

COMPARACION ENTRE MEDICIONES DE CAMPO Y SIMULACIONES CON UN MODELO DIGITAL, DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNETICOS EN UN HORNO DE ARCO.

Ing. Alfredo RIFALDI
TECHINT S.A. ⁽¹⁾
Argentina

Ing. Raúl BIANCHI LASTRA
IITREE-LAT ⁽²⁾
Argentina

RESUMEN

Se presentan los resultados de la simulación, con el programa para el análisis de transitorios electromagnéticos ATP (Alternative Transient Program), de las sobretensiones producidas durante las maniobras habituales y no habituales del interruptor de SF6, correspondiente al transformador de un horno de afino de 35 MVA.

Las maniobras analizadas son la apertura en vacío y en carga, y el cierre del interruptor, considerándose en tales circunstancias la posibilidad de ocurrencia de múltiples reencendidos de la corriente por el mismo.

Se efectúa además una evaluación del sistema de protección actualmente implementado, compuesto por supresores RC y descargadores de OZn.

PALABRAS CLAVES

Interruptores - SF6 - Hornos - Transitorios

1. INTRODUCCION.

En la planta que SIDERAR S.A.I.C. posee en la localidad de San Nicolás (Argentina), se encuentra en funcionamiento un horno de afino de 33 kV y 35 MVA, el cual es maniobrado con un interruptor de SF6. En bornes del transformador se encuentran instalados los elementos de protección consistentes en un supresor RC y descargadores de Ozn.

Un esquema unifilar simplificado de la instalación se muestra en la Figura 1.

A fin de verificar la efectividad del sistema de protección y de determinar las sollicitaciones existentes durante la operación habitual del horno, se realizan simulaciones de las mismas con un modelo digital de la red.

2. MEDICIONES DE CAMPO.

Previo a la realización de simulaciones digitales, se llevó a cabo una campaña de medición de sobretensiones, provocadas por la maniobra del interruptor (Ref.[1]). En total se registraron mediciones durante 13 maniobras: 5 de apertura en vacío, 5 de apertura en carga y 3 de cierre del interruptor del horno de afino.

Se contaba con dos divisores capacitivos, por lo que sólo se

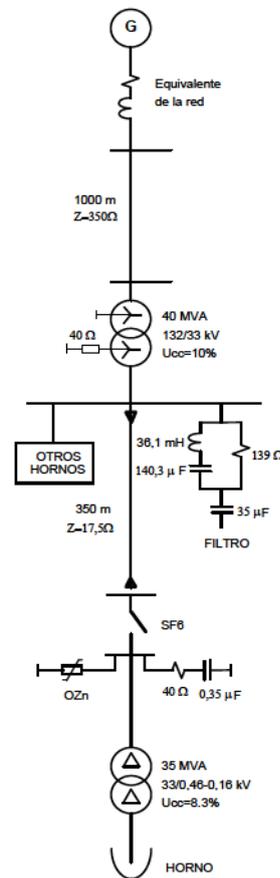


Figura 1: Esquema unifilar de la red.

pudo registrar tensiones en dos puntos de la red simultáneamente. La frecuencia de muestreo utilizada fue de 0,5μs, dado que se pretendía registrar fenómenos de alta frecuencia, debido a posibles reencendidos del arco por el interruptor.

(1) TECHINT S.A. - Carlos María Della Paolera N° 299 - Piso 2. (1104) Buenos Aires. Argentina. T.E. +54-01-318-4125 - Fax: 310-1001. E-mail: "/o=techint /ou=techint /s=tearia"@mhs-techint.attmail.com

(2) Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos - Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 116. (1900) La Plata. Argentina - T.E. +54-21-83-6640/83-7017. Fax: 25-0804. E-mail: iitree@volta.ing.unlp.edu.ar

3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO.

Se construyó un modelo digital del sistema, el cual se utiliza para realizar simulaciones con el programa de cálculo de transitorios electromagnéticos ATP, también conocido como EMTP.

Se utiliza la versión ATP 7 de dicho programa de simulación, con la autorización del Comité Argentino de Usuarios del EMTP y bajo licencia sin cargo que otorga el Grupo de Usuarios Canadiense - Americano del EMTP.

Para la validación del modelo, se simulan con el mismo aquellas maniobras realizadas durante las mediciones de campo, y se comparan los resultados con los registros obtenidos en las mediciones.

Posteriormente se realizan con el modelo simulaciones de maniobras en situaciones que no es posible realizar en la instalación.

3.1 Modelo del interruptor.

El modelo del interruptor debe ser capaz de simular los múltiples reencendidos del arco en el mismo. Debe tener en cuenta, por lo tanto, las siguientes cualidades:

- La característica de recuperación de la rigidez dieléctrica entre contactos cuando abre.
- La habilidad del interruptor de cortar corriente antes de su paso natural por cero ("Chopping Current").
- La pendiente máxima de la corriente, en su paso por cero, que el interruptor es capaz de cortar.

En base a esto, se utiliza para este estudio un modelo de interruptor, desarrollado en MODELS, que permite la simulación de múltiples reencendidos, mediante la siguiente lógica:

- Luego de la separación mecánica de los contactos del interruptor, se considera que la rigidez dieléctrica entre los mismos crece linealmente, con una pendiente determinada. Esta recta define la tensión transitoria de restablecimiento soportada por el interruptor en cada instante posterior a la interrupción de la corriente.
- Se compara en cada instante la tensión entre contactos del interruptor con la tensión soportada por el mismo (definida por la recta antes mencionada) y en caso de ser superada se produce el cierre del interruptor, es decir, el reencendido del arco.
- Si se produce el reencendido, se deben dar dos condiciones para que se puede interrumpir nuevamente la corriente: a) que la pendiente de la corriente en su paso por cero sea inferior a un valor determinado, y b) que su valor instantáneo sea inferior al que el interruptor puede cortar ("Chopping current"). En el caso en que se cumplan ambas condiciones simultáneamente, se producirá la apertura del interruptor.

La lógica precedente se repite para cada paso de tiempo, con lo cual es posible simular el fenómeno de múltiples reencendidos.

3.2 Modelo del transformador del Horno de Afino.

Los parámetros del modelo del transformador fueron obtenidos de los protocolos de ensayo del mismo:

Tensiones	= 33/0,46 kV
Potencia	= 35 MVA
U _{cc}	= 8,3 %
Pérdidas en carga (P _{cc})	= 283 kW
Pérdidas en vacío (P _{fe})	= 40 kW
Corriente en vacío (I ₀)	= 3,4 A
Conexión	= Δ/Δ

Tensiones de ensayo:

a frecuencia industrial	= 52,5 kV
a impulso atmosférico	= 250 kV

Es importante considerar las pérdidas del circuito magnético del transformador. Por esto se incluye en la rama magnetizante del modelo, una resistencia que representa las pérdidas en vacío (P_{fe}) del mismo. Su valor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R_{mag} = \frac{U^2}{P_{fe}} = \frac{(33kV)^2}{40kW} = 27,2 \text{ k}\Omega \quad [1]$$

Este valor de resistencia es válido a frecuencias cercanas a la nominal.

Dado que no se conoce las características del circuito magnético, se considera al mismo como ideal, es decir, sin saturación. La inductancia magnetizante es representada por un par de valores de la característica I_ψ, Ψ dados por:

$$I_{\psi} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_0 = 2,8A \quad [2]$$

$$\psi = \sqrt{2} \frac{V_{LL}}{\omega} = \sqrt{2} \frac{33kV}{314} = 148,6 \text{ Wb} \quad [3]$$

En bornes de transformador se considera una capacidad parásita a tierra de 12 nF. Este valor resulta razonable en base a las mediciones efectuadas sobre el transformador y a la bibliografía consultada (Ref.[2]).

3.3 Modelado de los cables.

La alimentación al horno desde el transformador de entrada, se realiza mediante tres cables subterráneos en paralelo, de formación 3x1x120mm², y de 350m. de longitud. Estos cables se representan como una única línea con parámetros distribuidos, sin acoplamiento entre fases. La capacidad por fase de cada uno de estos cables es de 0,19 μF/km. Considerando una velocidad de propagación de 100000 km/s, resulta una impedancia característica equivalente de los tres cables de 17,5Ω. No se tuvo en cuenta la variación de los parámetros con la frecuencia.

3.4 Modelado de los restantes elementos de la red.

La red de alimentación se la modela con una impedancia equivalente, de manera de obtener una potencia de cortocir-

cuito de 1500 MVA en barras 132 kV. A partir de allí se representa la línea aérea de alimentación a la planta de SIDERAR, de una longitud de 1 km., hasta el transformador de 132/33 kV. En bornes de 33 kV de este transformador también se representan los filtros de armónicas.

4. MANIOBRAS DE APERTURA EN VACÍO.

Esta es la maniobra habitual para la desenergización del horno, consistente en levantar primero los electrodos y luego proceder a la apertura del interruptor. En estas condiciones el interruptor solo abre la corriente de vacío del transformador.

Debido a que la corriente de vacío es muy pequeña, la misma es interrumpida en cualquier punto de la onda de corriente.

4.1 Análisis de las mediciones realizadas.

En total se obtuvieron registros de cinco maniobras de apertura de la corriente de vacío del transformador. Las variables registradas fueron las tensiones del lado barra y transformador en una de las fases.

En la Figura 2 se muestra la forma de onda obtenida en una de las mediciones.

Durante las mediciones de los transitorios en la apertura de la corriente de vacío del transformador no se observaron reencendidos del interruptor, ni sobretensiones de consideración en ningún punto del sistema.

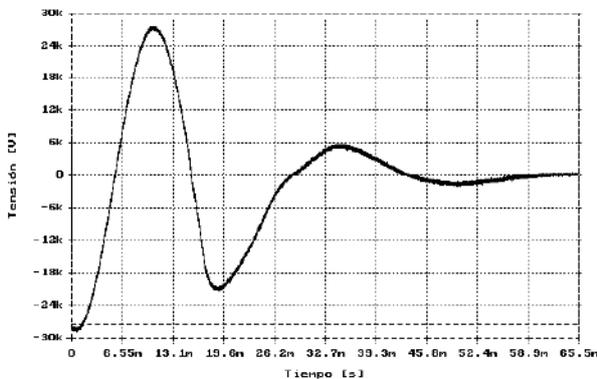


Figura 2. Tensión en bornes del transformador (medida)

4.2 Simulaciones de la apertura de la corriente de vacío.

En este punto se presentan los resultados de la simulación de la apertura en vacío del transformador, con fin de comparar las formas de onda resultantes con las obtenidas durante las mediciones y validar el modelo construido.

La Figura 3 muestra la forma de onda de la tensión a tierra en bornes del transformador, obtenida por simulación. Esta figura debe compararse con la forma de onda registrada en las mediciones y mostrada en la Figura 2.

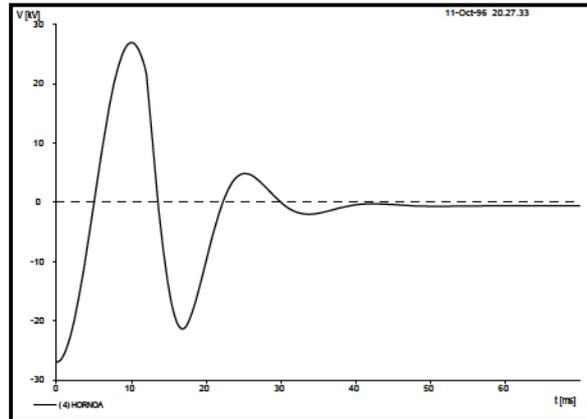


Figura 3. Tensión en bornes del transformador (simulada).

Se observa que en las formas de onda obtenidas por simulación no están presentes las deformaciones producidas por la alinealidad del circuito magnético del transformador, la cual no ha sido considerada en el modelo construido. Sin embargo, dado que resultan mas conservadoras que las reales medidas, se considera validado el modelo para la continuación de las restantes simulaciones.

Dado que esta es la maniobra mas habitual del horno, se analizaron con el modelo otras situaciones, como ser:

- a) Reencendidos del arco
- b) Efectos de la ausencia del supresor RC

En el caso a), se encontró que la tensión transitoria de restablecimiento tiene una pendiente inicial baja en relación con la característica de recuperación dieléctrica considerada para el interruptor, con lo cual es poco probable la ocurrencia de reencendidos. Sin embargo, simulando esta improbable situación con el modelo digital, no se encontraron solicitudes de consideración para la aislación del transformador.

El caso b) se simula para verificar si los descargadores actúan como protección de respaldo de los supresores ante una falla de éstos. Las sobretensiones en este caso son dependiente de las capacidades parásitas del transformador, las cuales no se conocen con precisión. Las simulaciones mostraron que los descargadores solo ejercen una ligera limitación de las sobretensiones.

5. MANIOBRAS DE APERTURA EN CARGA.

La maniobra de apertura de interruptor con los electrodos todavía inmersos en el baño, es decir, con el transformador en carga, no es la habitual pero puede ocurrir en situaciones no deseadas, por actuación errónea de las protecciones durante la energización u operación normal.

La frecuencia de las oscilaciones de la tensión del lado transformador es más alta que en el caso de apertura de la corriente de vacío, por lo que la tensión transitoria de restablecimiento crecerá también más rápidamente en este caso, siendo entonces teóricamente más probable la ocurrencia de reencendidos durante este tipo de maniobra.

5.1 Análisis de las mediciones realizadas.

Durante la campaña de mediciones se obtuvieron en total cinco registros de maniobras de apertura de la corriente en carga del transformador. Las variables registradas fueron las tensiones del lado barra y transformador en una de las fases en dos de las mediciones, y las tensiones a tierra en el transformador en dos fases, en las otras tres mediciones.

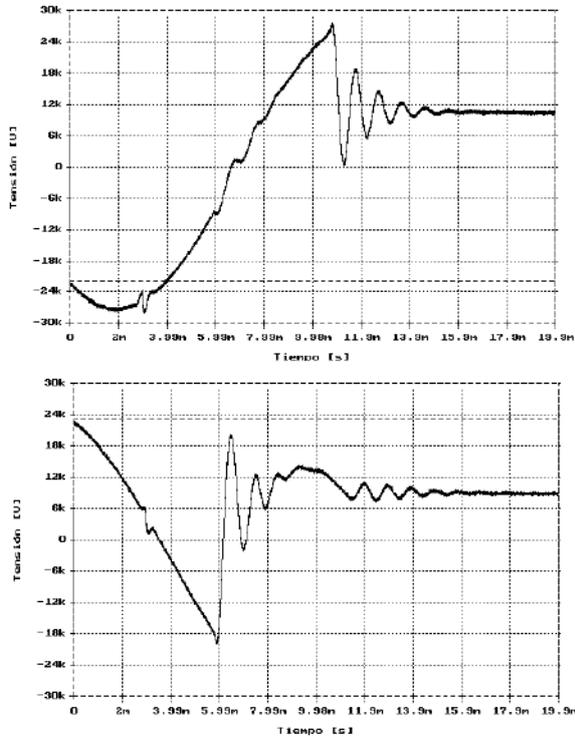


Figura 4 a y b. Apertura de la corriente de carga. Tensión medida a tierra, fases R y S.

En la Figura 4 se muestra la tensión a tierra en dos de las fases del transformador. En $t=3$ ms aproximadamente se observa en las mismas los efectos de un reencendido del arco en el interruptor. Esto se observó en solamente una de las mediciones.

En ninguno de los registros se observan sobretensiones de consideración.

5.2 Simulaciones de la apertura de la corriente de carga.

Se simuló la maniobra con el objetivo de reproducir los registros de la Figura 4. Los resultados se presentan en la Figura 5.

Las formas de onda a) y b) de la Figura 5 deben ser comparadas con las mostradas en a) y b) de la Figura 4. Se observa que los resultados obtenidos con el modelo se ajustan adecuadamente a los obtenidos durante las mediciones. La Figura 5c muestra la forma de onda de la tensión en la tercera fase, la cual no fue registrada en las mediciones.

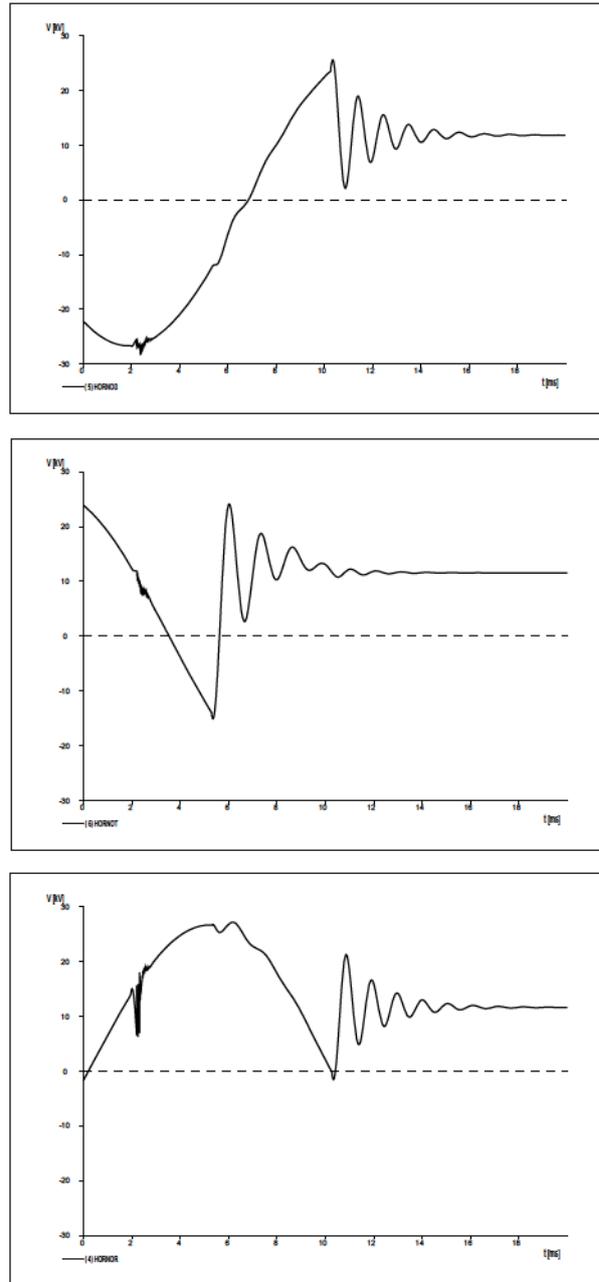


Figura 5 a, b y c. Simulación de una apertura en carga.

Dado que, como se dijo en el punto precedente, en estas condiciones existe una mayor probabilidad de existencia de reencendidos que cuando se abre la corriente de vacío del transformador, se simularon varias maniobras con distintos instantes de ocurrencia de reencendidos.

Los resultados de una de estas simulaciones se muestra en la Figura 6.

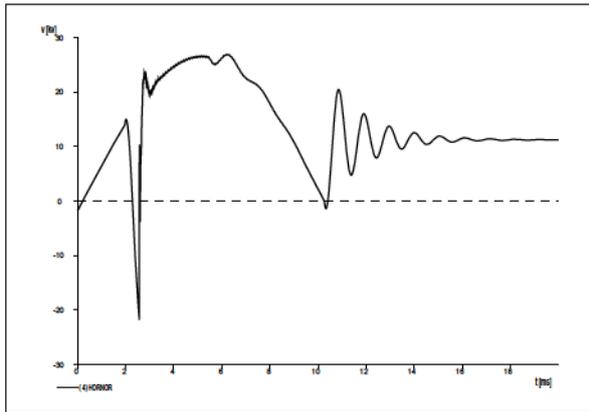


Figura 6. Reencendido en una fase.

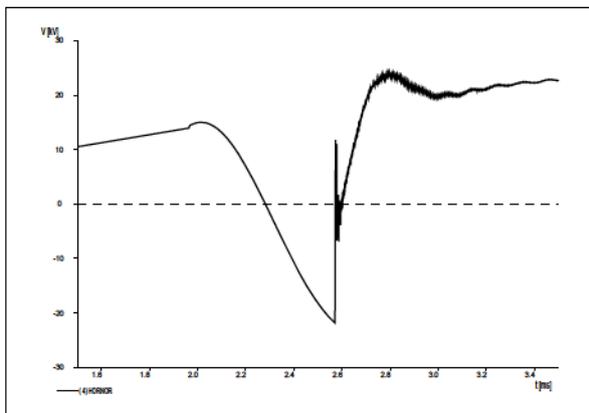


Figura 7. Detalle de la figura precedente

Se desprende que, si bien no se producen sobretensiones de magnitudes apreciables en el sistema, si ocurren variaciones bruscas de la tensión en bornes del transformador, con tiempos de frente muy reducidos, lo cual puede solicitar severamente la aislación entre espiras del mismo. La repetición de este tipo de sollicitación, puede producir el envejecimiento prematuro de dicha aislación.

Por lo tanto debe evitarse, como medida de prevención, la maniobra de apertura de la corriente de carga del transformador, dado que en esta condiciones existen mayores probabilidades de ocurrencia de reencendidos.

6. MANIOBRAS DE CIERRE.

En total se obtuvieron registros de tres maniobras de energización en vacío del transformador. Las variables registradas fueron las tensiones del lado barra y transformador en una de las fases.

Durante la maniobra de cierre, la rigidez entre contacto disminuye a medida que estos se van acercando. La característica de variación de la rigidez dieléctrica entre contactos durante el cierre, no es generalmente igual que durante la apertura.

El arco entre contactos del interruptor se produce un instante antes del contacto metálico entre ellos. Este tiempo se denomina tiempo de prearco y depende exclusivamente de la característica de variación de la rigidez dieléctrica entre

contactos durante el cierre. Algunos interruptores (especialmente los de vacío), pueden cortar repetidas veces esta corriente de prearco, produciendo múltiples reencendidos de la corriente de prearco, pero con la diferencia con respecto al mismo fenómeno durante la apertura, de que cada reencendido ocurre a una tensión inferior, y además produce una sollicitación inferior, al reencendido precedente.

6.1 Análisis de las mediciones realizadas.

En las Figura 9 se muestran las formas de onda de las tensiones fase - tierra registradas durante una de las mediciones de este tipo de maniobra.

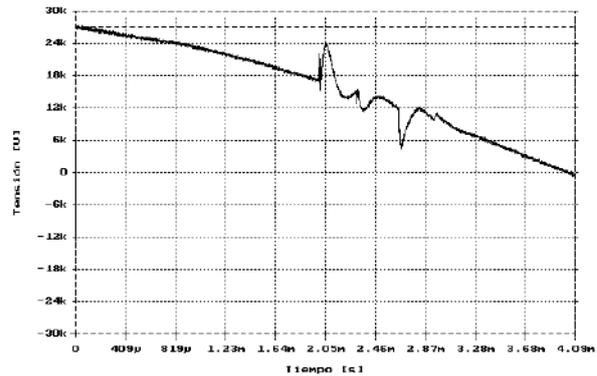


Figura 8. Tensión a tierra del lado fuente de interruptor.

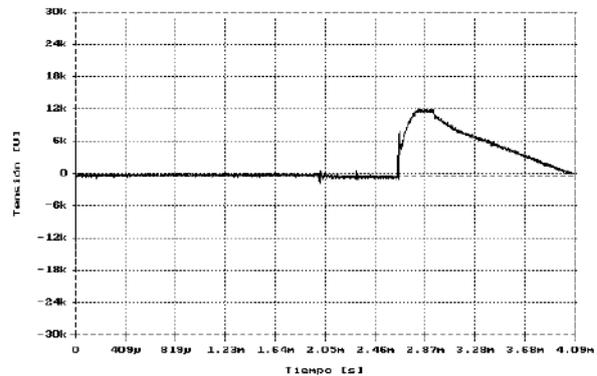


Figura 9. Tensión a tierra del lado transformador.

En la forma de onda de la tensión a tierra del lado fuente del interruptor, se observa las oscilaciones por acoplamiento debido al cierre de las otras dos fases del interruptor. En ninguna de las mediciones se observó sobretensiones de consideración en bornes del transformador.

6.2 Simulaciones del cierre del interruptor.

Las simulaciones del cierre del interruptor se realizan considerando un pendiente de 25 kV/ms para la característica de la rigidez dieléctrica del interruptor durante el cierre.

Los resultados se muestran en las Figuras 10 y 11, las cuales deben ser comparadas con las Figuras 8 y 9.

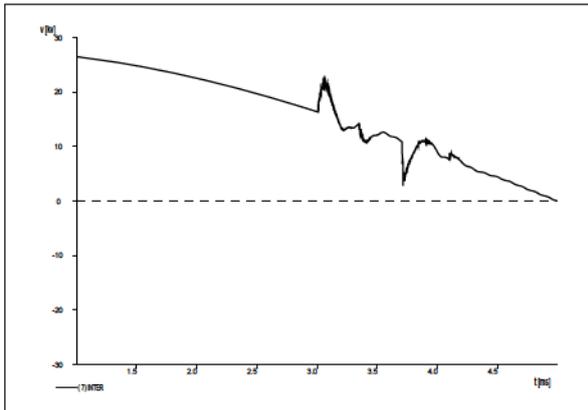


Figura 10. Tensión a tierra del lado fuente de interruptor.

Se realizaron simulaciones del cierre en diversas circunstancias, sin encontrarse solicitaciones de consideración en el transformador.

7. CONCLUSIONES OBTENIDAS DE LAS SIMULACIONES.

7.1 Conclusiones generales.

- Con un modelado relativamente sencillo del interruptor, principalmente en lo referente a la característica de recuperación dieléctrica entre contactos, y utilizando parámetros de protocolo para el modelado del transformador, se logra una representación digital ajustada de la instalación.
- En base a las simulaciones efectuadas con el modelo, se concluye que los supresores RC están correctamente dimensionados y proveen una adecuada protección del transformador.
- Asimismo, los descargadores proveen una protección de respaldo, aunque en principio solo ejercen una ligera limitación de las sobretensiones en el caso de ausencia de los supresores.
- No se observaron durante las mediciones ni en las simulaciones solicitaciones de consideración.

7.2 Maniobra de apertura en vacío

- Los supresores RC proveen una adecuada protección al transformador, siendo prácticamente nula la probabilidad de ocurrencia de reencendidos o de sobretensiones ocasionadas por el corte de corriente del interruptor.
- La ausencia de supresores produce un aumento de las sobretensiones ocasionadas por el corte de corriente, y un aumento en la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de múltiples reencendidos del arco. La presencia de los descargadores podría limitar la amplitud de estas sobretensiones, pero no evitan los reencendidos.

7.3 Maniobra de apertura en carga.

- La maniobra de apertura de la corriente de carga no produce sobretensiones elevadas en el sistema, pero si incrementa notablemente la probabilidad de ocurrencia de reencendidos del interruptor, aún con los supresores RC conectados, por la cual es un tipo de maniobra que debe ser evitada en lo posible.

8. REFERENCIAS

- [1] “Estudio de sobretensiones en la instalación eléctrica del horno de afino de SIDERAR, PARTE I: Mediciones de campo y análisis de perturbaciones.” Informe Técnico IT 543, Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos.
- [2] “Electrical Transients in Power Systems”, Allan Greenwood, Editorial Willey-Interscience/1971.

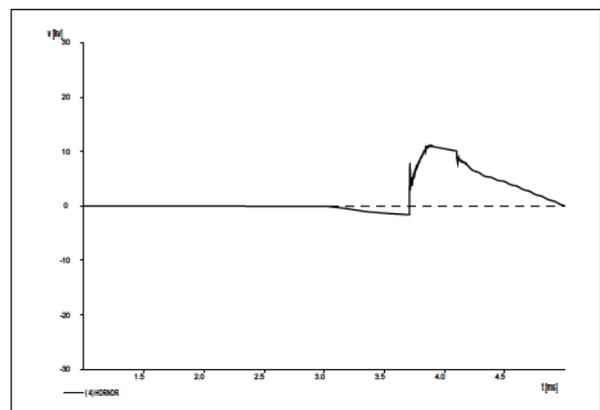


Figura 11. Tensión a tierra del lado transformador.