

CASO DE ESTUDIO:

SWELL POR INGRESO DE ENERGIZACION DE BANCO DE CAPACITORES

Escrito por Ing. Hilary Baltodano Martínez e Ing. Pablo Cordero Bermúdez 2025-11-14.

SINOPSIS

La interacción entre la capacitancia de un banco de capacitores y la inductancia de la red puede producir sobretensiones, resonancias locales y picos iniciales de corriente que se reflejan como un swell en el perfil de voltaje, este fenómeno asociado corresponde a un aumento temporal del voltaje RMS por encima del valor nominal, típicamente entre 110 % y 180 % con duraciones que van desde periodos de medio ciclo hasta cerca de un minuto [1], [2], este fenómeno se origina por la alteración repentina en el balance de potencia reactiva, lo que modifica la reactancia equivalente del sistema y desencadena un régimen transitorio, influyendo directamente en la estabilidad operacional del sistema.

SWELL

Es una variación de tensión de corta duración que se manifiesta como un aumento del valor RMS por encima del 110 % y hasta aproximadamente el 180 % del voltaje nominal [1], las normas y documentación técnica clasifican los swells dentro de las variaciones breves de tensión, ubicándolos dentro del rango temporal que va desde medio ciclo hasta un minuto [2] y su origen puede estar asociado a cambios bruscos en la carga o en la configuración del sistema, aunque su frecuencia de aparición es menor que la de los sags su impacto puede ser igual o mayor debido al estrés eléctrico que causa sobre equipos y la activación de protecciones [3].

INTERACCIÓN E IMPULSO CAPACITIVO

La energización de un banco de capacitores se fundamenta en tres procesos principales, en primer lugar, se produce un impulso capacitivo ya que el capacitor inicialmente sin carga posee una diferencia de potencial respecto a la red generando corrientes de irrupción que excitan el sistema, este aporte reactivo abrupto modifica el equilibrio transitorio de potencias en el punto de conexión. En segundo lugar, el sistema formado por la inductancia de la red y la capacitancia del banco constituye un circuito RLC cuyas características determinan si las oscilaciones serán amortiguadas o subamortiguadas, cuando la amortiguación es baja se presentan picos de tensión cuya envolvente eleva el RMS temporal generando un swell [4]. Finalmente, la impedancia efectiva del sistema influye en la magnitud del fenómeno: una red rígida atenúa el efecto, mientras que una red suave lo amplifica, especialmente si la relación X/R del alimentador favorece una respuesta oscilatoria [5], [6].

GENERACIÓN DEL SWELL POR ENERGIZACIÓN DE BANCO DE CAPACITORES

La energización de un banco de capacitores es una causa reconocida de swell dentro de los sistemas de potencia [1], al cerrar el interruptor el banco que generalmente esta se conecta instantáneamente al sistema provocando una transferencia súbita de energía reactiva, la interacción entre la capacitancia recién incorporada y la inductancia equivalente de la red da lugar a un sistema transitorio tipo RLC en el cual puede surgir una oscilación subamortiguada que eleva momentáneamente la magnitud de la tensión RMS [4], este comportamiento depende directamente de la impedancia de cortocircuito de la red, la localización del banco dentro del alimentador y del punto exacto de la onda en el que ocurre el cierre. La energización del capacitor modifica la distribución de flujos reactivos y puede inducir variaciones de voltaje en barras adyacentes, este efecto se acentúa en sistemas

donde la impedancia de la red es elevada, ya que un aporte repentino de capacidad puede traducirse en incrementos más notorios de tensión [5] y puede verse amplificado si existen armónicos presentes en el sistema, debido a que la capacitancia altera la impedancia dependiente de frecuencia del sistema y puede interactuar resonantemente con ciertas componentes [1].

CASO REAL

En la subestación 34.5 kV /480 V se presentó un fallo destructivo en el transformador de 1000 kVA con una impedancia característica del 5.95%.

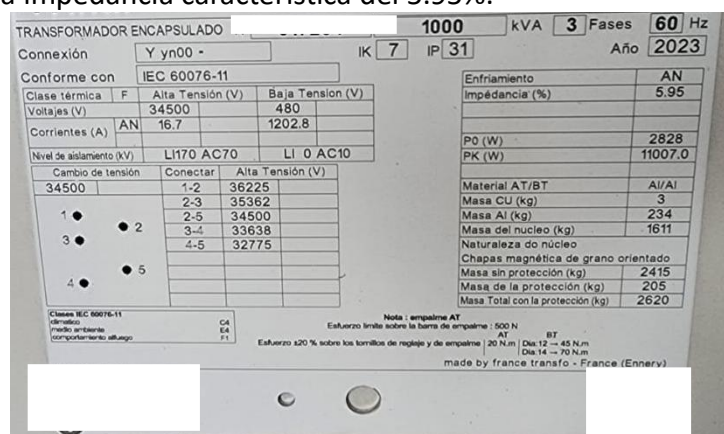


Figura 1. Datos de placa del transformador dañado.

La instalación cuenta con bancos de capacitores fijos y por etapas, cuya capacidad no se revela por motivos de confidencialidad. La tendencia de consumo de potencia reactiva durante la medición exhibe un mínimo de -107.5 kVar y un máximo de 285.2 kVar. Durante una conmutación del banco de capacitores, se da un Swell oscilatorio, el mismo se presenta en la figura 2.

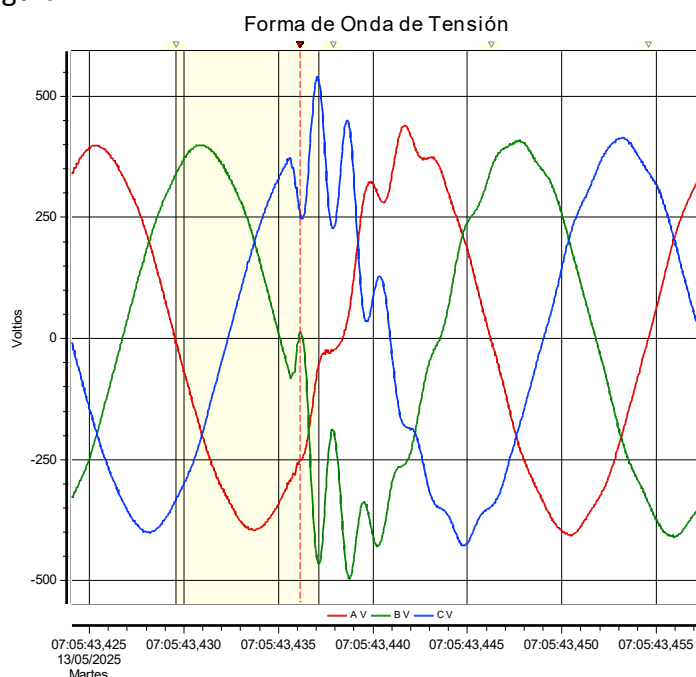


Figura 2. Oscilografía evento de sobretensión.

Es posible notar que se dan 6 oscilaciones y este evento abarca, de manera aproximada, el 65% del evento. Un método para aproximar la frecuencia de resonancia se presenta en la ecuación 1.

$$f_o = \frac{1}{\frac{1}{60} \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{5.1}{7.8}} \approx 550 \text{ Hz} \quad [1]$$

La frecuencia corresponde a la armónica número 9, confirmada en la figura 3 por el aumento de su amplitud. Este efecto de resonancia, inducido por la conmutación de capacitores, amplifica la respuesta y compromete la integridad de los equipos.

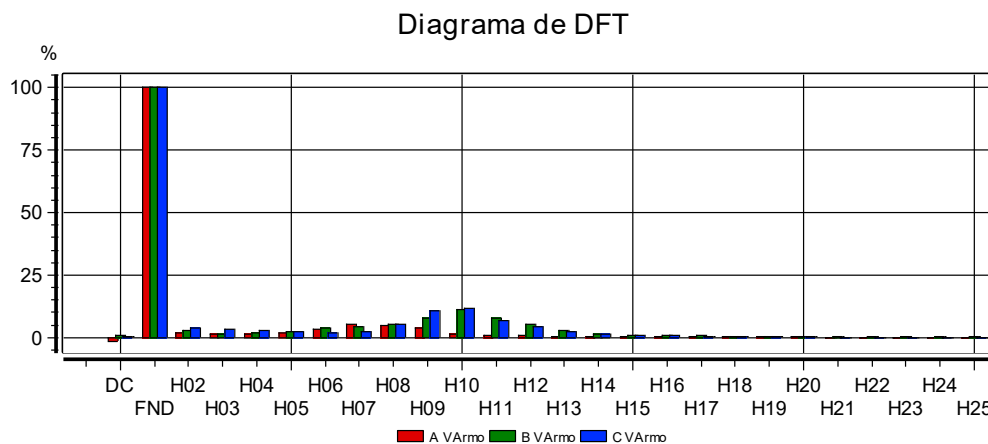


Figura 3. Espectro de frecuencia del evento oscilatorio.

CONCLUSIONES

1. La energización de bancos de capacitores puede generar *swells* de tensión entre 110 % y 180 % del valor nominal, tal como se observa en la figura 2, cuya duración transitoria compromete la estabilidad operativa del sistema.
2. La interacción entre la capacitancia y la inductancia de la red conforma un circuito RLC que, bajo ciertas condiciones, produce oscilaciones y resonancias locales que amplifican el fenómeno.
3. Los *swells* inducidos por la conmutación de capacitores pueden afectar equipos sensibles a este tipo de eventos, como los transformadores, generando fallos destructivos, tal como se evidencia en el caso de estudio, y comprometiendo el suministro y la calidad de la energía.

Recomendaciones

1. **Instalación de SPD (Surge Protective Devices):** Incorporar dispositivos de protección contra sobretensiones en puntos estratégicos en la red para limitar transitorios y mitigar los efectos de los *swells* causados por resonancias
2. **Revisión periódica de bancos de capacitores:** Implementar un programa de revisión y mantenimiento preventivo que verifique el estado de los capacitores, su correcta conmutación y la ausencia de defectos en interruptores y conexiones. Esto para reducir el riesgo de fallos y resonancias para garantizar un aporte estable de potencia reactiva.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Bingham, *"Sags and Swells"*, Dranetz Technical Paper, 1998. Disponible en: <https://www.dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/sags-and-swells.pdf>
- [2] Dranetz, *"PQ Terms & Definitions"* Disponible en: <https://www.dranetz.com/technical-support-request/pq-terms-definitions/>
- [3] P. Keebler, *"Ranking Electrical Disturbances – Part 2"*, ECM Magazine, 2018. Disponible en: <https://www.ecmweb.com/power-quality-reliability/article/20903621/ranking-electrical-disturbances-part-2-of-7>
- [4] Schneider Electric, *"Sag/Swell Module – Definitions and Behavior"*, 2024. Disponible en: https://product-help.schneider-electric.com/ION-Reference/content/ion_reference/sag-swell-module.htm
- [5] AnyFlip, *Conceptos de variaciones RMS*. Disponible en: <https://anyflip.com/hdslu/xckb/basic>
- [6] Elspec Ltd., *"What are Voltage Sags (Dips) and Swells"*. Disponible en: <https://www.elspec-ltd.com/what-are-voltage-sags-and-swells/>