Efectos de las Corrientes Geomagnéticamente Inducidas sobre los transformadores

Parte 2

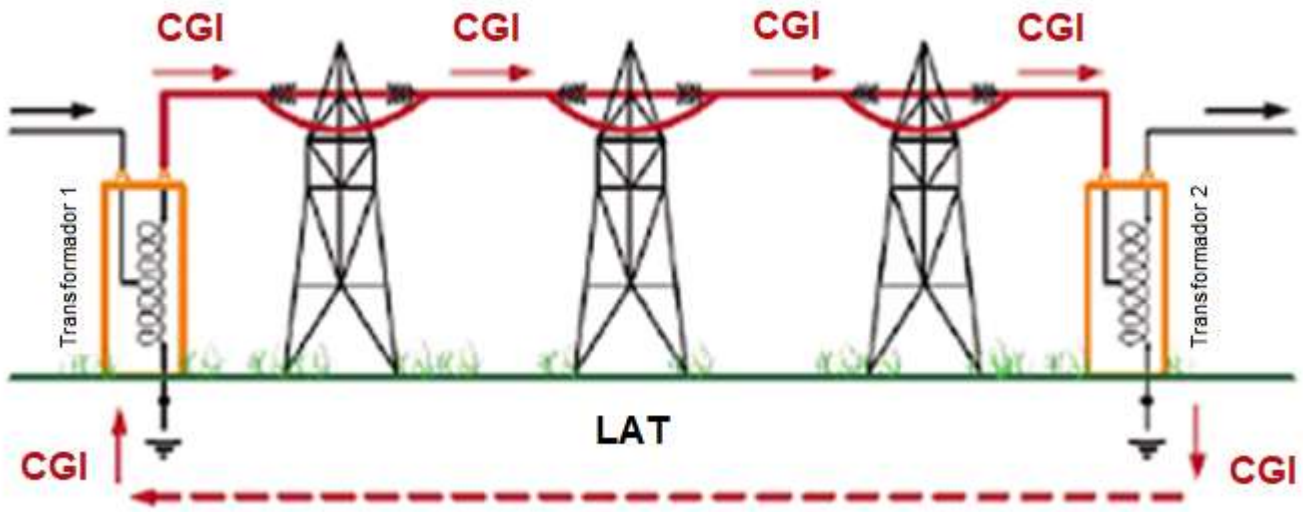
1. Efectos de las CGI sobre los transformadores

Como ya hemos comentado en la Parte 1, las CGI generadas por la actividad de las tormentas geomagnéticas, se introducen en el SEP a través de las puestas a tierra de los neutros de los transformadores (o autotransformadores), con sus bobinados conectados en estrella.

En la siguiente figura podemos apreciar este fenómeno, en donde se observa el camino de circulación de la CGI a través de la LAT, con entrada y salida por los neutros a tierra de los transformadores extremos y cerrándose a través de la misma tierra.

Recordemos que la CGI es una corriente cuasi estacionaria (de muy baja frecuencia) que a los fines del estudio la consideramos como una corriente en continua (de frecuencia cero).

Figura N° 1



La corriente CGI por fase, que circula en los bobinados de los transformadores, posee un valor muy superior a la corriente de magnetización de éstos (del orden de 8 a 20 veces), por lo que provocará, al ser una corriente en continua, un corrimiento o desplazamiento de la característica del flujo magnético en el núcleo.

La consecuencia será la saturación del núcleo magnético en la etapa del medio ciclo favorable a la circulación de la CGI y por lo tanto, se tendrá un significativo aumento de la corriente de magnetización, en dicho semiciclo.

El efecto inmediato no solamente será el de tener una onda de corriente de magnetización de elevado valor de pico en el semiciclo favorable a la circulación de la CGI, sino que también poseerá una característica asimétrica.

Justamente esta asimetría de la corriente resultante de magnetización, será la fuente que generará los armónicos que serán inyectados a la red por el transformador afectado.

Resumiendo, la saturación de medio ciclo provocará los siguientes problemas

- Generación de armónicos, convirtiendo al transformador en la fuente principal de los mismos. Se desarrollan tanto armónicos de orden par como impar, según se desprende del análisis espectral de la onda de la corriente de magnetización resultante.

- Sobrecalentamiento interno en el transformador, como consecuencia del aumento del flujo de pérdidas.

- Incremento de la potencia reactiva demandada por el transformador, lo cual lleva a la disminución de las tensiones en los nodos de la red.

Pero sin ninguna duda, el mayor problema para el SEP es la generación de armónicos como consecuencia de la operación en estado de saturación en los transformadores. Los efectos más nocivos se pueden detallar a continuación:

- Distorsión de la onda de tensión de la red, lo cual llevará a la pérdida de potencia transmitida en la red.
- Sobrecalentamiento de componentes, en especial los bancos de capacitores.
- Alteración en las actuaciones de las protecciones del SEP.
- Vibración con ruido audible en los transformadores.

2. Modelado de la perturbación

En este ítem procederemos a delinear un modelo sencillo para representar el fenómeno de la PGM sobre un SEP y también calcular el valor de la CGI.

Recordemos que el valor de la CGI será importante a la hora de evaluar el eventual proceso de saturación en el transformador, el cual, como ya hemos visto, es la causa principal de los problemas derivados en la instalación.

Para iniciar el modelo, en primer término se tiene que considerar la dependencia de la trayectoria de integración del campo geodésico, a lo largo de la configuración circuital, con el fin de obtener el PST. La expresión de cálculo viene dada, entre dos puntos del circuito, por:

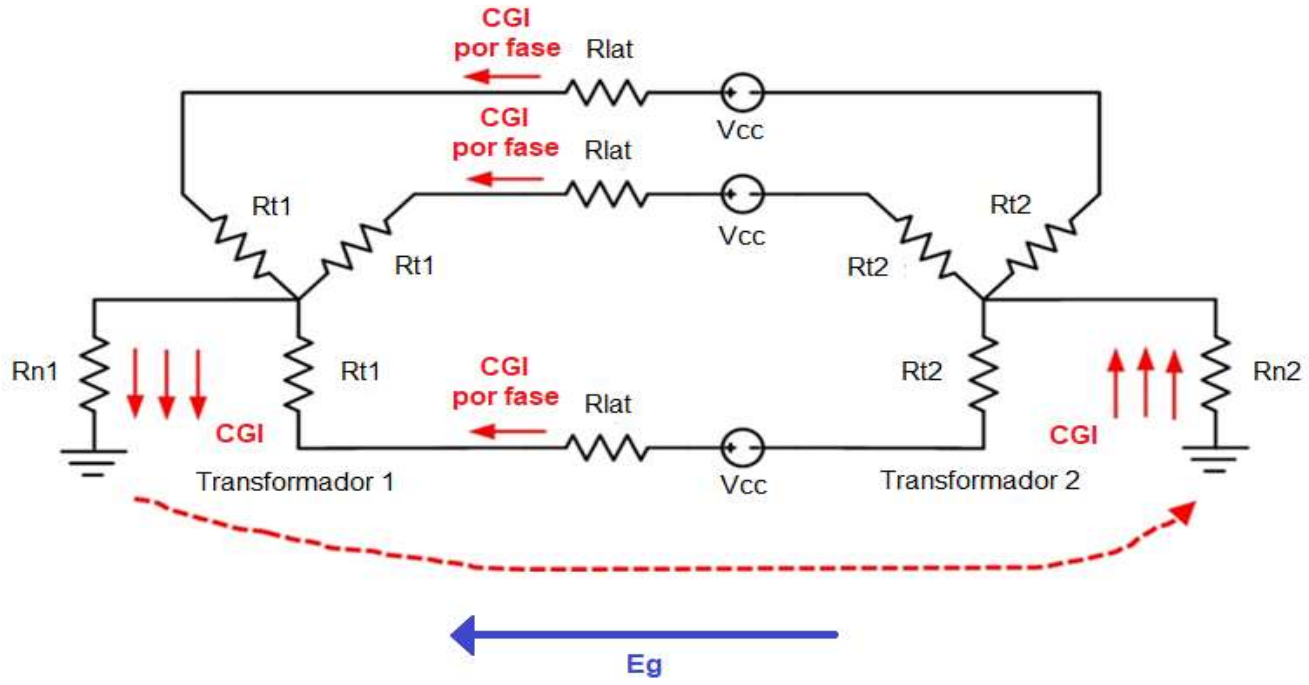
$$U_{ab(L)} = \int_a^b Eg\,.\ dl$$

Dicho de otro modo, será muy importante tener en cuenta la dirección del campo Eg en relación a la LAT en donde se aplicarán los cálculos, ya que el potencial es dependiente del camino o trayectoria de integración.

Por ejemplo, si la trayectoria de la LAT es perpendicular, en todo momento, a la dirección del campo Eg, entonces el potencial será nulo, no existiendo posibilidad de que la CGI circule en la red.

Otro hecho a tener en cuenta es el modo de inyección de la CGI al SEP. Sabemos que ésta circulará en el circuito conformado por los neutros a tierra de los bobinados en estrella de los transformadores, ubicados en los extremos de la LAT, como se muestra en la siguiente figura.

Figura N° 2



Destacamos el campo geoeléctrico (Ver Parte 1), dado por una dirección específica, así como la CGI inducida y las correspondientes por fase.

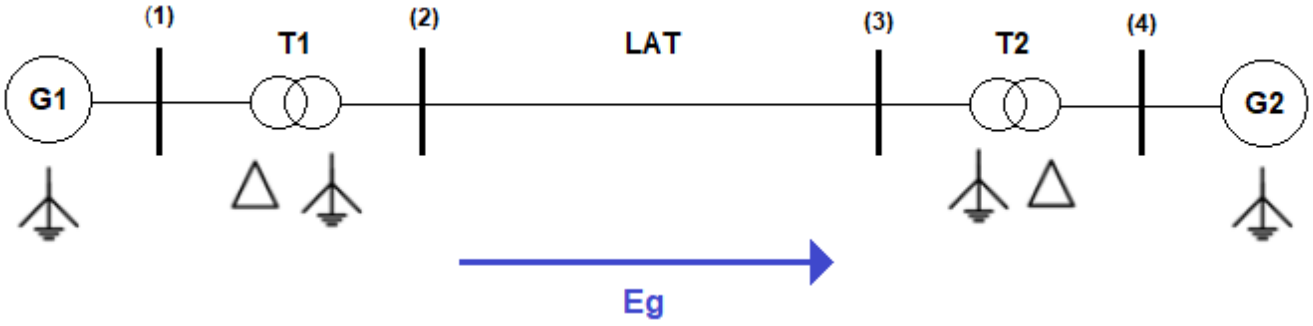
Muy importante a tener en cuenta es que las fuentes en continua (Vcc), que representan en el modelo al PST, se incorporan en las LAT, como se aprecia en la figura previa.

Por último, el PST y por lo tanto la CGI, son magnitudes de baja frecuencia, que en comparación con la frecuencia de la red, se pueden adoptar como cuasi estacionarias para los cálculos. A los fines del modelo se adoptan como magnitudes en corriente continua.

De lo anterior, se desprende que las reactancias no son consideradas y que los valores de los parámetros resistivos serán los correspondientes a los de corriente continua (valores menores a los de corriente alterna).

En base a lo antedicho podemos, a continuación, establecer un modelo sencillo, de un SEP conformado con 4 barras.

Figura N° 3



En este modelo se incorporan dos plantas generadoras (G1 y G2), con transformadores elevadores (T1 y T2) de 20/500 kV, estando los secundarios conectados en estrella con los neutros puestos a tierra.

El T1 posee una resistencia de puesta a tierra de Rn1 = 0,15 Ω y el T2 de Rn2 = 0,3 Ω.

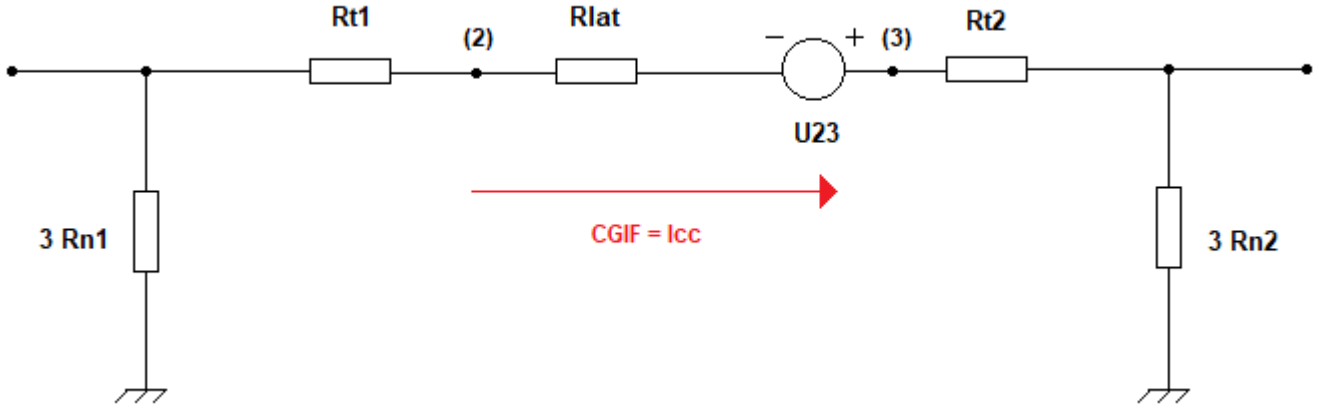
Además, la resistencia del bobinado del secundario del T1 posee un valor de Rt1 = 0,25 Ω y el T2 de Rt2 = 0,3 Ω.

La LAT de 500 kV, posee una resistencia por fase de Rlat = 3,4 Ω, con una longitud efectiva en toda su trayectoria de 150 km.

Se asume que el Eg es de magnitud uniforme y con dirección paralela, en todo momento, a la LAT, en el tramo de 150 km. Su valor es de 1,7 V/km.

Por lo tanto, el circuito equivalente por fase, será:

Figura N° 4



U23 = 150 km x 1,7 V/km → U23 = 255 V.

Req = 3 Rn1 + 3 Rn2 + Rt1 + Rt2 + Rlat → Req = 5,3 Ω

Icc = U23/Req = 255 V / 5,3 Ω → Icc = 48,1 A.

Entonces, la CGI por fase (CGIF) será de 48,1 A y la CGI tendrá un valor de 144,3 A.

El potencial en continua en la barra (2) tendrá un valor de:

V2 = - (3 Rn1 + Rt1) x Icc → V2 = - 33,67 V.

Y el potencial en continua en la barra (3) será:

V3 = (3 Rn2 + Rt2) x Icc → V3 = 57,72 V.

Destacamos que los conexionados en triángulo de los primarios de los transformadores permiten el bloqueo de las CGI hacia los generadores.

El valor de corriente continua de 48,1 A será clave para determinar el estado de saturación de los transformadores y el análisis de los problemas derivados, según ya hemos comentado en el ítem 1 de la presente parte.

3. Acciones para atenuar los efectos

Se han efectuado muchos estudios sobre los problemas ocasionados por la circulación de la CGI en los SEP, así como establecer acciones adecuadas (técnicas-económicas) para atenuarlos.

De entre todas las alternativas evaluadas, se ha determinado la de fabricar transformadores trifásicos con impedancias de secuencia homopolar de bajo valor.

Lo anterior refiere a transformadores de tres columnas.

Esta alternativa no resulta, en muchos casos, económicamente atractiva, ya que se requiere de un transformador de mayor tamaño, por los espacios de aire requeridos entre el núcleo magnético y la cuba.

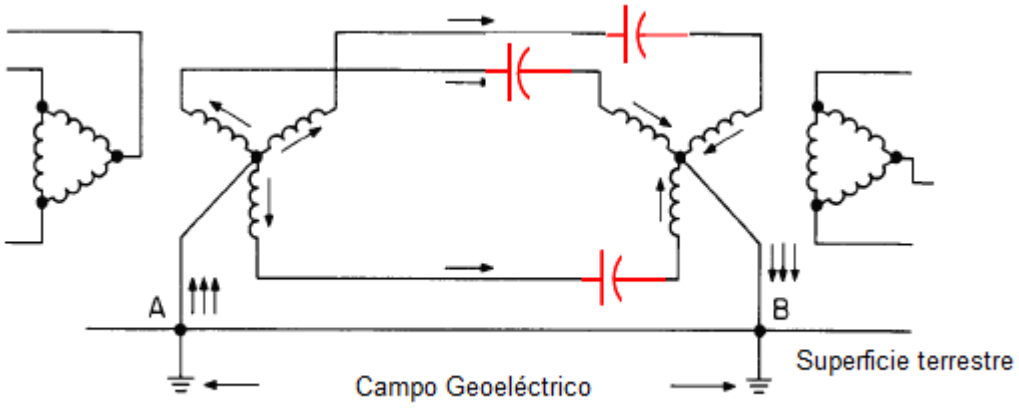
Otra técnica de atenuación es la relacionada con la operación del SEP, de forma tal de analizar cuál es la mejor configuración de la red que permita redistribuir el flujo de potencia, con el objetivo de disminuir los efectos de la CGI, ante una perturbación geomagnética prevista.

Esta técnica requiere disponer de un programa que calcule el flujo óptimo de potencia, incorporando el flujo en continua de la CGI, en todo el SEP considerado, con el fin de cambiar la topología del mismo (salida de servicio de ciertas LAT).

También se han estudiado dispositivos pasivos de bloqueo, los cuales pueden instalarse en distintas ubicaciones de la instalación. Haremos referencia a dos enfoques:

a) Instalar capacitores en serie con la LAT, lo cual requiere uno por cada fase. Los capacitores bloquean completamente la circulación de la corriente en continua (CGI), tanto en la LAT como en los transformadores.

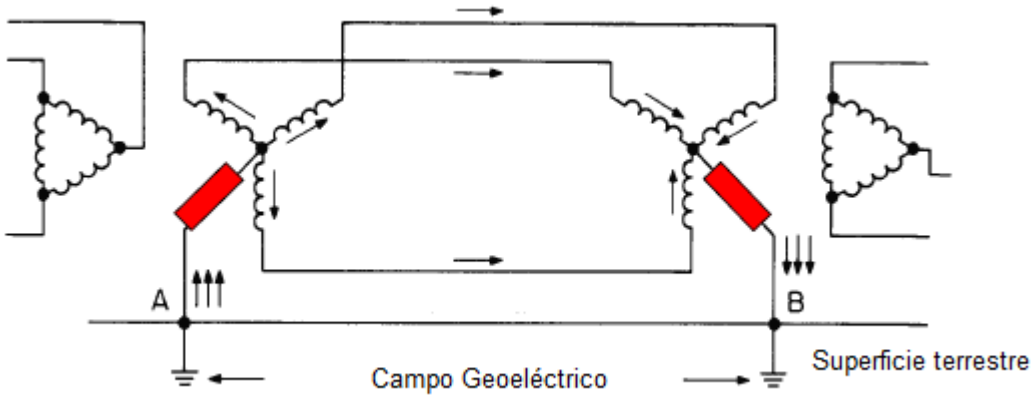
Figura N° 5



El problema que presenta esta solución es que los capacitores deben estar diseñados para soportar tanto la corriente nominal como la tensión nominal de la LAT.
Este hecho hace que sea una solución costosa para LAT de alta tensión (500 kV).
Se puede implementar una variable a esta técnica, con la instalación de solamente un capacitor en la puesta a tierra del neutro de cada transformador.
Si bien se reducen los requerimientos de corriente y tensión, la desventaja se presenta en la multiplicidad de circuitos de cierre a través de la tierra que pueden presentarse en un SEP y por lo tanto de la cantidad de capacitores de bloqueo en los neutros.

b) Instalar resistores en las puestas a tierra de los neutros de los transformadores. El agregado de una resistencia adicional al circuito de circulación de la CGI, provocará la reducción del valor de ésta, pero no su eliminación.

Figura N° 6



4. Conclusiones

A continuación podemos destacar las siguientes conclusiones:

- Las tormentas geomagnéticas son la causa de la generación de corrientes inducidas (CGI), las cuales afectan significativamente la operación de los SEP.
- Los valores de la CGI no solamente dependen de la intensidad asociada a las tormentas geomagnéticas que se desarrollen en ciertas latitudes, sino también de las características, configuración y ubicación geográfica de la red eléctrica.
- La configuración del SEP es muy sensible a las orientaciones del campo geoeléctrico Eg. Dependiendo del tipo de topología del SEP, los efectos sobre éste serán muy significativos o bien pueden ser de incidencia nula.
- Para determinar el valor de la CGI, no solo será fundamental conocer el valor y dirección del campo geoeléctrico en la zona considerada, sino también la topología y configuración de la red, en esa ubicación.
- Se deberá avanzar en el estudio sobre la generación de armónicos por saturación de los transformadores, así como sus efectos sobre los SEP. Ésta representa la fuente más importante de los problemas en las redes eléctricas.
- De la mano de lo anterior, se abren las puertas para integrar la CGI en los cálculos del flujo óptimo de potencia y en el análisis de la Estabilidad Transitoria de los SEP.
- Para determinar la CGI, deberá considerarse el valor de la resistencia de secuencia positiva y no el de secuencia homopolar de la LAT. El valor resistivo de secuencia positiva tendrá que afectarse por un factor que permita obtener el equivalente en corriente continua.
- Debido a que la CGI se inyecta en el SEP a través de los múltiples circuitos de puesta a tierra de los transformadores, el enfoque más adecuado para encarar el bloqueo o atenuación de esta corriente, será la de instalar los dispositivos de protección en las correspondientes puestas a tierra de los neutros.