

CASO DE ESTUDIO:

Swells por Energización de un Transformador Y aterrizada

Escrito por Gabriel Cambroner Hernández – C01571

1. Sinopsis (Introducción)

La energización de transformadores constituye una de las maniobras más críticas dentro de los sistemas eléctricos debido a los fenómenos transitorios que pueden generar aumentos temporales de tensión. Entre ellos, destaca el swell, definido por la IEEE Std 1159 como un incremento del nivel de tensión RMS entre un +110 % y un +180 % del valor nominal, con una duración que puede ir desde medio ciclo hasta un minuto [1]. Este fenómeno puede afectar la operación de dispositivos sensibles, comprometer el desempeño de protecciones y generar esfuerzos dieléctricos adicionales sobre equipos conectados.

Durante la energización, la corriente de irrupción presenta características altamente no lineales, incluyendo componentes de corriente continua, distorsión armónica significativa y una marcada asimetría provocada por la saturación transitoria del núcleo. Estas condiciones pueden interactuar con la impedancia del sistema y producir elevaciones temporales de tensión visibles como swells. En [2] se menciona que la corriente de irrupción puede provocar sobrevoltajes temporales, especialmente cuando coincide con frecuencias resonantes del sistema.

2. Fundamentos Teóricos del Fenómeno

El swell se clasifica como un aumento temporal del valor RMS de la tensión entre +110 % y +180 %, con una duración de entre 0.5 ciclos y 1 minuto [1]. Este comportamiento se asocia con fenómenos transitorios que inyectan energía adicional al sistema en un corto lapso, ya sea por:

- Energización de transformadores
- Desconexión súbita de cargas
- Fallas monofásicas
- Fenómenos resonantes

En el caso de la energización de transformadores, el swell surge como resultado de la interacción entre la saturación del núcleo y los parámetros reactivos del sistema.

2.2. Corriente de irrupción y su relación con el swell

La corriente de irrupción (*inrush current*) se origina cuando el flujo magnético requerido tras el cierre del interruptor supera el flujo remanente del núcleo. Este fenómeno, descrito detalladamente en [3] y [4] presenta:

- Una alta componente de corriente continua
- Distorsión no sinusoidal
- Fuerte dependencia del ángulo de cierre
- Elevada circulación de armónicos

En [5] muestran que incluso mediante técnicas avanzadas de energización secuencial, el inrush sigue siendo considerable.

La importancia del inrush para la formación del swell radica en que sus armónicos interactúan con la impedancia del sistema. Como se señala en [2], “la corriente de irrupción puede generar sobrevoltajes temporales cuando el sistema presenta baja potencia de cortocircuito”.

Durante los primeros ciclos, la corriente de irrupción presenta una forma de onda altamente distorsionada, con un pico que puede alcanzar varias veces la corriente nominal del transformador. Esta característica no sinusoidal contiene una gran cantidad de armónicos, principalmente de secuencia cero y negativa, que interactúan con la impedancia del sistema y pueden inducir elevaciones temporales de tensión. (imagen 1)

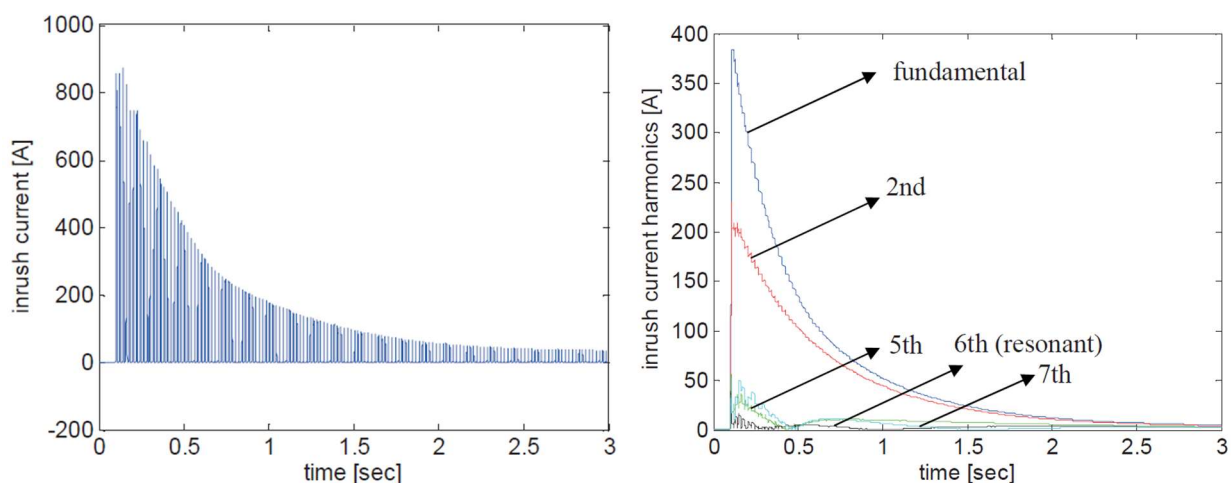


Imagen 1. Corriente de irrupción del transformador y espectro armónico durante la energización [2]

2.4. Influencia de la conexión Y aterrada en la aparición del swell

En la conexión Y aterrada, el neutro proporciona un camino de baja impedancia que permite la circulación de componentes de secuencia cero durante la energización. Esto genera:

- Saturación asimétrica del núcleo
- Desplazamiento temporal del neutro,
- Desbalance momentáneo entre tensiones de fase,
- Elevación en el valor RMS de las fases no energizadas.

En [7] se estudia y muestra cómo corrientes de inrush pueden incluso inducirse en transformadores vecinos (*sympathetic inrush*), lo que evidencia que los desbalances generados en la red durante la energización afectan significativamente la tensión del sistema.

En un transformador conectado en Y aterrada, el neutro proporciona un camino directo de retorno para las componentes de secuencia cero generadas durante la energización. Esto produce una saturación asimétrica entre las fases, lo que genera desbalances momentáneos en las tensiones de línea y fase.

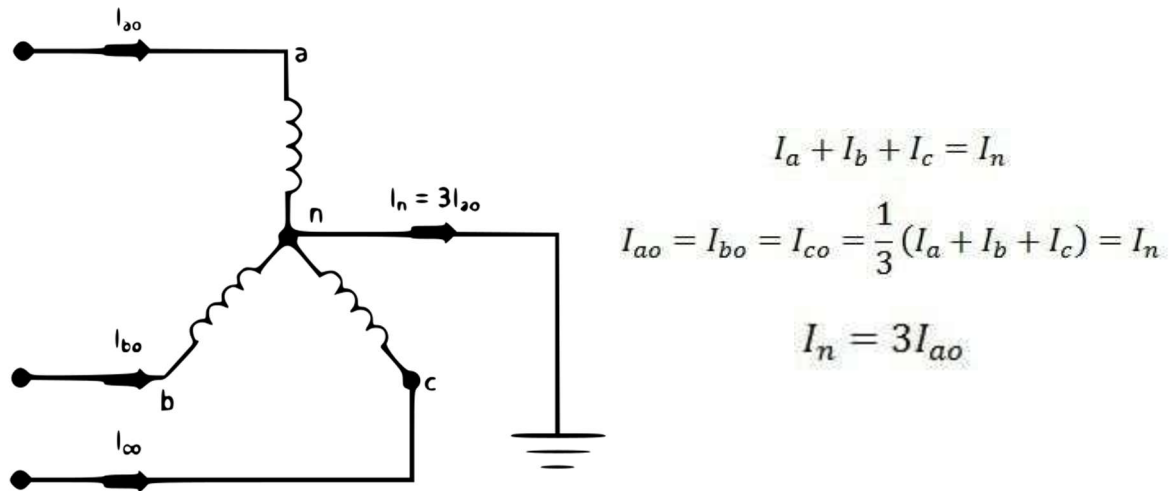


Imagen 3. Corriente de secuencia cero a través del neutro aterrizado

2.5. Sobretensiones internas en el devanado y modos resonantes del transformador

El fenómeno de las sobretensiones internas se estudia en [8] donde se demuestra que la interacción entre la capacitancia distribuida del transformador, la inductancia del devanado y la capacitancia de la línea puede generar modos resonantes que amplifican internamente las sobretensiones durante la energización. Estas pueden superar significativamente la tensión terminal, lo que se correlaciona con la aparición de swells externos.

Las técnicas para la mitigación de estos fenómenos se muestran en [9], donde técnicas basadas en control inteligente ANFIS pueden reducir la magnitud del inrush y, por consiguiente, las sobretensiones asociadas.

3. Caso Real

Análisis de Sobrevoltajes Resonantes en la Energización de un Transformador de 220/110 kV en un sistema eléctrico débil, este estudio se centra en el sistema eléctrico de Bosnia y Herzegovina, caracterizado como un sistema relativamente débil [2]. El análisis se basa en datos reales de la empresa eléctrica de Bosnia y Herzegovina para un nivel de tensión de 220 kV. El modelo de simulación analizó la energización de un transformador a través de una línea aérea.

Tabla 1. Parámetros del Transformador [2]

Parámetro	Valor
Tensión Nominal	220/110 kV
Potencia nominal	150 MVA
Tensión de cortocircuito	11 %
Resistencia por fase del devanado	0.292 Ω
Inductancia de dispersión	0.113 H

Tabla 2. Parámetros de la Línea de Transmisión [2]

Parámetro	Valor
Longitud	52 km
Resistencia por km	0.022 Ω /km
Inductancia por km	1.067 mH/km
Capacitancia por km	0.03032 μ F/km

La severidad de los TOV (Temporary OverVoltage) depende en gran medida de la relación entre la potencia nominal del transformador y la potencia de cortocircuito de la red (S_{tr}/S_{SC}) [2]. A medida que esta relación crece, el sistema se vuelve más débil y la frecuencia de resonancia asociada disminuye.

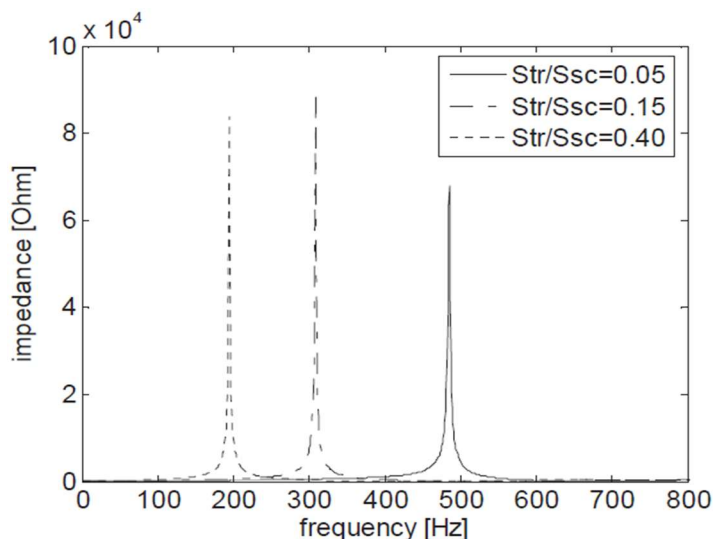


Imagen 4. variación de la impedancia equivalente del sistema (Z_{eq}) con la frecuencia para distintos valores de S_{tr}/S_{SC} [2]

Característica	Escenario 1: Sistema relativamente fuerte $S_{tr}/S_{sc} = 0.15$	Escenario 2 (Crítico): Sistema débil $S_{tr}/S_{sc} = 0.40$
Frecuencia de resonancia	308 Hz (cercana al 6° armónico)	194 Hz (cercana al 4° armónico)
Armónicos predominantes en la corriente de irrupción	Armónicos 5°, 6° y 7° con baja magnitud	4° armónico con magnitud significativamente mayor
Riesgo de resonancia	Bajo	Alto
Tipo de sobrevoltaje observado	No se presentan TOV sostenidos	Se presenta un TOV armónico sostenido
Magnitud del sobrevoltaje	Baja	Alta
Duración del sobrevoltaje	Corta	Larga
Comportamiento general del transformador	Sobretensiones leves y transitorias	Sobrevoltajes de alta energía y duración prolongada

Tabla 3. Comparación de Escenarios de Energización y Comportamiento de Sobrevoltajes [2]

El estudio e [2] demostró que la magnitud y duración de los TOV aumentan considerablemente en sistemas eléctricos débiles, como el caso analizado en Bosnia y Herzegovina. Las consecuencias más relevantes incluyen:

1. Aislamiento del Transformador:
Los sobrevoltajes sostenidos pueden provocar esfuerzos dieléctricos que deriven en fallas entre espiras, deterioro del aislamiento sólido y envejecimiento acelerado del aceite.
2. Descargadores de Sobretensión (MOA):
Los TOV armónicos imponen un incremento significativo en la energía que los MOA deben disipar, lo cual puede comprometer su vida útil o desencadenar fallas.

3. Incremento del Estrés Energético:

- El estrés energético en el MOA aumenta conforme se incrementa la relación S_{tr}/S_{SC} .
- Cuando la longitud de la línea se duplica (por ejemplo, de 52 km a 104 km), el sistema se aproxima aún más al estado resonante, generando sobrevoltajes más altos y aumentando drásticamente la energía que debe disipar el MOA.

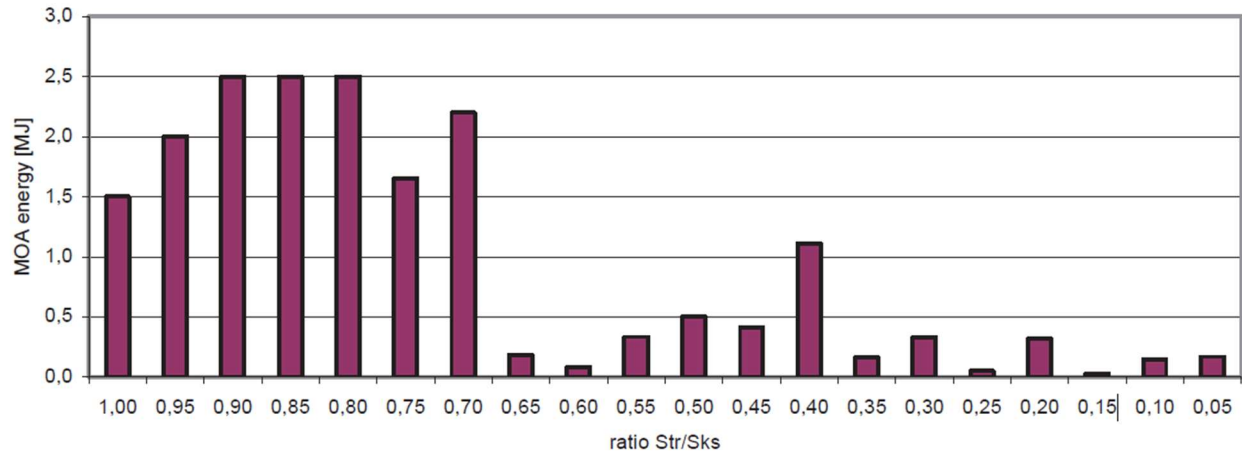


Imagen 5. Energías de descarga del MOA para una longitud de línea de 52 km, $\Phi_r = 0$. [2]

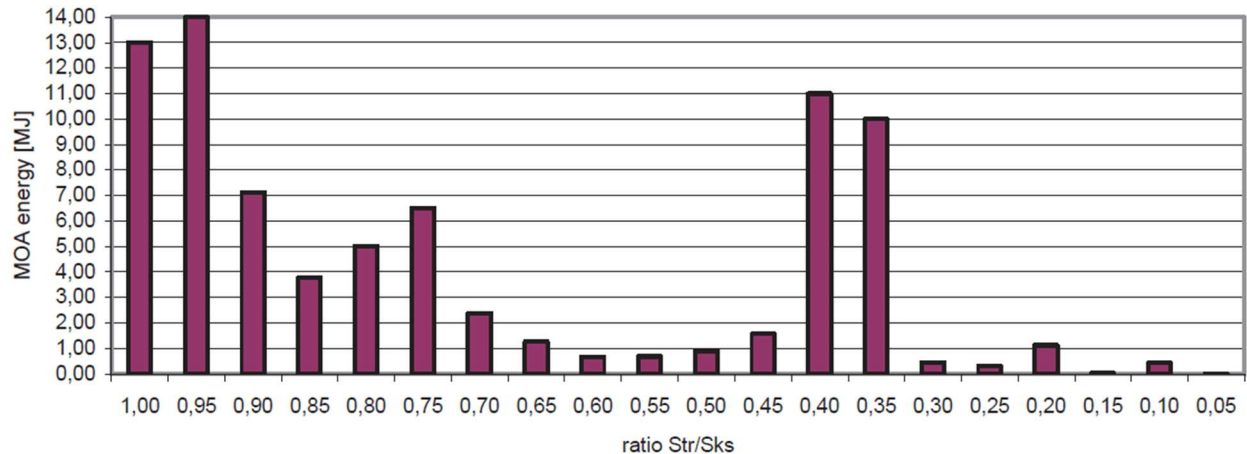


Imagen 6. Energías de descarga del MOA para una longitud de línea de 104 km, $\Phi_r = 0.8 \Phi_{nom}$. [2]

4. Conclusión

La aparición de swells durante la energización de transformadores en conexión Y aterrada es un fenómeno complejo que resulta de la combinación de saturación del núcleo, circulación de corrientes de secuencia cero, interacción resonante entre el sistema y el transformador, y características transitorias del inrush. La literatura revisada demuestra que estos swells pueden amplificarse en sistemas eléctricos débiles, con baja potencia de cortocircuito o en presencia de capacitancias elevadas, y que los modos resonantes internos del devanado pueden contribuir significativamente a su magnitud y severidad.

Referencias

- [1] IEEE Std 1159-2019, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 2019.
- [2] A. Tokić and I. Uglešić, “Power Quality Problems Due to Transformer Inrush Current,” *Journal of Energy*, vol. 59, pp. 11–18, 2010.
- [3] P. Heretík et al., “Research on Transformer Interaction Caused by Inrush Current,” *WSEAS Proc. Electric Power and Energy Systems*, pp. 333–337, 2013.
- [4] R. Gopika and D. Sankar, “Study on Power Transformer Inrush Current,” *IOSR-JEEE*, 2017.
- [5] M. Jamali et al., “Mitigation of Magnetizing Inrush Current using Sequential Phase Energization,” *Electronics and Electrical Engineering*, 2011.
- [6] V. Valverde et al., “Ferroresonance in Voltage Transformers,” *Univ. of Basque Country*, Manuscript.
- [7] U. Rudez and R. Mihalic, “Sympathetic inrush current phenomenon,” *Electric Power Systems Research*, 2016.
- [8] J. Furgał et al., “Analysis of Internal Overvoltages in Transformer Windings,” *Energies*, vol. 13, 2020.
- [9] M. T. Alkhayyat et al., “Power Transformer Inrush Current Minimization,” *IJEER*.
- [10] “Corriente de secuencia cero UNIGAL,” *UNIGAL.MX*, Mar. 15, 2022. <https://unigal.mx/corriente-de-secuencia-cero/>