



EXPERIENCIA DE CAMPO CON EL MONITOREO ONLINE DE BUSHING DC EN EL SISTEMA HVDC DE LA SUBESTACIÓN IBIÚNA

EDILSON G. PERES*
Furnas Centrais Elétricas S.A.
Brazil

MARCOS E. G. ALVES**
Treetech Sistemas Digitais Ltda.
Brazil

* egperes@furnas.com.br ** marcos.alves@treetech.com.br

Resumen: El monitoreo online de la capacitancia y de la tangente delta de bushing AC ha alcanzado buenos resultados en su aplicación en transformadores y reactores de potencia. Mientras tanto, su aplicación directa en bushing condensivos de transformadores convertidores de sistemas HVDC, con la utilización de los mismos recursos de hardware y software, no es posible, teniendo en vista la presencia de componentes armónicos resultantes de la conversión de la corriente continua a corriente alterna, en los bushing de esos equipos. El presente artículo presentará los resultados obtenidos en el desarrollo, la instalación y operación del monitoreo online de bushings condensivos aplicados a los bushing HVDC de los transformadores convertidores de la subestación de Ibiúna.

Palabras clave: transformador convertidor, HVDC, monitoreo online, bushing, capacitancia, tangente delta.

I – INTRODUCCIÓN

La subestación de Ibiúna es el terminal convertidor donde toda la energía producida en 50Hz en la hidroeléctrica de Itaipú, después de ser convertida en corriente continua en la subestación de Foz do Iguaçu y transmitida en $\pm 600\text{kV}_{\text{DC}}$, es convertida a corriente alterna, ahora en 60Hz, 345kV_{AC} , y enviada al sistema interconectado brasileño.

Con una capacidad instalada de 7200MVA, la subestación de Ibiúna posee 24 transformadores convertidores en operación. Esos transformadores son unidades monofásicas de 300MVA, con un devanado primario y dos devanados secundarios. Cada tres unidades monofásicas forman un convertidor, siendo que cada polo es formado por dos convertidores y cada bipolo es formado por dos polos (Figura 1).

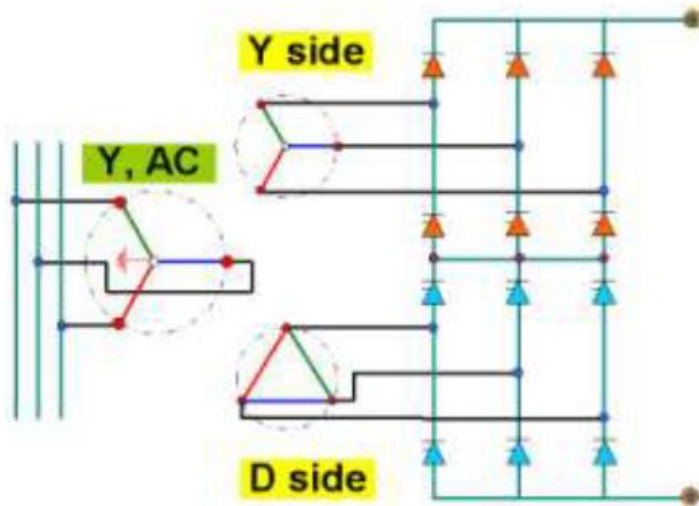


Figura 1 - Esquema trifilar de tres unidades monofásicas formando un convertidor.

Para atender la necesidad del convertidor de 12 pulsos, los devanados X_1 y X_2 , de cada transformador que compone un convertidor, son conectados en estrella y los devanados X_3 y X_4 son conectados en delta (Figura 1). Ya los devanados H_1-H_{01} y H_2-H_{02} son conectados en estrella aterrada. Un esquema de la disposición de los bushings del transformador convertidor es presentado en la Figura 2.

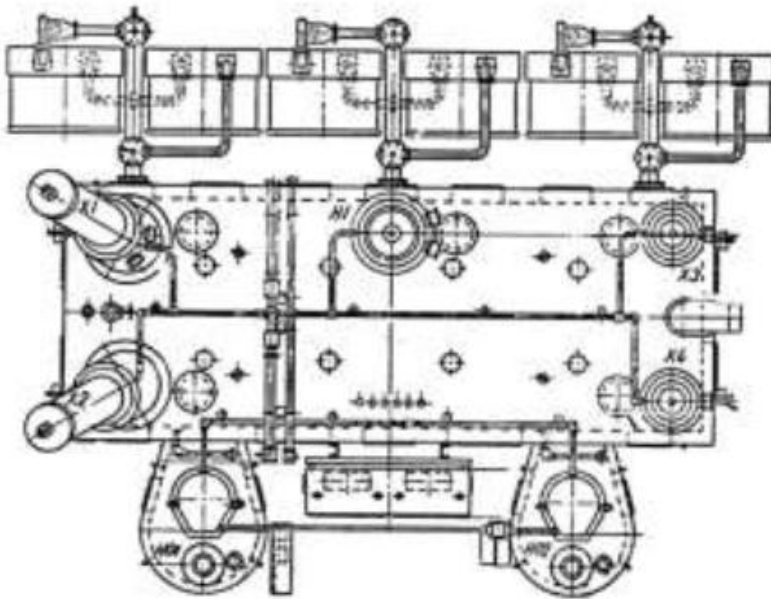


Figura 2 - Disposición de los bushing en el transformador convertidor.

II – MONITOREO ONLINE DE BUSHINGS EN TENSIÓN ALTERNADA

II.1 – FORMA CONSTRUCTIVA DE LOS BUSHINGS CONDENSIVOS

Los bushings del tipo condensivos tienen su parte activa constituida por diversas camadas aislantes cilíndricas concéntricas, intercaladas con camadas conductoras, también

cilíndricas, cuya función es uniformizar al máximo el campo eléctrico. La camada conductora más externa es conectada al empalme del bushing, y éste a tierra. Ya las camadas conductoras intermediarias permanecen aisladas, con potencial fluctuante, con excepción de una de las más externas, que es aterrada a través de una conexión removible próxima a la base del bushing, denominada tap de tensión, tap de test o, simplemente, tap (Figura 3). Para aplicación al tiempo, ese conjunto, denominado cuerpo condensivo, estará contenido en un envoltorio impermeable, que puede ser de porcelana o material polimérico a base de silicona.

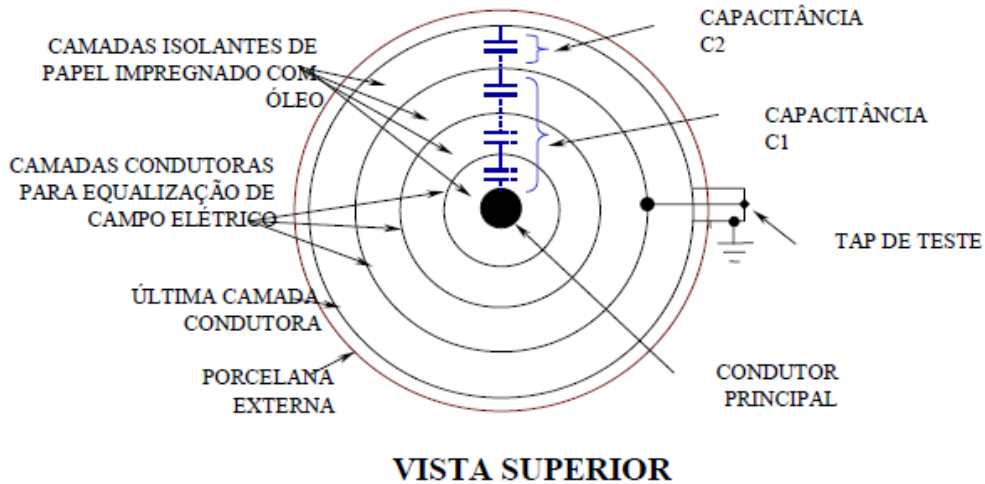
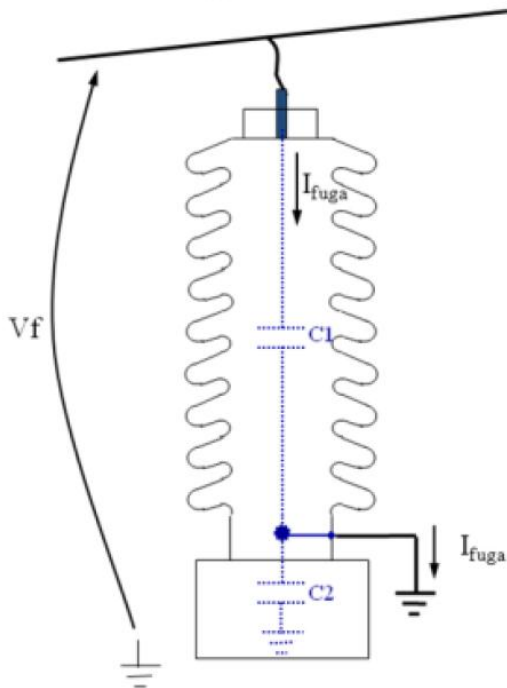


Figura 3 - Forma constructiva de un bushing condensivo.

El conjunto descrito arriba actúa eléctricamente como diversos capacitores conectados en serie, formando un divisor de tensión capacitivo. De esa forma, la diferencia de potencial total del conductor principal en relación con el tierra es dividida entre los diversos capacitores. Un circuito equivalente de un bushing energizado es mostrado en la Figura 4.

Bucha energizada:



Circuito equivalente:

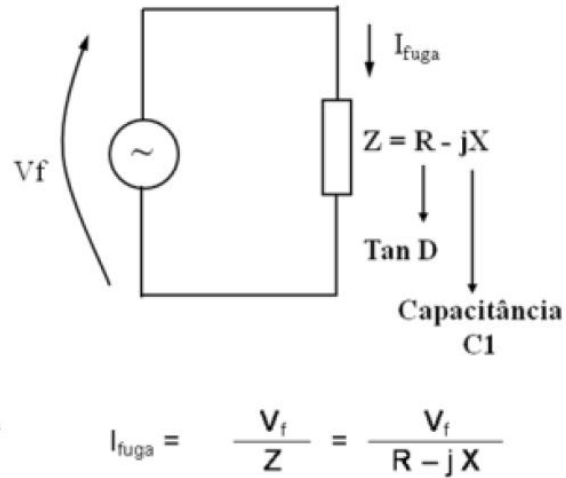


Figura 4 - Circuito equivalente de un bushing energizado.

Quando la tensión fase-tierra senoidal es aplicada al bushing, una corriente, denominada corriente de fuga, pasa a circular a través de su aislamiento debido, principalmente, a su capacitancia y, en mucho menor proporción, debido a sus pérdidas dieléctricas (expresadas por el factor de disipación o tangente delta). La Figura 4 ilustra esa situación. En esa figura podemos observar el equivalente eléctrico obtenido con la construcción mostrada en la Figura 3, ya con el bushing energizado. Ese es el modelo eléctrico equivalente "serie". Un modelo eléctrico "paralelo" podría también ser aplicado, con los mismos resultados. Con el modelo adoptado, tenemos la siguiente corriente de fuga resultante:

$$I_{fuga} = \frac{V_f}{Z} = \frac{V_f}{R - jX}$$

Donde R representa el componente resistivo de la impedancia del aislamiento, que está asociado a la parte resistiva de la corriente de fuga y, consecuentemente, a las pérdidas dieléctricas. Ya el componente X está asociado a la capacitancia del aislamiento.

II. 2 – FILOSOFÍA DE OPERACIÓN DEL MONITOREO ONLINE EN SISTEMAS AC

El objetivo del monitoreo online de bushings condensivos es la detección de alteraciones en el aislamiento del bushing todavía en su fase inicial, indicando el desarrollo de condiciones que podrán llevar a la falla dieléctrica del equipo. Para esto es necesario detectar, con el bushing energizado, cambios en la capacitancia y/o en la tangente delta del aislamiento, o sea, cambios en la impedancia "Z" del aislamiento del bushing.

En cada bushing, la corriente de fuga (I_{fuga}) fluye a través de la capacitancia C_1 a la tierra, pasando por el tap. Se nota que, por el circuito presentado anteriormente, esa corriente es función de la tensión fase-tierra y de la impedancia del aislamiento. De esa forma, cualquier alteración en la impedancia del aislamiento (capacitancia o factor de disipación) se reflejará en una alteración correspondiente en la corriente de fuga que, en teoría, se podría utilizar para la detección de la alteración ocurrida en la impedancia.

Mientras tanto, uno de los obstáculos que se encuentra para la detección conforme descrito arriba es la orden de grandeza de las alteraciones que se desea monitorear. Alteraciones tan pequeñas cuanto un incremento algébrico de 0,3% en el factor de disipación [1] de un bushing pueden representar la diferencia entre un bushing nuevo, en buenas condiciones, y un bushing en el límite de lo aceptable. Queda evidente que una alteración tan pequeña en el factor de disipación provocará una alteración prácticamente insignificante en la corriente de fuga del bushing, tornando inviable su detección por medio del monitoreo apenas de la corriente de fuga de cada bushing.

Una de las técnicas que permite superar la limitación práctica citada es la utilización de la suma vectorial de la corriente de fuga de los tres bushings en un sistema trifásico. En un caso como ese, las tres corrientes de fuga están desfasadas entre sí en aproximadamente 120° eléctricos y, normalmente, tienen la misma orden de magnitud, pues los tres bushings tienen capacitancias, en principio, semejantes, y las tensiones de las tres fases están próximas del equilibrio. Con eso, la suma de las tres corrientes de fuga tiende a un valor menor que cada una de las corrientes de fuga tomadas individualmente, como ilustrado en la Figura 5a para una dada condición inicial de capacitancias y factores de disipación.

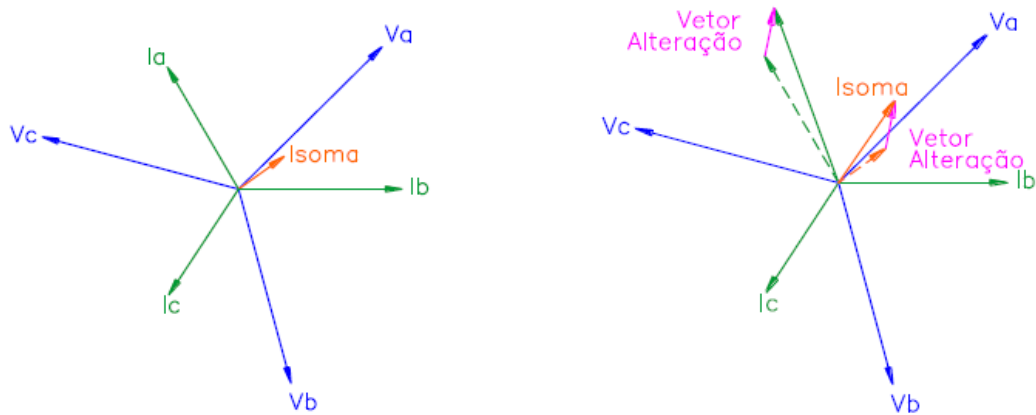


Figura 5 – Corrientes de fuga de tres bushings en un sistema trifásico y su sumatoria: (a) Para una dada condición inicial. (b) Con alteración en la capacitancia y factor de disipación del bushing de la fase A.

Suponiendo ahora que ocurra una alteración en la capacitancia y en el factor de disipación del bushing de la fase A, como mostrado en la figura 5b, el vector alteración (ΔI), que expresa el desplazamiento de la corriente I_a de su valor inicial hasta su valor final, se refleja también en la corriente sumatoria que es alterada, en relación a su valor inicial, segundo el mismo vector alteración (ΔI).

$$\Delta I = I_a(\text{actual}) - I_a(\text{anterior}) = I_{\text{suma}}(\text{actual}) - I_{\text{suma}}(\text{anterior})$$

Ese vector alteración tiene peso prácticamente insignificante cuando comparado a la magnitud de la corriente de fuga de la fase A. Pero lo mismo no ocurre cuando ese vector es comparado a la corriente sumatoria, lo que permite su detección y, por consiguiente, la detección de la alteración ocurrida en la impedancia del bushing en cuestión.

Por lo expuesto arriba, se observan algunas características intrínsecas al método utilizado:

- Es necesaria la determinación de una referencia inicial de corrientes para el sistema, para en seguida compararlas a las nuevas mediciones online, de forma a determinar las alteraciones ocurridas en la capacitancia y en el factor de disipación de los bushings;
- No es efectuada la medición de los valores absolutos de capacitancia y tangente delta de los bushings, pero si la medición de las variaciones ocurridas en esos parámetros. Pero, una vez que sean conocidos los valores iniciales de capacitancia y tangente delta de cada bushing (valores presentes en el momento en que es determinada la referencia inicial de corrientes), la medición de las variaciones ocurridas permite conocer los valores actuales de capacitancia y tangente delta;
- En el caso de bushings nuevos, pueden ser utilizados como valores iniciales de capacitancia y tangente delta de los valores de placa determinados por el fabricante de los bushings. Pero para bushing ya en operación es recomendable que, al instalar el sistema de monitoreo online, sea efectuada la medición de esos parámetros a través de métodos convencionales, con los bushings desenergizados. Con eso se garantiza que están siendo utilizados valores iniciales correctos por el sistema de monitoreo.

III – EL MONITOREO ONLINE DE BUSHINGS APLICADO A LOS BUSHINGS HVDC

El proceso de conversión AC/DC es, inevitablemente, acompañado de los efectos de la generación de armónicos, siendo, los de orden impar generados en el lado AC y los de orden par generados en el lado DC. Como consecuencia, la forma de onda de las corrientes de fuga que aparecen en los bushings X_1 , X_2 , X_3 y X_4 de los transformadores convertidores poseen el aspecto ilustrado por la Figura 6:

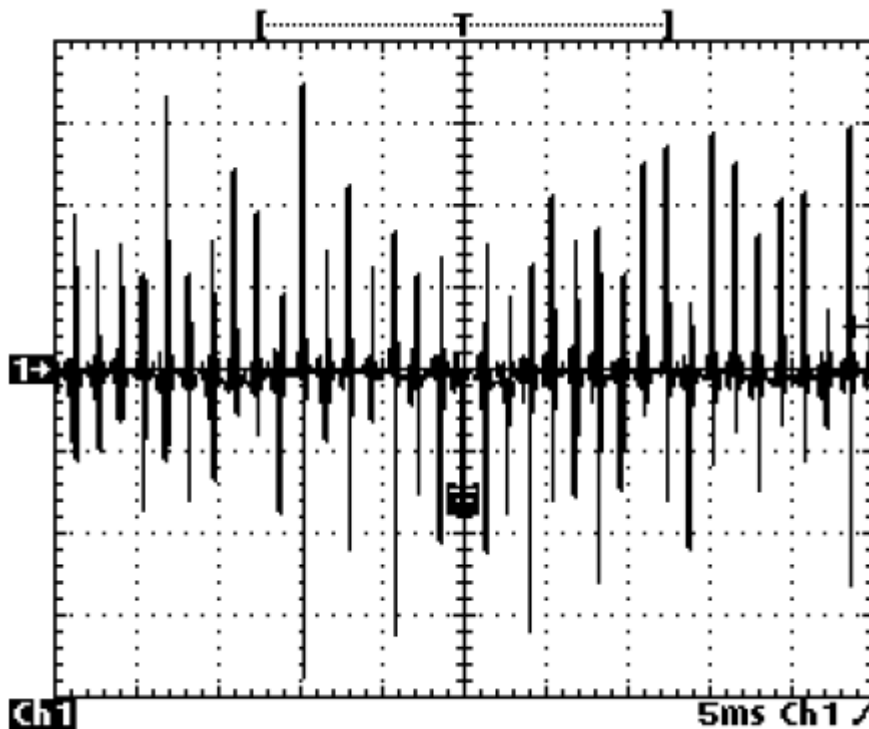


Figura 6 - Forma de onda de las corrientes de fuga en los bushings X_1 , X_2 , X_3 y X_4 .

Tal hecho imposibilita la aplicación directa, en bushings HVDC, del sistema de monitoreo con los mismos recursos de software y hardware utilizados en el monitoreo de bushings AC, descritos en el ítem II.

A título de experiencia, en un primer momento el sistema de monitoreo utilizado para los bushings AC fue aplicado directamente en los bushings HVDC, con el objetivo de observar su comportamiento y obtener datos para basar el desarrollo del sistema específico para HVDC. Como ya era esperado, el sistema de monitoreo de bushings AC no presenta funcionamiento satisfactorio en bushings HVDC.

Como consecuencia, posteriormente fue realizada una alteración en el software de adquisición de datos y en el firmware del sistema de monitoreo, pero se constató la necesidad de alteraciones especiales también en el hardware de los equipos para permitir que hicieran la correcta lectura de la corriente de fuga y los cálculos de capacitancia y tangente delta.

Finalmente, junto con la alteración en el software de adquisición de datos, fue realizada también una alteración en el hardware. Tales alteraciones permitieron que el sistema de monitoreo hiciera, correctamente, la adquisición e interpretación de la señal (corriente de fuga) resultante del tap del bushing.

IV – SEGURIDAD DEL SISTEMA DE MONITOREO ONLINE

Como fue expuesto en el ítem II.2, las corrientes de fuga y la corriente sumatoria son influenciadas no apenas por los cambios en la capacitancia y tangente delta de los bushings, pero también por alteraciones en las tensiones fase-tierra en cada bushing. Esa

influencia es eliminada por medio de tratamientos matemáticos y estadísticos realizados en las mediciones, razón por la cual el proceso de determinación de la referencia inicial de corrientes es efectuado en un período de tiempo ajustable de 1 a 7 días después del inicio de la operación del sistema de monitoreo. Ya el proceso de medición de las alteraciones ocurridas, por las mismas razones, tiene una constante de tiempo de respuesta de la misma magnitud.

La construcción física del bushing da origen a un divisor de tensión capacitivo, como demostrado anteriormente, siendo la porción inferior de ese divisor normalmente cortocircuitada, aterrando el tap del bushing de modo que la tensión de él en relación al tierra es de cero voltio. Para que sea posible la medición de la corriente de fuga del bushing, ese aterramiento pasa a ser efectuado por el circuito de medición de la corriente de fuga. Debido a la baja impedancia de ese circuito, la tensión del tap en relación al tierra permanece próxima de cero. Entretanto, en caso de interrupción accidental del circuito de medición, el divisor de tensión capacitivo generaría una tensión en el tap del bushing que normalmente es superior a la rigidez dieléctrica del tap en relación al tierra, con riesgos de daños al bushing. Para evitar esa ocurrencia, el adaptador de conexión al tap del bushing posee dos dispositivos limitadores de tensiones, conectados en paralelo, en una configuración redundante. Esos dispositivos entran en conducción en caso de apertura del circuito de medición, constituyendo un camino de baja impedancia para la corriente de fuga, de forma que la tensión del tap en relación al tierra permanezca en pocos voltios. Los dispositivos limitadores de tensión no están susceptibles a desgastes de naturaleza eléctrica o mecánica, lo que permite que cada uno de ellos, separadamente, conduzca por tiempo indeterminado, por lo menos, 2,5 veces la máxima corriente de fuga encontrada en los diversos modelos de bushings existentes.

Además, los dispositivos limitadores de tensión actúan como protecciones contra las sobrecorrientes y sobretensiones que se desarrollan en el tap del bushing cuando de la ocurrencia de sobretensiones transitorias en el sistema eléctrico. Eso permite también que todos los ensayos dieléctricos (por ejemplo, tensiones de impulso) sean realizados en los bushings ya con el sistema de monitoreo online conectado y en operación.

V – INSTALACIÓN

El sistema de monitoreo de bushings utilizado tiene concepción modular, siendo constituido de 3 partes básicas:

- Adaptadores para tap – suministran la conexión eléctrica a los taps de los bushings, garantizando también su sellado contra intemperies. Incorporan las protecciones redundantes contra la apertura accidental del circuito de medición, evitando que el tap permanezca en abierto. La Figura 7 ilustra la instalación de los adaptadores de tap en los bushings de los transformadores convertidores.



Figura 7 - Instalación del adaptador de tap.

- Módulos de Medición – reciben las corrientes de fuga de tres bushings de un conjunto trifásico, efectúan las mediciones de esas corrientes y su procesamiento matemático y estadístico, tornando disponibles para el módulo de interfaz los valores actuales de capacitancia y tangente delta a través de un puerto de comunicación serial. La Figura 8 ilustra la instalación de los módulos de medición en el panel de monitoreo de los transformadores.



Figura 8 - Instalación de los módulos de medición.

- Módulo de Interfaz – recibe las informaciones de los módulos de medición y las deja disponible de forma local en su display y remotamente a través de contactos de salida para alarma, salidas analógicas (mA) y puertos de comunicación serial. Opcionalmente, el módulo de interfaz puede ser conectado también a la red intranet de la empresa para acceso remoto a las mediciones. La Figura 9 ilustra la instalación de los módulos de

interfaz en el panel de monitoreo de los transformadores, siendo que un módulo se encarga de los bushings H_1 , X_1 y X_2 y el otro módulo de los bushings X_3 y X_4 .



Figura 9 - Instalación de los módulos de interfaz.

En la subestación de Ibiúna están siendo monitoreados seis bushings GOE 1950, seis bushings GOE 1425 y tres bushings GOE 1175.

Dos módulos de interfaz y cinco módulos de medición fueron utilizados para realizar el monitoreo de los transformadores del convertidor 4, de la SE Ibiúna. Esos módulos fueron instalados en el panel individual del transformador ZM.1.C. Los datos adquiridos por los módulos de medición son enviados a un servidor, donde se encuentra instalado el software de monitoreo, a través de una comunicación sin cable tipo Wi-Fi.

VI - CONCLUSIÓN

Hasta donde sabemos, la aplicación de ese sistema de monitoreo online en bushings HVDC es pionera. Este artículo demostró el principio de funcionamiento que permite el monitoreo online de esos bushings, así como la experiencia de la aplicación de ese sistema a los bushings de los transformadores convertidores de la subestación de Ibiúna. Actualmente el sistema de monitoreo descrito se encuentra en operación, monitoreando de forma bien sucedida los bushings H_1 (345kV AC) y X_1 (+600kV DC) del convertidor 4. Se encuentran en fase de implantación las adecuaciones de hardware, firmware y software específicas para el monitoreo de bushings HVDC, conforme ya descrito, para los bushings X_2 , X_3 y X_4 .

En vista del pionerismo de ese sistema, sabemos que aún pasará por mejoras y que, de seguro, brindará beneficios como:

- Reducción de los riesgos de fallas de los equipos.
- Reducción o eliminación de los ensayos offline realizados en bushings.
- Aumento de la disponibilidad de los transformadores para el sistema eléctrico por la reducción de las paradas para mantenimiento preventivo.
- Reducción de los costos de mantenimiento.

VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Alves, Marcos; Melo, Marcos, "Experiência com Monitoração On-Line de Capacitância e Tangente Delta de Buchas Condensivas", XIX SNPTEE, Outubro/2007.

- (2) The Institute of Electrical and Electronic Engineers, ANSI/IEEE Std C57.19.100-1995, "IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings", Março/1995.
- (3) Alves, Marcos, "Sistema de Monitoração On-Line de Buchas Condensivas", Revista Eletricidade Moderna, Abril/2005.
- (4) Alves, Marcos; Zanetta, Luis, "Monitoração do Envelhecimento Térmico em Buchas Condensivas Isoladas com Papel Impregnado com Óleo", X SEPOPE, Maio/2006.
- (5) Alves, Marcos, "Sistema de Monitoração On-Line de Transformadores de Potência", Revista Eletricidade Moderna, Maio/2004.

VIII - DATOS BIOGRÁFICOS

Edilson Gonzaga Peres – Nascido en Lorena, SP, en 3 de enero de 1974, trabaja con Furnas Centrais Eléctricas desde 2004. Ingeniero de mantenimiento electromecánico de la subestación de Ibiúna, se recibió Ingeniero Eléctrico en 1999 por la Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI).

Marcos E. Guerra Alves – Nascido en Rio de Janeiro, RJ, en 15 de julio de 1975, trabaja con Treetech Sistemas Digitais desde 1992. Especializado en sistemas de control y monitoreo de transformadores de potencia, es gerente del departamento de Pesquisas y Desenvollos. Se recibió Ingeniero Eléctrico en 2001 por la Universidade Sao Judas Tadeu, Sao Paulo y, en 2005, concluyó su Maestría en el área de Energía y Automación de la Universidade de Sao Paulo (USP).