

Comportamiento de transformadores eléctricos bajo condiciones de GIC mediante el uso de ATP

Daniel Guillén, Gina Idárraga Ospina
FIME-UANL
gidarraga@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo muestra el comportamiento eléctrico que presenta un transformador de potencia cuando se expone a condiciones de corrientes geomagnéticas inducidas (GIC), que lo hacen operar en la región de saturación y el flujo de campo magnético cambia de acuerdo al diseño del núcleo del transformador. Estas características se pueden calcular mediante técnicas de simulación de elemento finito, y en este trabajo se pretende mostrar el comportamiento de la corriente de excitación y magnetización de un transformador de potencia cuando se expone a condiciones de GIC utilizando simulación mediante Electromagnetic Transient Program (ATP).



PALABRAS CLAVE

Transformador, corrientes geomagnéticas inducidas.

ABSTRACT

This work presents the electrical behavior that a power transformer exhibits when it is exposed to induced geomagnetic currents (GIC), which makes it to operate in the saturation region and the magnetic flux changes accordingly to the design of the nucleus of the transformer. This characterisitic can be calculated by means of finite element simulation techniques, and in the aim of this work is to show the behavior of the excitation and magnetization currents of a power transformer when exposed to GIC conditions using Electromagnetic Transient Program (ATP) software.

KEYWORDS

Transformer, gemagnetic induced currents.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad ha surgido un gran interés por conocer los efectos que provocan la corrientes geomagnéticas inducidas (GIC) en los equipos que conforman el sistema eléctrico de potencia (SEP), en particular los transformadores de potencia debido a que las GIC se introducen por el neutro de la conexión estrella (Y) al sistema eléctrico. El estudio de este fenómeno nace a raíz de mitigar el impacto

de los disturbios magnéticos solares (normalmente llamados disturbios geomagnéticos) en sistemas eléctricos de potencia, debido a que desde hace varios años se han reportado una serie de tormentas geomagnéticas, mejor conocidas como tormentas solares, las cuales modifican los campos magnéticos de la tierra en amplias zonas geográficas debido a las partículas solares que interactúan con la magnetósfera, induciendo corrientes que fluyen a través de los sistemas aterrizados. Por esta razón el interés de estudiar el efecto que provocan las GIC en transformadores de potencia, considerando que en los próximos años se espera un incremento en la actividad solar.

Las GIC se caracterizan por ser señales de baja frecuencia cuyo rango reportado se encuentra entre 0.001 y 0.1Hz,^{1,2} esto permite que la señal de GIC pueda considerarse como una señal de corriente directa. Entonces, durante el periodo que el transformador de potencia se expone a condiciones de GIC, este se encuentra bajo excitación de corriente alterna (CA) y corriente directa (CD).

TEORÍA DEL TRANSFORMADOR

Un transformador al ser excitado por una fuente de CD no es capaz de magnetizar su núcleo de acuerdo con la ley de inducción de Faraday,³ sin embargo al ser alimentado con una fuente de voltaje de CA el transformador se magnetiza y como resultado se induce un voltaje en el lado secundario del transformador, este voltaje inducido de acuerdo “al modelo mostrado en la figura 1” se puede expresar de la siguiente manera:

$$e_{ind_ca} = v_{ca} - R_p i_{exc} - L_p \frac{di_{exc}}{dt} \quad (1)$$

donde: i_{exc} representa la corriente de excitación, la cual es la suma de la corriente de magnetización (corriente que pasa por la inductancia no lineal, L_m)

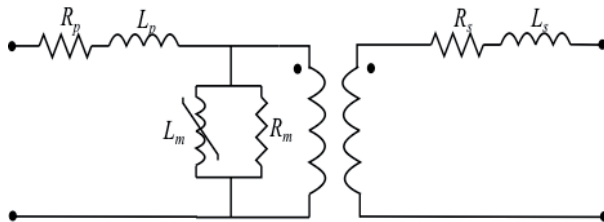


Fig. 1. Modelo simplificado del transformador.

y la corriente que fluye por la resistencia del núcleo (R_m), v_{ca} es el voltaje de excitación de CA, R_p y L_p son la resistencia e inductancia del transformador referida al lado primario.

Si ahora se considera que el transformador es alimentado por una fuente de CD y una de CA, el transformador se magnetizará y por lo tanto existe voltaje inducido que provoca un flujo de campo magnético a través de su núcleo diferente al producido por la fuente de CA. Esto es muy similar a lo que ocurre con un transformador de potencia bajo condiciones de GIC, entonces (1) se puede reescribir como:

$$e_{ind_tot} = v_{cd} + v_{ca} - R_p i_{exc} - L_p \frac{di_{exc}}{dt} \quad (2)$$

De la ecuación (2), se puede ver que el voltaje inducido depende de la respuesta de ambas fuentes CA y CD, por lo tanto el flujo magnético a través del núcleo del transformador será también la suma de ambas respuestas:

$$\phi = \phi_{cd} + \phi_{ca} \quad (3)$$

En el momento que se comienza a incrementar el flujo magnético a través del núcleo del transformador, este tiende a trabajar en la región de saturación, la cual dependerá de las características propias del material ferromagnético. En la ecuación (3), las respuestas de CA y CD se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \phi_{ca} &= \frac{1}{N} \int e_{ind_ca} d(t) \\ \phi_{cd} &= \frac{AN \mu I_{cd}}{l} \end{aligned} \quad (4)$$

donde: A representa el área de la sección del núcleo, N es el número de vueltas del transformador, μ es la permeabilidad del material ferromagnético, l representa la longitud de la sección del núcleo y finalmente I_{cd} es la corriente de DC o GIC que fluye a través del núcleo.

EFFECTOS GENERADOS POR LAS GIC EN TRANSFORMADORES

En el momento que se introducen las GIC por el neutro del transformador, este tiende a cambiar su punto de operación de acuerdo con Masoum

y Albertson ^{4,5} el nuevo punto de operación del transformador tiende a estar en la región de saturación, lo cual genera una serie de inconvenientes no deseados para el equipo.

A. Saturación

El flujo de GIC por el núcleo del transformador provoca un flujo magnético mayor que en condiciones normales de operación; si el flujo magnético incrementa a razón de GIC, el núcleo del transformador tiende a saturarse debido a que su nuevo punto de operación estará en la región de saturación, esto provoca que la señal de la corriente de excitación se encuentre saturada cada medio ciclo. En el momento que el transformador alcanza el nuevo punto de operación se dice que está en equilibrio de saturación.⁶

B. Distorsión Armónica

En el instante que el núcleo del transformador se satura debido al flujo GIC, la corriente de excitación se distorsiona notablemente provocando un aumento en las magnitudes de las componentes armónicas, las cuales se incrementan a razón del valor de GIC. Entre mayor es el valor de GIC, mayor será la distorsión armónica total (THD) de la corriente de excitación del transformador. Utilizando la ecuación (5), se puede determinar el TDH de la señales de corriente o voltaje según sea el caso.

$$THD = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (5)$$

donde: I_1 es la magnitud de la componente fundamental e I_n representa la magnitud del n ésimo armónico.

C. Pérdidas de Potencia Reactiva

Otro efecto que provocan las GIC en transformadores de potencia es el incremento en el consumo de potencia reactiva,⁷ el cual incrementa de forma lineal con el flujo de GIC por el núcleo el transformador, el consumo de potencia reactiva a su vez dependerá del diseño del núcleo del transformador⁸ y se puede calcular usando la siguiente expresión:

$$Q(MVar) = k * GIC + Q_0 \quad (6)$$

Donde: k es factor que depende del diseño del núcleo del transformador, GIC es la corriente que fluye por el neutro del transformador y Q_0 es la potencia reactiva en condiciones normales.

COMPORTAMIENTO DEL TRANSFORMADOR EN CONDICIONES DE GIC

Con el objetivo de ejemplificar el comportamiento de la corriente de excitación en un transformador de potencia bajo condiciones de GIC, se utilizó “el esquema mostrado en la figura 2”, donde el circuito representa el modelo simplificado de un transformador cuyos datos son: 240 MVA, 230/500 kV con una reactancia de dispersión del 8 %.

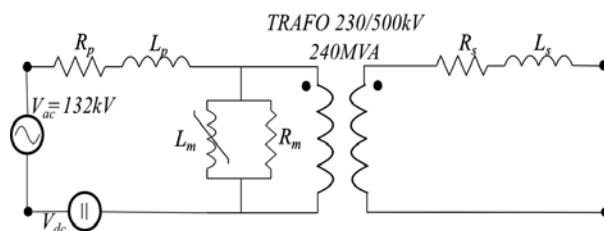


Fig. 2. Transformador bajo excitación de CA y CD.

De acuerdo con “el modelo presentado en la figura 1”, el comportamiento eléctrico del transformador de potencia en condiciones normales de operación y sin carga “es el que se presenta en la figura 3”, donde la señal de color verde corresponde a la corriente de excitación y la de color rojo a la corriente de magnetización.

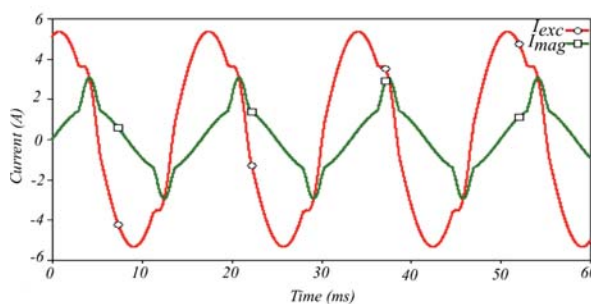


Fig. 3. Señales de corriente en condiciones normales y sin GIC.

En el instante que aparece un flujo de GIC por el neutro del transformador, el punto de operación se mueve a la región de saturación, entonces el nuevo punto de operación se alcanza en el instante que el transformador llega al equilibrio de saturación.⁹ Esto se puede ver en la figura 4, observe que la señal

correspondiente a la corriente de magnetización (color rojo) se incrementa hasta alcanzar un nuevo punto de equilibrio, el cual se logrará en aproximadamente 8s, en este instante el valor promedio de la señal es diferente de cero y se mantiene constante después de los 8s. De forma similar la corriente de excitación (color verde) se incrementa pero en menor cantidad en comparación con la corriente de magnetización.

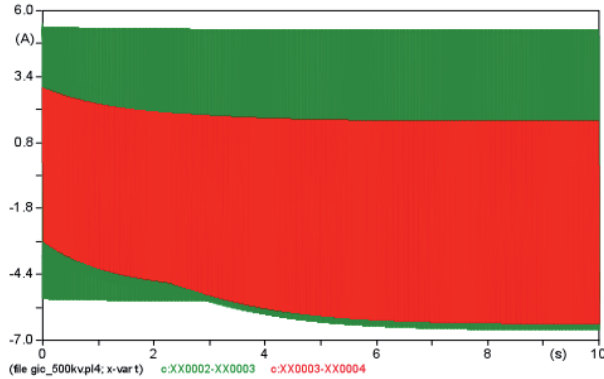


Fig. 4. Señales de corriente para condiciones de GIC.

Al momento que la corriente de magnetización alcanza el equilibrio de saturación, ésta provoca un efecto secundario (distorsión de la señal) en la corriente de excitación del transformador. En la figura 5, se puede observar que la corriente de magnetización (color rojo), cada medio ciclo provoca una ligera distorsión en la señal de la corriente de excitación (color verde), debido a que la corriente de magnetización se encuentra saturada cada medio ciclo. Entonces el valor de la distorsión de las señales eléctricas dependerá de forma directa del valor de GIC inducido al transformador por su neutro de la conexión en estrella.

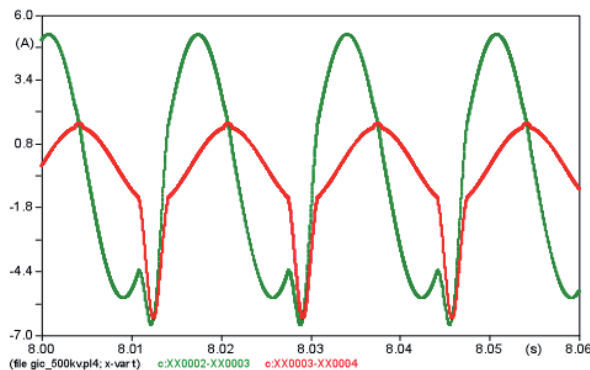


Fig. 5. Corriente de excitación y magnetización en condiciones de GIC.

CASO DE ESTUDIO

El sistema eléctrico utilizado para estudiar el comportamiento eléctrico de transformadores de potencia “se muestra en la figura 6”, en donde la rama de magnetización del transformador de potencia se representa con tres reactancias no lineales conectadas en estrella.¹⁰ La conexión del transformador es Δ -Y, y alimenta una carga de 120MVA con factor de potencia de 0.8 en atraso. La carga es alimentada a través de una línea de transmisión de 500kV con una longitud de 50 km.

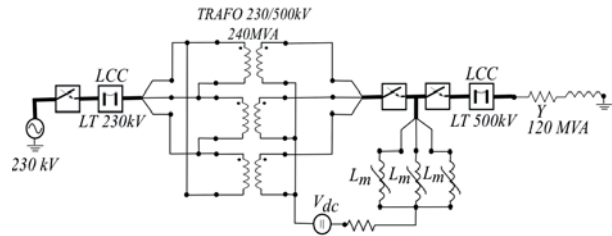


Fig. 6. Sistema eléctrico para análisis de transformadores bajo condiciones de GIC.

De acuerdo con “el circuito de la figura 6”, el interruptor “S” permanece cerrado durante el primer segundo y enseguida se conecta la fuente de CD, que simula el flujo de GIC a través de la rama de magnetización del transformador de potencia. En el instante que el transformador tiende a alcanzar el nuevo punto de operación, las corrientes por fase de la rama de magnetización se incrementan hasta llegar a la saturación de medio ciclo, como “se observa en la figura 7”.

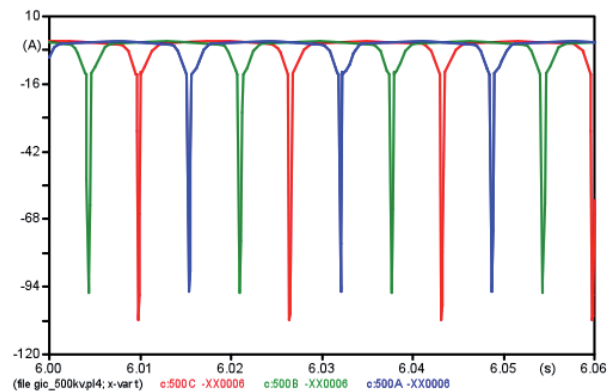


Fig. 7. Corrientes de magnetización bajo condiciones de GIC.

Un transformador al estar operando en la región de saturación provoca una distorsión en las corrientes de línea tanto del lado primario como del

lado secundario del transformador, esta distorsión se puede ver en la figura 8. La señal de corriente correspondiente al lado primario es la línea roja, mientras que la línea verde representa la corriente secundaria del transformador.

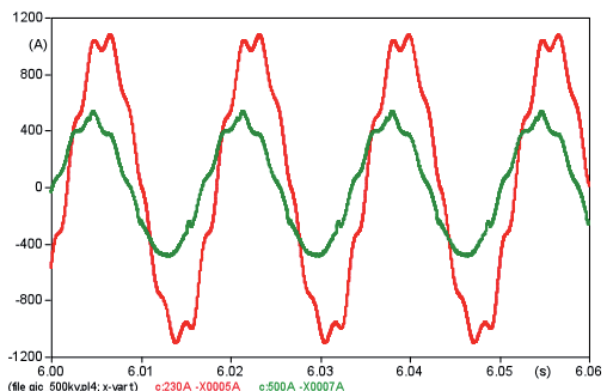


Fig. 8. Corrientes de línea para el lado primario y secundario del transformador bajo condiciones de GIC.

Al igual que las señales de corriente, también se ven afectadas las señales de voltaje. En la figura 9, se muestran los voltajes por fase, la señal de voltaje del lado primario (línea verde) se observa menos distorsionada debido al flujo de GIC por el transformador, mientras que el voltaje secundario resulta ser el más distorsionado (señal roja), esto se debe al tipo de conexión del transformador. De manera similar ocurre con las corriente por fase, sin embargo cabe recalcar que en la figura 8 se mostraron las corrientes de línea en donde la corriente del lado primario parece ser la más afectada, esto se debe al desbalance que ocasionan las corrientes de magnetización mostradas en la figura 7.

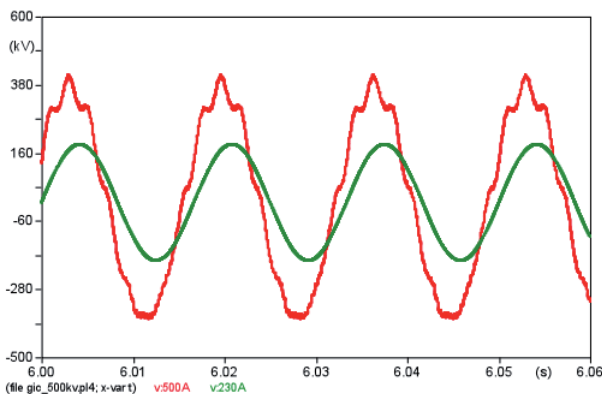


Fig. 9. Voltajes de fase, primario y secundario del transformador bajo condiciones de GIC.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla I, se pueden observar los resultados de la corriente de magnetización para diferentes valores de GIC, así como la distorsión armónica total de la señal. Se puede ver claramente que la distorsión de la señal está directamente ligada con el flujo de GIC a través de la rama de magnetización del transformador, entre mayor es el flujo de GIC mayor será la THD de la corriente.

Tabla I. Corriente de magnetización para diferentes valores de GIC.

I _{mag}	GIC					
	0	2	4	6	8	10
1	0.6795	1.0463	2.3535	4.1677	5.4678	6.7832
2	0.0167	0.3512	1.5168	3.2145	4.4913	5.7757
3	0.0160	0.3015	1.2627	2.7940	4.0374	5.2776
4	0.0151	0.2413	0.9723	2.3184	3.5247	4.7168
5	0.0140	0.1780	0.6902	1.8639	3.0370	4.1873
6	0.0128	0.1184	0.4510	1.4855	2.6342	3.7557
7	0.0114	0.0679	0.2722	1.2067	2.3389	3.4433
8	0.0100	0.0300	0.1563	1.0302	2.1561	3.2552
9	0.0086	0.0053	0.0904	0.9272	0.0460	3.1381
10	0.0071	0.0073	0.0575	0.8726	1.9834	3.0656
11	0.0057	0.0106	0.0403	0.8408	1.9396	3.0049
12	0.0043	0.0080	0.0273	0.8179	1.9001	2.9416
13	0.0031	0.0030	0.0139	0.7995	1.8611	2.8729
14	0.0020	0.0018	0.0019	0.7865	1.8237	2.8002
15	0.0010	0.0049	0.0093	0.7808	1.7899	2.7264
THD	5.80%	54.40%	100.86%	160.03%	210.98%	238.92%

CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN PARA DIFERENTES VALORES DE GIC

Los resultado mostrados en la tabla I, se obtuvieron por medio del programa de simulación ATP, donde la primera columna corresponde a la magnitud de la componente fundamental (1) y las componentes armónicas (2 en adelante), siendo 2 la primera componente armónica de la corriente de magnetización. Se puede observar que para valor de GIC nulo existe una ligera distorsión en la señal debida al pequeño desbalance que presentan las corrientes de magnetización por fase. A medida que se incremente el flujo de GIC por la rama de magnetización la distorsión de las señales eléctricas será mayor, sin embargo la distorsión no es el único efecto que provocan las GIC en transformadores.

Otra razón para estudiar el transformador bajo condiciones de GIC, es el aumento en el consumo de potencia reactiva, así como el incremento de la temperatura del tanque del transformador debido al reordenamiento de los flujos de campo magnético a través de su núcleo ferromagnético, esto último se puede ver usando técnicas de elemento finito.¹¹

CONCLUSIONES

El equipo más afectado de un sistema eléctrico bajo condiciones GIC es el transformador de potencia, por lo que sigue existiendo un gran interés por determinar los efectos que ocasionan las GIC en los transformadores, con el objetivo de garantizar el funcionamiento adecuado del equipo bajo estas condiciones. Por esta razón, el presente trabajo mostró el efecto secundario que ocasionan las GIC en los transformadores de potencia, siendo la rama de magnetización la parte más afectada. Sin embargo, no solo pueden presentarse problemas de distorsión de las variables eléctricas, sino también, incremento en el consumo de potencia reactiva, problemas en los sistemas de protección y aumento en la temperatura del transformador.

REFERENCIAS

1. C.M. Liu, L. G. Liu and R. Pirjola, Geomagnetically Induced Currents in the High-Voltage Power Grid in China, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 2368-2374, October 2009.
2. H. C. Tay and G. W. Swift, A Novel Method of Detecting Asymmetrical Transformer Core Saturation due to GIC, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 1, pp. 183-189, January 1984.
3. S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 4th ed.: McGraw-Hill, 2004.
4. M. A. S. Masoum and P. S. Moses, Influence of Geomagnetically Induced Currents on Three-Phase Power Transformers, in *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2008.
5. V. D. Albertson, J. G. Kappenman, N. Mohan and G. A. Skarbakka, Load-Flow Studies in the Presence of Geomagnetically Induced Currents, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-10, no. 2, pp. 594-607, February 1981.
6. M. Heindl, M. Beltle, M. Reuter, D. Schneider, S. Tenbohlen, D.T. Oyedokun and C.T. Gaunt, Investigation of GIC Related Effects on Power Transformers Using Modern Diagnostic Methods, in *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany, 2011.
7. B. Zhang, Y. Liu, L. Liu, M. McVey, R. M. Gardner and X. Xiao, Effect of Load Current on Leakage Flux of Transformer with Geomagnetically Induced Current, *EUROPEAN Transactions on Electrical Power*, vol. 21, pp. 65-173, 2011.
8. X. Dong, Y. Liu and J. G. Kappenman, Comparative Analysis of Exciting Current Harmonics and Reactive Power Consumption from GIC Saturated Transformers, in *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2001, pp. 318-322.
9. R.A. Walling and A.H. Khan, Characteristics of Transformers Exciting-Current During Geomagnetic Disturbances, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 4, pp. 1707-1714, October 1991.
10. N. Mohan, J. G. Kappeximan and V. D. Albertson, Harmonics and Switching Transients in the Presence of Geomagnetically Induced Currents, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 2, pp. 585-593, February 1981.
11. B. Bai, B. Xu and J. Lu, An Analysis to Force Received in Transformer Core under DC Bias Conditions, in *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Shenyang, China, August, 2011.