NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Efectos de las Corrientes Geomagnéticamente Inducidas sobre los transformadores

Parte 1

1. Introducción

En los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) se suceden, a lo largo del tiempo, un conjunto de eventos que resultan nocivos para la operación en sí del sistema y en el daño consecuente sobre los distintos componentes que lo conforman.

De entre todos estos eventos podemos destacar los que se clasifican en la denominación de Alto Impacto de Baja Frecuencia (AIBF o HILF por sus siglas en inglés).

El que nos ocupa en el presente estudio es el evento de baja frecuencia que se deriva de la actividad de las Perturbaciones Geomagnéticas (PGM o GMD por sus siglas en inglés)).

Estas perturbaciones, son las responsables de la generación de corrientes inducidas en las redes eléctricas, las cuales pueden provocar grandes daños en las instalaciones y alteraciones en las condiciones operativas de las mismas.

A estas corrientes se las denomina Corrientes Geomagnéticamente Inducidas (CGI o GIC por sus siglas en inglés).

En tal sentido, haremos una breve descripción del fenómeno físico que provoca las perturbaciones geomagnéticas y las corrientes asociadas, el cual se encuentra directamente relacionado con la actividad solar (tormentas solares).

También procederemos a describir los problemas que se ocasionan en los SEP como consecuencia de la circulación de las CGI en las instalaciones, así como los efectos nocivos sobre los componentes en general y de los transformadores en particular (como veremos, éstos son la fuente principal de los problemas).

Continuaremos el estudio con el planteo de un Modelo Eléctrico que sintetice este fenómeno físico, de forma tal que permita el análisis integral del proceso de Estabilidad Transitoria del SEP.

Finalizaremos este trabajo con una descripción de las acciones a adoptar, para lograr disminuir los efectos de las CGI en las redes eléctricas, en especial en los transformadores y en un conjunto de conclusiones que tratarán de sintetizar todos los temas abordados.

A estos fines, hemos dividido este artículo en dos partes, estructurándose de la siguiente forma:

<u>Parte 1</u>

1. Introducción.
2. Principios y desarrollo de las Perturbaciones Geomagnéticas.
3. Principios y generación de las Corrientes Geomagnéticamente Inducidas.
4. Efectos de las CGI sobre los sistemas eléctricos de potencia.

<u>Parte 2</u>

1. Efectos de las CGI sobre los transformadores.
2. Modelado de la perturbación.
3. Acciones para atenuar los efectos.
4. Conclusiones.

2. Principios y desarrollo de las Perturbaciones Geomagnéticas

Como ya hemos comentado en la Introducción, las PGM se encuentran dentro de la clase de eventos denominados de Alto Impacto de Baja Frecuencia, que se caracterizan por provocar alteraciones y/o daños importantes en las redes eléctricas.

Las PGM tienen su origen en las tormentas solares, las cuales poseen un ciclo de 11 años, directamente relacionadas con la actividad solar.

El proceso físico tiene su base en la generación, debido a la tormenta solar, de una onda de radiación electromagnética y materia que se eyecta del Sol, constituyendo lo que se denomina Eyección de Masa Coronal (EMC o CME por sus siglas en inglés).

Esta onda de radiación es fundamentalmente un plasma (gas ionizado), constituido por protones y electrones, así como pequeñas cantidades de partículas más pesadas (por ej. Helio y Oxígeno).

Este plasma (viento solar), al llegar a la tierra (20 a 40 horas luego de ocurrida una tormenta solar), interactúa con el campo magnético terrestre (cuyo valor es de aproximadamente 60 μT), transfiriendo su energía y provocando perturbaciones sobre éste.

Lo anterior provoca el desarrollo de los procesos Magnetosférico e Ionosférico, causa de la generación de corrientes circulantes en la magnetósfera e ionósfera de la Tierra.

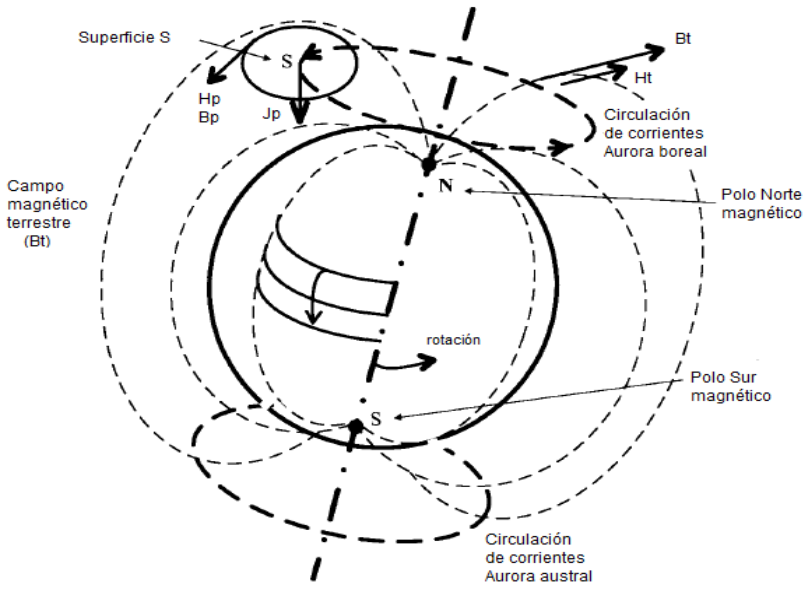
Estas corrientes se manifiestan a través de lazos cerrados sobre los polos magnéticos de la Tierra, a una altitud de aproximadamente 100 km y son las causantes de las variaciones en el valor del campo magnético terrestre (± 500 nT), constituyendo lo que se denomina Tormenta Geomagnética.

En el hemisferio norte el efecto que provoca la circulación de estas corrientes se denomina Aurora Boreal y en el hemisferio sur, Aurora Austral.

Lo importante a tener en cuenta es que, la circulación de estas corrientes, en un lazo alrededor de los polos, genera un campo eléctrico primario, de valor apreciable, el cual es la causa de inducción de un campo eléctrico secundario en la superficie terrestre, denominado Campo Geoeléctrico (Eg).

En la siguiente figura se puede apreciar el fenómeno.

Figura N° 1



En la figura N° 1 se observan los lazos de circulación de las corrientes boreales y australes que, como ya hemos comentado, deben su causa a la interacción del plasma solar con el campo magnético terrestre.

Estas corrientes tienen asociada una densidad de corriente (Jp) de perturbación, la cual genera el campo magnético de perturbación (Bp o intensidad magnética de perturbación Hp), según:

$$\nabla \times \mathrm{Bp} = \mu_0 \mathrm{Jp}$$

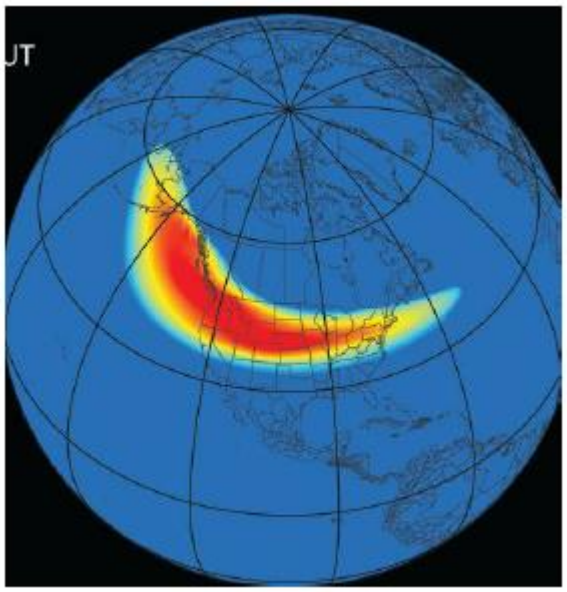
Las perturbaciones son las causantes de las variaciones temporales del campo terrestre (Bt) y la generación consecuente de un campo eléctrico primario, según:

$$\nabla \times \mathrm{E} = -\frac{\partial Bt}{\partial t}$$

Es importante destacar que la PGM se mide en unidad de Campo Magnético (o Inducción Magnética) por unidad de tiempo, siendo la forma [nT/min] la más común.

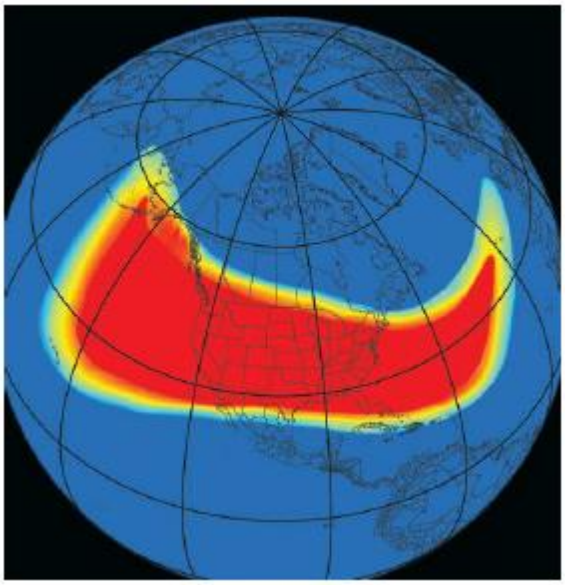
En la figura N° 2 se aprecia la distribución de la PGM en el hemisferio norte, correspondiente a un valor de 500 nT/min. Las zonas en rojo son indicadoras de la mayor actividad de la perturbación, disminuyendo su valor en dirección radial.

Figura N° 2



La figura N° 3 corresponde a una PGM de 5000 nT/min.

Figura N° 3



3. Principios y generación de las Corrientes Geomagnéticamente Inducidas

Como ya hemos visto en el ítem 2, la PGM deriva en la generación de un campo eléctrico primario, el cual a su vez induce un campo secundario, denominado Campo Geoeléctrico (Eg).

Lo anterior tiene su causa en que la Tierra se puede considerar como una esfera cuasi conductora (no homogénea), en donde se genera el Eg, en aquellas zonas expuestas a la variación temporal del campo primario.

Por lo tanto, se obtiene, a partir del Eg, un gradiente de potencial eléctrico inducido en la superficie terrestre (tensión inducida), el cual se denomina Potencial de la Superficie Terrestre (PST o ESP por sus siglas en inglés).

En tal sentido, el PST es una tensión inducida entre dos puntos específicos a y b, dados por la ecuación integral de línea, a lo largo de la trayectoria definida por L:

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

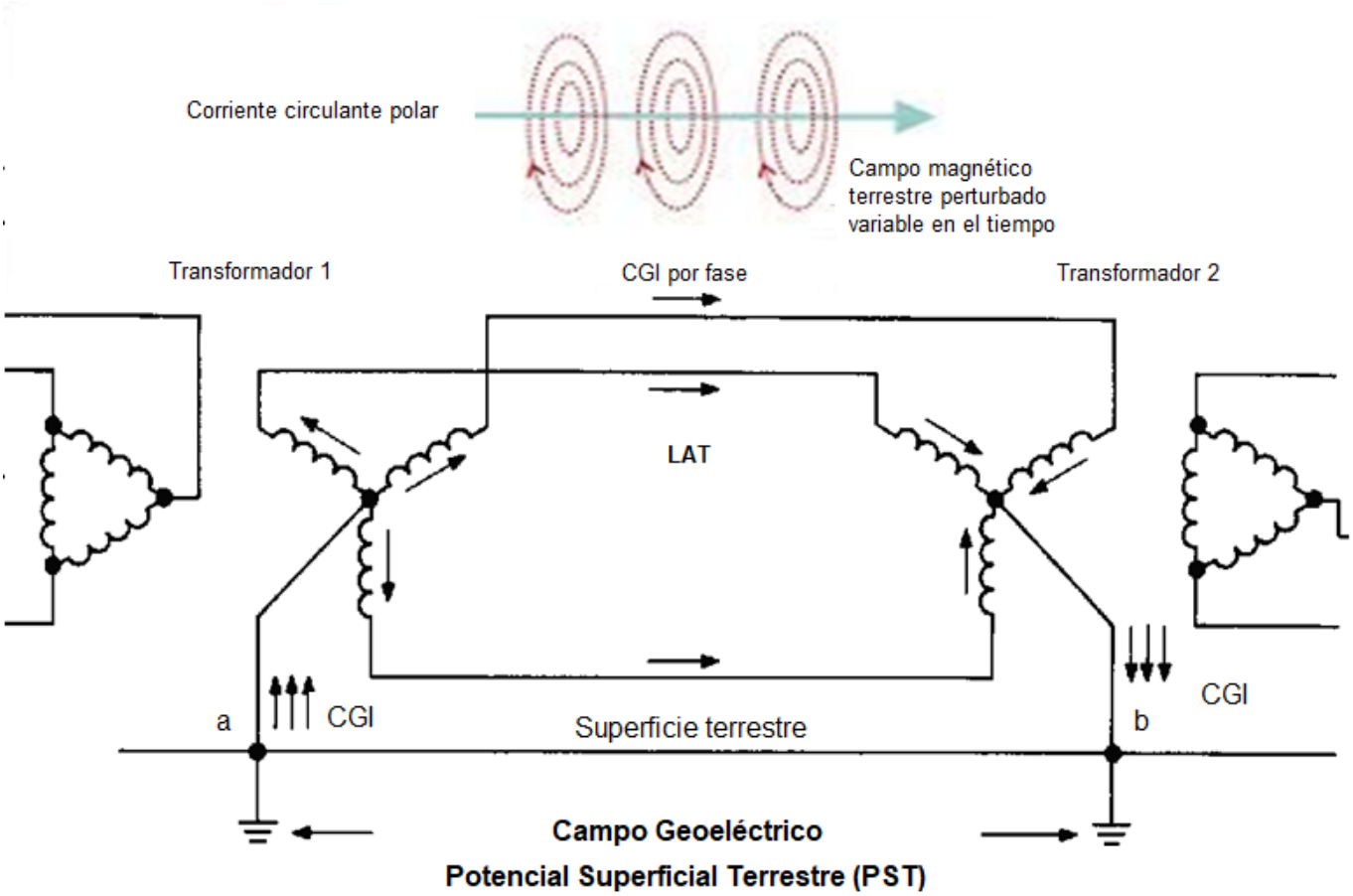
Destacamos que el valor del PST dependerá del camino de integración adoptado, por lo que será una función de L.

Estudios han establecido que el PST puede adquirir valores de entre 1,5 V a 6 V en 1 km de extensión sobre la superficie terrestre.

Estos estudios se basan en evaluar la acción de tormentas geomagnéticas de intensidad, en regiones que presentan alta resistividad eléctrica, como ser zonas montañosas.

El hecho a tener en cuenta es que la existencia del PST es equivalente a tener una fuente de tensión entre extremos de una LAT, ubicada entre dos transformadores con sus bobinados en estrella y el neutro puesto a tierra, según se observa en la siguiente figura.

Figura N° 4



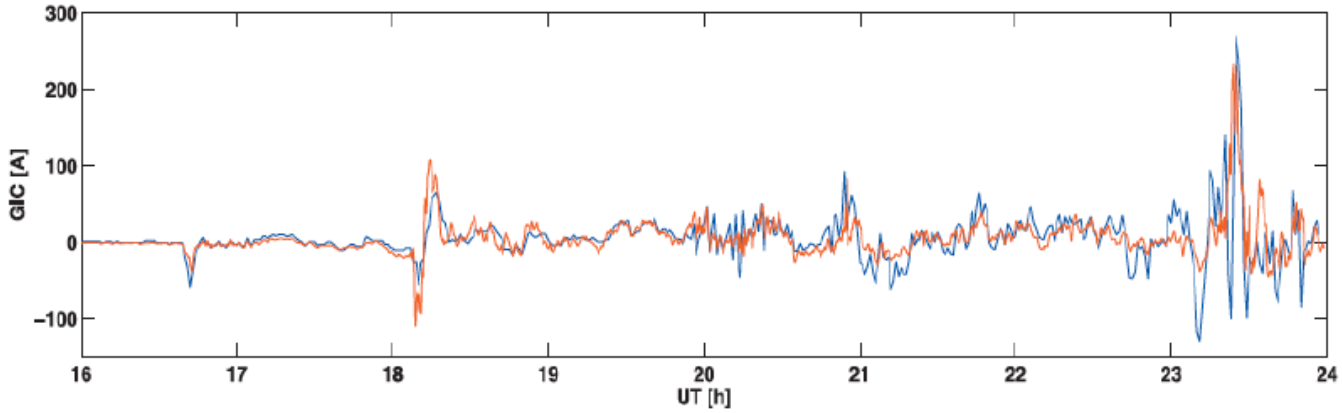
Vemos de la figura que, como consecuencia del PST y el circuito cerrado que se forma entre puntos extremos de la LAT, a través de los bobinados en estrella con neutro a tierra de los transformadores, circulará una corriente CGI.

Destacamos que la corriente circulante por el efecto geomagnético en cada fase de la línea, es la tercera parte de la corriente total (CGI).

De los registros de medición de las CGI en los neutros de los transformadores, se ha derivado que la misma (así como el PST) corresponde a una onda de baja frecuencia, en el orden de los mHz.

A continuación se muestra un registro, a través del tiempo, de esta corriente.

Figura N° 5



Los valores de la CGI pueden ser muy variables, estableciendo un máximo registrado de 300 A (Suecia, año 2000), en el neutro de un transformador de una red de 400 kV.

Como ya comentamos previamente, las CGI poseen frecuencias en el orden de los mHz, por lo que a los fines del modelado y análisis (ver Parte 2), se las puede considerar como de frecuencia casi nula, es decir en continua, en comparación a la frecuencia de red de 50 Hz.

Por tal motivo, a la CGI se la denomina “corriente cuasi directa” y su valor resulta de dividir el PST por las resistencias en continua del circuito de circulación, conformado en la instalación.

Es importante notar que, los valores de magnitud apreciable de las CGI ocurren, estadísticamente, en las situaciones en que se manifiesta el ciclo de 11 años de la actividad solar (tormentas solares). Pero también se han registrado valores significativos, en períodos mínimos de dicha actividad.

Las CGI pueden circular por los siguientes componentes:

- Redes eléctricas y equipos que conforman el SEP (por ej. líneas de transmisión, transformadores, etc.).
- Circuitos de telecomunicaciones.
- Red ferroviaria.
- Oleoductos y Gasoductos.
- Otros componentes conductivos.

4. Efectos de las CGI sobre los Sistemas Eléctricos de Potencia

Se desprende, de lo visto en el ítem 3, que las CGI se incorporan al SEP, a través de los neutros puestos a tierra de los bobinados en estrella de los transformadores (o autotransformadores).

También vimos que la CGI por fase en la LAT, es la tercera parte de la CGI total.

Lo importante a tener en cuenta es que el valor por fase de esta corriente es, por lo general, mucho mayor al correspondiente valor eficaz de la corriente magnetizante del transformador (I_0).

Por lo tanto, considerando que la CGI es una corriente en continua, su combinación con la I_0 lleva a un corrimiento efectivo del flujo magnético en el transformador, con la consecuencia de una saturación de medio ciclo. Este fenómeno lo detallaremos en la Parte 2 del artículo.

Lo que por el momento diremos es que esta saturación de medio ciclo es la causa principal de todos (o casi todos) los problemas que pueden manifestarse en el SEP.

A continuación podemos enumerar los problemas más importantes en los SEP, como consecuencia de la circulación de las CGI y la eventual saturación de los transformadores.

- Efectos nocivos sobre los transformadores (vibración y ruido audible, sobrecalentamiento, etc.).
- Circulación de armónicos de orden par e impar (el transformador es la fuente de armónicos).
- Incremento de la potencia reactiva en el flujo de potencia.
- Variaciones de las tensiones en los nodos de la red.
- Caída significativa de la tensión en la red.
- Mal funcionamiento de las protecciones.
- Desbalance en las redes.

Los efectos sobre los transformadores, así como los problemas asociados a la circulación de armónicos, los describiremos en la Parte 2 del presente estudio.

Ingeniería- NOVA MIRON S.A.