kV), con el objetivo de mejorar el perfil de tensión y aportar compensación reactiva en la red de subtransmisión. Como parte del proyecto, se realizó un estudio de energización para estimar las sobretensiones y corrientes transitorias generadas durante el cierre del banco [10].

En la Figura 2 se observa claramente una oscilación subamortiguada, evidenciada por los picos de sobretensión que aparecen inmediatamente después del cierre del banco de capacitores. Las tres fases muestran señales con amplitudes elevadas que disminuyen progresivamente con el tiempo, lo que indica un amortiguamiento parcial típico de un circuito RLC con resistencia baja. La oscilación inicial presenta varios ciclos de gran magnitud antes de estabilizarse nuevamente hacia la forma senoidal nominal.

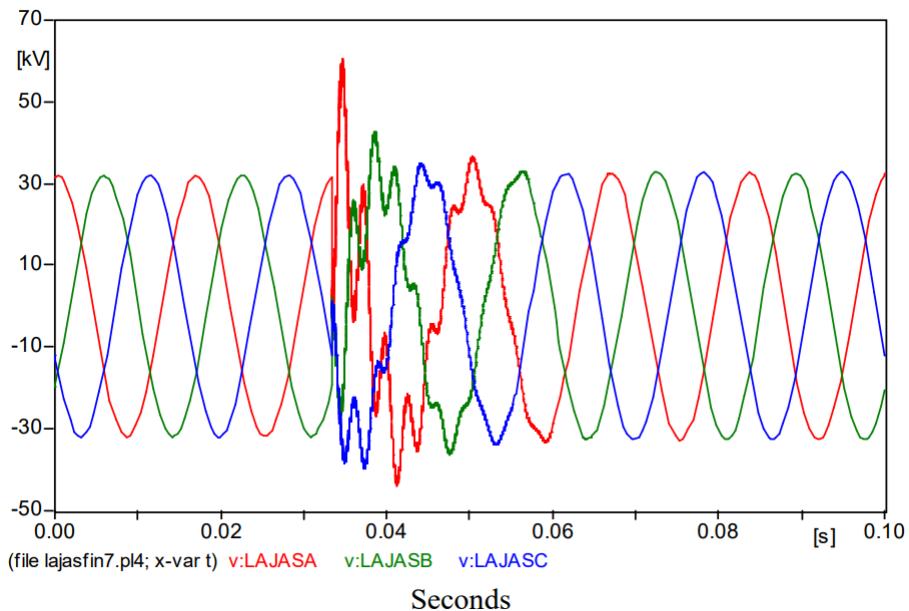


Figura 2. Oscilografía de la energización del banco de 10.4 MVAR en Lajas (38 kV) [10]

El estudio se simuló en ATP considerando la red equivalente, la configuración del banco y el interruptor. Debido a la conexión en estrella aterrizada, la interacción entre la inductancia del sistema y la capacitancia del banco generó una respuesta RLC subamortiguada, produciendo un swell cercano al 15 % en la barra de 38 kV durante los primeros milisegundos tras la maniobra.

A partir del registro real, se identificaron 8 crestas en aproximadamente 1.5 ciclos, lo que permitió estimar la frecuencia dominante del transitorio. Esto permite estimar la frecuencia dominante mediante:

$$f_o = \frac{\text{Número de crestas}}{\text{Tiempo de registro}}$$

$$f_o = \frac{8}{\left[\left(\frac{1}{60}\right) \cdot (1+0.5)\right]}$$

$$f_o = 320 \text{ Hz}$$

Este valor coincide con la frecuencia transitoria observada en la oscilografía. Además, como el documento de PREPA no reporta directamente la capacidad de cortocircuito (S_{SC}), esta se determinó a partir de la corriente de cortocircuito disponible.

$$S_{SC} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{SC}$$

$$S_{SC} = \sqrt{3} \cdot 38kV \cdot 6062A$$

$$S_{SC} = 398 \text{ MVA}$$

Con esa capacidad y la potencia reactiva del banco:

$$Q = 10.4 \text{ MVar}$$

la frecuencia natural del sistema LC se estima mediante:

$$f_o = 60 \cdot \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$$

$$f_o = 60 \cdot \sqrt{\frac{398 \text{ MVA}}{10.4 \text{ MVar}}}$$

$$f_o = 371 \text{ Hz}$$

La frecuencia obtenida experimentalmente (320 Hz) y la calculada teóricamente (371 Hz) resultaron cercanas, confirmando que el evento real se ajusta razonablemente al modelo LC, pese a las aproximaciones utilizadas. Al encontrarse la frecuencia dominante por debajo de 2000 Hz, la red actúa como filtro pasa bajas, permitiendo que la oscilación transitoria se propague hacia alimentadores y equipos aguas abajo.

La energización también generó corrientes de irrupción cercanas a 650 A con contenido oscilatorio propio de la interacción entre la impedancia del sistema y la capacitancia del banco. Aunque no se trató de una falla, el estrés transitorio sobre transformadores, interruptores y MOVs fue significativo.

El desempeño de los descargadores resultó adecuado ante los impulsos, pero para maniobras frecuentes se recomienda usar reactores o resistencias de preinserción y conmutación sincronizada para reducir swell e inrush. En conjunto, el caso confirma que la conexión del banco de 10.4 MVAR en 38 kV puede producir swells de ~15 %, y que estos fenómenos deben considerarse en la selección de equipos, la coordinación de protecciones y la planificación operativa, siguiendo las guías IEEE aplicables.

Conclusión:

El swell generado durante la energización de bancos de capacitores es un fenómeno relevante en la calidad de energía de sistemas de media tensión, ya que surge de la interacción entre la inductancia equivalente de la red y la capacitancia conectada, produciendo un comportamiento RLC subamortiguado. Su magnitud depende principalmente de la impedancia de Thevenin y del instante de cierre del interruptor.

El caso real de la subestación Lajas confirmó estos principios, registrando incrementos de tensión cercanos al 15 % y corrientes de irrupción de aproximadamente 650 A. Estos eventos imponen esfuerzos importantes sobre transformadores, interruptores y descargadores, y no pueden ser mitigados únicamente por MOVs, pues estos actúan sobre impulsos de alta frecuencia y no sobre aumentos temporales del valor RMS.

Por ello, resulta necesario emplear estrategias adicionales como resistencias o reactores de preinserción y conmutación sincronizada, que reducen tanto la corriente de inrush como la

magnitud del swell. En conjunto, el análisis teórico y el caso práctico demuestran que la energización de capacidores debe evaluarse mediante estudios de transitorios para asegurar una adecuada selección de equipos, una correcta coordinación de protecciones y la confiabilidad operativa del sistema.

Bibliografía:

- [1] IEEE Power and Energy Society, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009), 2019.
- [2] M. Tyagi, M. I. Khan, y S. Gupta, "A Comprehensive Study of Voltage Swell and Sag in Power Distribution Systems: Characteristics, Causes, Effects, and Mitigation Strategies," *J. Electrical Systems*, vol. 20, no. 11s, pp. 960-972, 2024.
- [3] R. W. Patterson, "Analysis of two-stage shunt capacitor bank protection deficiencies with mitigation suggested," Tesis, The University of Tennessee at Chattanooga, Chattanooga, TN, 2013.
- [4] *IEEE Standard 1036-2020*, "IEEE Guide for the Application of Shunt Power Capacitors," IEEE, 2020.
- [5] R. T. Lima, A. L. M. Coelho, G. B. Vitor, and P. A. V. D. Liz, "An Approach to Enhance the Controlled Switching of Circuit Breakers Equipped with Preinsertion Resistors for Power Capacitor Banks," *Energies*, vol. 18, no. 16, p. 4356, Aug. 2025.
- [6] C. F. Henville, "Power Quality Impacts on Protective Relays — and Vice Versa," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, pp. 587–591, 2001.
- [7] F. P. Costa, A. A. Ferreira, and L. C. P. da Silva, "Investigation of Main and Secondary Transformers on Mitigation of Voltage Sags, Swells and Interruptions," *Electric Power Components and Systems*, vol. 48, no. 18–19, pp. 1763–1775, 2020.
- [8] S. A. Ali, "Capacitor Banks Switching Transients in Power Systems," *Energy Science and Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 62–73, 2011.
- [9] ABB, *Technical Application Papers No. 23 – Medium Voltage Capacitor Switching*, ABB Distribution Solutions, 2020.
- [10] C. Rivera and R. Baretti, "Energization Study of 10.4 MVAR Capacitor Bank in 38 kV System," in Proc. 2003 International Conference on Power Systems Transients (IPST), New Orleans, LA, USA, 28 Sept.–2 Oct. 2003, pp. 1–6. Available: <https://ece.uprm.edu/~lorama/CarolynBaretti.pdf>
- [11] N. C. F. Tse, J. Y. C. Chan, W.-H. Lau, J. T. Y. Poon, and L. L. Lai, "Real-Time Power-Quality Monitoring With Hybrid Sinusoidal and Lifting Wavelet Compression Algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 1718–1726, Oct. 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2201510. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6236275>