

## **CASO DE ESTUDIO:**

# ***ESTUDIO DE SWELL POR ENERGIZACIÓN DE UN TRANSFORMADOR CONECTADO EN ESTRELLA ATERORIZADA***

Escrito por Ing. Otto Francisco Kikut Lobol, 2025-06-30.

## **SINOPSIS**

La energización de un transformador trae consigo la presencia de una corriente, usualmente de valores más altos que los nominales, conocida como corriente de energización, la cual es un fenómeno con varias consecuencias negativas para la red eléctrica alimentada por el transformador energizado [1], lo cual puede terminar con la operación nula del transformador mismo[2]. Uno de estos problemas precisamente son los swells, los cuales pueden llegar a comprometer el sistema eléctrico, por lo cual, es necesario tomar medidas preventivas y buenas prácticas con el fin de evitar dichos problemas y mantener fiabilidad para las cargas eléctricas.

## **SWELL Y CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN EN UN TRANSFORMADOR**

Un fenómeno transitorio en los transformadores es bastante común, el cual modifica factores como su tensión o su corriente durante un breve periodo de tiempo, entrando en esta definición precisamente los Swells, los cuales se reconocen por un aumento momentáneo de la tensión eléctrica y pueden ser causados por distintas causas, entre ellas, la corriente de energización generada al energizar un transformador, la cual en últimas puede llegar a causar fallas o incluso la desconexión del transformador. [3]

La corriente de energización tiene varias causas, entre ellas la saturación del núcleo del transformador, flujo residual presente en el núcleo del transformador, o incluso por muchas conexiones realizadas simultáneamente. Además, la magnitud de esta corriente puede variar según las condiciones de la red, su tensión, su frecuencia, etc., hasta las características del mismo núcleo del transformador. [3]

El campo de los transformadores es bastante amplio y se pueden estudiar bastantes casos, con distintas conexiones o incluso con distintos enfoques, de manera que se pueda entender de mejor manera el fenómeno de la corriente de energización. Un caso de simulación es enfocándose en la condición de cruce por cero de la tensión, la cual puede propiciar corriente de energización de magnitud aún mayor, incluso el doble, que las ya esperadas. Si bien es cierto, esta condición es rara en la energización del transformador, al mismo tiempo es completamente posible y se debe considerar como un caso extremo que podría afectar el sistema gravemente al inducir corrientes de magnitudes mayores a las esperadas. Existen medidas para reducir estas corrientes en caso de ocurrir, como puede ser la instalación de impedancias externas o la consideración de materiales específicos en la construcción del núcleo del transformador. [4]

Otro caso en el que se puede ahondar es en el flujo remanente en el núcleo del transformador, el cual es una de las causas de la corriente de energización, y que siempre estará

presente debido a los materiales ferromagnéticos que se utilizan en la construcción de los transformadores. Este tiene una influencia considerable en la corriente de energización, comparado con otros factores como el ángulo de encendido, la tensión de energización o incluso la resistencia, ya que al mantener estos constantes y variar el flujo remanente mediante simulación, se puede observar un incremento en la corriente de más del doble, lo cual indica la atención que se debe tener con el flujo remanente en la operación del transformador [5]. Además, al investigar acerca del flujo remanente es necesario conocer y entender la curva de magnetización del transformador, donde el comportamiento de la misma influirá en la corriente de energización, ya que de simulaciones se puede observar que la pendiente de la curva de magnetización en saturación extrema es el factor que más influye en la amplitud de esta. [6]

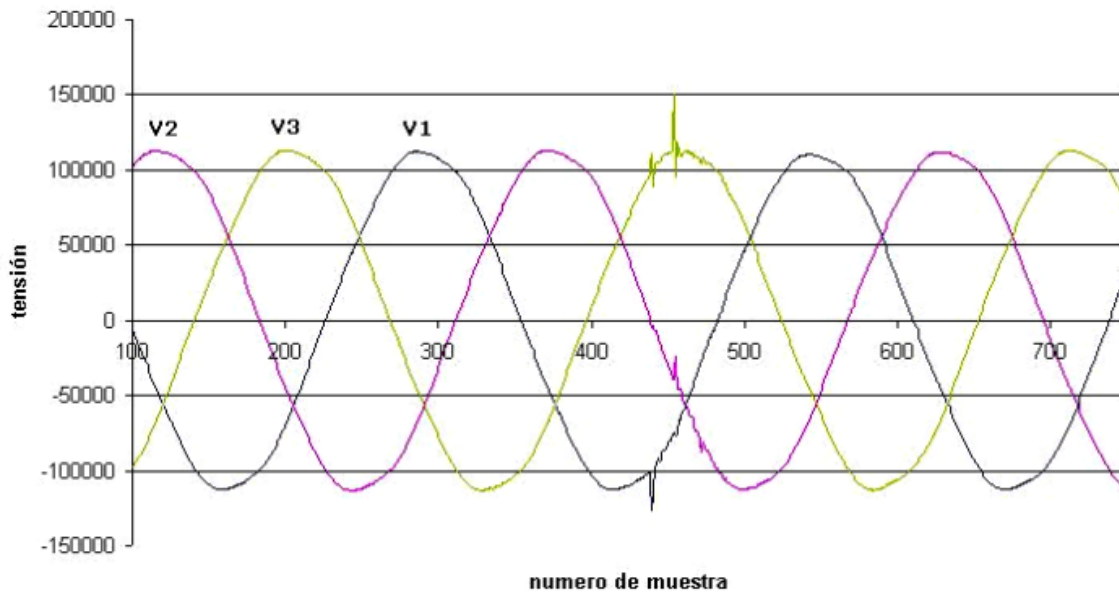
Un punto de vista a considerar también es el efecto de la energización de un transformador en otros transformadores adyacentes de la red, causando la aparición de corriente de energización en estos que ya se encuentran en condiciones de operación. Además, la amplitud de la corriente de energización variará según la carga conectada a los transformadores casos, siendo la mayor amplitud en los casos que no se tienen cargas conectadas. Además, casos como generadores conectados al transformador afectado pueden disminuir la amplitud de la corriente de energización. [7]

Existen diferentes elementos en la red que pueden influir o contrarrestar la corriente de energización, por ejemplo muchas veces capacitancias en paralelo conectadas a los transformadores o incluso en paralelo a los interruptores favorecen la magnitud de la corriente de energización, por lo que reducir la capacitancia es un método a considerar y tener presente y así proteger el transformador y los equipos que alimenta [8].

Adicionalmente, es importante que las protecciones puedan identificar la corriente de energización y no dispararse como si fuera una corriente de falla; para esto existe un método basado en considerar las armónicas de corriente, específicamente la segunda armónica, la cual se relaciona con la corriente de energización, con el fin de diferenciarla de las corrientes de falla, y así evitar disparos de protecciones innecesarias al energizar el transformador. [9]

## **CASO REAL**

El caso analizado se presentó en la subestación de Heredia al energizar el transformador 2 FUJ 3-76 y fue presentado en el trabajo de proyecto eléctrico por J. Quesada. [10]. Este transformador tiene una potencia de 20/30 MVA y se encarga de reducir la tensión de 138 kV a 34.5 kV [10]. Como se puede apreciar en la figura 1, alrededor del quinto ciclo las tres tensiones sufrieron un aumento de tensión, relacionado también a la corriente de energización previamente discutida. En la fase 1 se observa un aumento de alrededor de 2000V, la fase dos no se vio tan afectada en comparación con las otras, especialmente la fase 3 en donde se observa un aumento repentino de tensión que alcanzó los 15000V, casi 5000V más del máximo de la onda en condiciones normales.



**Figura 4.10: Transitorio al introducir el transformador 2 en la subestación Heredia**

Figura 1. Swell por energización, caso real. [10]

## POSIBLE SOLUCIÓN

Como previamente se discutió, este fenómeno puede tener consecuencias negativas con el transformador y la red, por lo que es importante tomar medidas para evitar que ese swell sea de magnitudes tan altas, y por ende, lo mismo para la corriente de energización. Existen diferentes métodos de reducir la magnitud de la corriente de energización, siendo algunos más eficaces que otros pero a veces no tan prácticos, por lo que se debe conocer bien lo que se necesita y las condiciones del sistema antes de elegir una solución final; bajo ese entendido se presentan a continuación un conjunto de posibles soluciones. [1]

Un método es el de reducir el flujo remanente, el cual como se discutió, se relaciona directamente con la corriente de energización, lo cual se logra mediante la implementación de un capacitor en el lado primario del transformador, logrando reducir la magnitud de la corriente de energización hasta en un 15%. De manera similar, se puede utilizar el método de insertar una resistencia antes de que el contactor principal se cierre y desconectando la misma cuando este entra en el circuito, lo cual trae resultados similares al del método del capacitor. Estos dos métodos se pueden combinar para reducir aún más el flujo residual lo cual permite reducir la magnitud de la corriente de energización hasta un 29%. [1]

Adicionalmente, se puede incluir el método de una carga auxiliar, utilizando un equipo de almacenamiento de energía magnética superconductora, el cual se encarga de reducir la corriente de energización bastante pero al desconectarse aumenta el doble la corriente reducida, aún así, logra una magnitud menor que la conseguida por el método combinado del capacitor y

la resistencia, y además, se puede combinar con estas, método que logra reducir la corriente de energización hasta en un 50%. Existen métodos más eficientes que incluso pueden evitar que la corriente de energización supere el valor de corriente nominal, sin embargo su aplicación requiere una coordinación precisa entre los interruptores automáticos, lo cual se traduce en una inversión de dinero alta y puede que no sea rentable. [1]

De los métodos anteriores, se recomendaría utilizar la combinación del capacitor y la resistencia para reducir la corriente de energización cerca de un 30%, y según las necesidades de la red, considerar la compra de un equipo de almacenamiento de energía magnética superconductora en el caso de que las mejoras fueran considerables y trajera un beneficio real a la subestación.

## **CONCLUSIÓN**

Los swells y la corriente de energización son fenómenos directamente relacionados a la energización de los transformadores, los cuales se pueden ver afectados por las magnitudes altas que estos fenómenos pueden llegar a alcanzar, por lo que es importante no solo identificar sino también controlar los mismos utilizando métodos que logren reducir dicha magnitud según las necesidades de la red eléctrica donde se encuentre el o los transformadores.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] M. Tarafdar Hahg and M. Valizadeh, "Analysis and Comparative Study of Transient Inrush Current Reduction Methods" in International Power Engineering Conference, 2007, pp. 287-291.
- [2] Y. Song, H. Jia, X. Xu and L. Yu, "Simulation Analysis of Inrush Current of Three Phase Transformer Based on MATLAB" in 29th Chinese Control and Decision Conference, 2017, pp. 3983-3985.
- [3] M. C. Nitu, I. D. Nicolae, L. A. Dina and P. M. Mircea, "Power Transformer Inrush Current Analysis: Simulation, Measurement and Effects", *Applied Sciences.*, vol. 14, no. 23, 10926, 2024.
- [4] A. Farazmand, F. de León, K. Zhang and S. Jazebi, "Analysis, Modeling, and Simulation of the Phase-Hop Condition in Transformers: The Largest Inrush Currents", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 4, pp. 1918-1926, 2014.
- [5] W. Ge and Y. Wang, "Simulation and Impact Analysis of Remanent Flux on Power Transformer Inrush Current", in IEEE International Magnetics Conference, 2018, 1800039.
- [6] N. Chiesa, B. A. Mork, and H. K. Høidalen, "Transformer Model for Inrush Current Calculations: Simulations, Measurements and Sensitivity Analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2599-2608, 2010.
- [7] Z. Zhang, X. Yin, Q. Guo, W. Cao and X. Yin, "The Mathematical Analysis and Modeling Simulation of Complex Sympathetic Inrush for Transformers", in Computing Conference, 2017, pp. 1362-1367.
- [8] S. Zhu, T. Wang, H. Jin and J. Wen, "Simulation Analysis of Magnetizing Inrush Current of 500kV Transformer", in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2010, 853 012027.
- [9] R. Hamilton, "Analysis of Transformer Inrush Current and Comparison of Harmonic Restraint Methods in Transformer Protection", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 49, no. 4, pp. 1890-1899, 2013.
- [10] J. Quesada, "Medición y reglamentación de la calidad de la onda de tensión en el Sistema Eléctrico Nacional", Proyecto Eléctrico, Universidad de Costa Rica, San Pedro, San José, 2005.