



EXPERIENCIA CON MONITOREO ON-LINE DE CAPACITANCIA Y TANGENTE DELTA DE BUSHINGS CAPACITIVOS

Marcos E. G. Alves*
Treetech Sistemas Digitais
San Pablo – Brasil

Marcos.A.C. Melo
Furnas Centrais Elétricas S.A
Rio de Janeiro-Brasil

RESUMEN

La capacitancia y la tangente delta son reconocidas como algunos de los principales parámetros para diagnóstico de condición del aislamiento de bushings, por ser directamente afectados por el deterioro de la aislación. Este artículo presentará una técnica para monitoreo on-line de la capacitancia y tangente delta de bushings, además de la experiencia con su utilización en campo para monitoreo de bushings de 550kV y 245kV en autotransformadores y reactores de potencia.

Serán descritos los resultados obtenidos durante aproximadamente un año, inclusive con la detección on-line de deterioro de la aislación de un bushing de 550kV, evitando una posible falla con explosión, lo que fue posteriormente comprobado a través de mediciones off-line de capacitancia y tangente delta y por análisis de gas-cromatografía en muestra de aceite del bushing.

Adicionalmente, serán presentadas las cuestiones prácticas relacionadas con la instalación de los sistemas de monitoreo on-line de bushings, tanto en transformadores equipados con Dispositivos de Potencial de Bushing (DPB), donde el tap del bushing ya se encuentra ocupado, como en equipamientos donde fue posible la conexión directa al tap del bushing.

PALABRAS CLAVE

Transformador, Bushing, Monitoreo on-line, Capacitancia, Tangente delta.

1.0 - INTRODUCCIÓN

A pesar de tratarse de un accesorio de los diversos equipamientos citados, y de en general su costo individual ser relativamente pequeño comparado con el costo global del dispositivo, los bushings capacitivos desempeñan una función esencial para la operación de equipamientos de alta tensión, tales como transformadores de potencia y reactores de derivación.

Por otro lado, los bushings están sujetos a esfuerzos dieléctricos considerables, dado que es el primer equipamiento en recibir eventuales sobretensiones derivadas de maniobras, impulsos atmosféricos u otros fenómenos. Una falla en su aislación puede reflejarse en daños no sólo en el bushing, sino también en el equipamiento a que está asociado. En casos extremos, una falla



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

dieléctrica en un bushing puede llevar a la total destrucción del equipamiento de alta tensión, además del riesgo para las personas próximas.

Para evitar ese tipo de ocurrencia, las concesionarias de energía utilizan tradicionalmente programas de mantenimiento preventivo basados en el tiempo, retirando el equipamiento de servicio periódicamente para mediciones off-line de capacitancia y tangente delta de la aislación de los bushings. Tomándose como ejemplo la norma ANSI/IEEE C57.19.100-1995 (1), son indicados intervalos típicos de 3 a 6 años para efectuarse esas mediciones. Sin embargo, esa filosofía de mantenimiento presenta las siguientes desventajas principales:

- La posibilidad de que se desarrollen defectos en el período de tiempo entre dos mediciones, culminando en fallas graves,
- La necesidad de desconexión del equipamiento para realizarse las mediciones, acarreado costos por indisponibilidad y reduciendo la confiabilidad general del sistema eléctrico, y
- La ocupación de los equipos de ingeniería de mantenimiento, generalmente con número reducido de personas, para la realización de las pruebas.

En el caso de Furnas, el intervalo normal previsto en el plan de mantenimiento de la empresa para esas mediciones era de 6 años. Mientras tanto, en el caso de la Usina de Serra da Mesa, sospechas en relación a una determinada familia de bushings, llevaron a la necesidad de reducción del intervalo entre las mediciones off-line para sólo 3 meses en un banco de autotransformadores monofásicos de 133,33MVA 550/245/13,8kV y un banco de reactores monofásicos de 55MVAr 550kV, elevando mucho los costos de mantenimiento y de indisponibilidad del sistema.

La alternativa para superar estas desventajas del mantenimiento basado en el tiempo, es el monitoreo on-line de la capacitancia y de la tangente delta de los bushings, que permite que esas mediciones sean hechas de forma continua y durante la operación normal del equipamiento. De esa manera, en noviembre de 2005 fue instalado el sistema de monitoreo de bushings BM, de la marca Treotech, para monitoreo on-line de la capacitancia y de la tangente delta de esos bushings.

2.0 - MONITOREO ON-LINE DE BUSHINGS

2.1 Forma constructiva de los bushings condensivos

Los bushings del tipo condensivo tienen su cuerpo aislante constituido de diversas capas aislantes cilíndricas concéntricas, intercaladas con capas conductoras también cilíndricas cuya función es uniformizar al máximo el campo eléctrico, como muestra la Figura 1. La capa conductora más externa es conectada al flange del bushing, y este a su vez a tierra. Las capas conductoras intermedias por su parte, permanecen aisladas, con potencial fluctuante, con excepción de una de las más externas, que es conectada a tierra a través de una conexión removible próxima a la base del bushing, denominada tap de tensión o tap de prueba (Figura 1). Para aplicación al tiempo, este conjunto, denominado cuerpo condensivo, estará contenido en un envoltorio impermeable, que puede ser de porcelana, silicona o material polimérico a base de silicona.

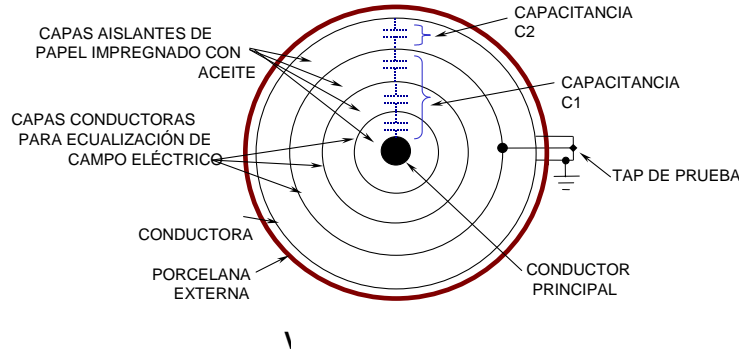


Figura 1 – Forma constructiva de un bushing condensivo

El conjunto descrito arriba actúa eléctricamente como diversos capacitores conectados en serie, formando un divisor de tensión capacitivo. De esta forma, la diferencia de potencial total del conductor principal en relación a tierra es dividida entre los diversos capacitores.

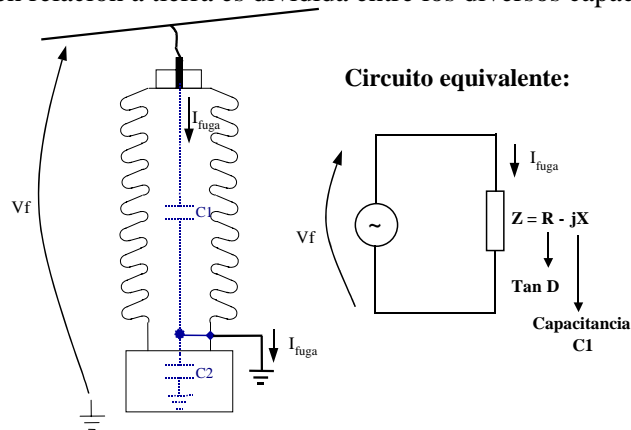


Figura 2 – Circuito equivalente de un bushing condensivo energizado

Cuando la tensión fase-tierra es aplicada al bushing, una corriente, denominada corriente de fuga, circula a través de su aislación, 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 2 ilustra esta situación; en esta figura podemos observar el equivalente eléctrico obtenido de la construcción mostrada en la Figura 1, ya con el bushing energizado. Este 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 de la aislación, que genera la parte resistiva de la corriente de fuga, asociada a las pérdidas dieléctricas, siendo “X” el componente reactivo debido a la capacitancia de la aislación.

2.2 Filosofía de operación del monitoreo on-line

El objetivo del monitoreo on-line de los bushings capacitivos es la detección de alteraciones en la aislación del bushing aún en su fase inicial, indicando el desarrollo de condiciones que podrían llevar a la falla dieléctrica del equipamiento. Para esto es necesario detectar, con el bushing energizado, cambios en la capacitancia y en la tangente delta de la aislación, o sea, cambios en la impedancia “Z” de la aislación del bushing.

En cada uno de los bushings, la corriente de fuga fluye a través de la capacitancia C1 hacia tierra, pasando por el tap de test o de tensión, siendo esta corriente función de la tensión fase-tierra y de la impedancia de la aislación. De esta forma, cualquier alteración en la impedancia de la aislación (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.

Uno de los obstáculos que se encuentra para la detección conforme descrito arriba es el orden de magnitud de las alteraciones que se desea monitorear. Alteraciones tan pequeñas como un incremento algebraico de 0,3% en el factor de disipación de un bushing pueden representar la diferencia entre un bushing nuevo, en buenas condiciones, y un bushing en el límite de lo aceptable. Resulta evidente que un cambio tan pequeño 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 de la corriente de fuga de cada bushing.

Una de las técnicas que permite superar la limitación práctica demostrada es la utilización de la suma vectorial de la corriente de fuga de los tres bushings en un sistema trifásico. En un núcleo como este, las tres corrientes de fuga están desfasadas entre si en aproximadamente 120°, y normalmente poseen el mismo orden de magnitud, ya que los tres bushings tienen capacitancias en principio semejantes y las tensiones de las tres fases están próximas al equilibrio. Con eso, la suma de las tres corrientes de fuga tiende a un valor bastante menor que cada una de las corrientes de fuga tomadas individualmente, como es ilustrado en la Figura 3.(a) para una condición inicial dada de capacitancias y factores de disipación.

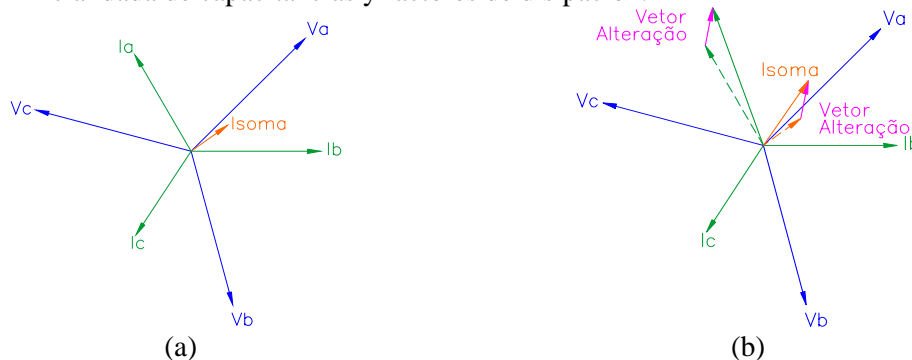


Figura 3 – Corrientes de fuga de tres bushings en un sistema trifásico y su suma; (a) Para una condición inicial dada; (b) con alteración en la capacitancia y factor de disipación del bushing de la fase A.

Suponiendo ahora que ocurra una alteración en la capacitancia y en el factor de disipación del bushing de la fase A, como es mostrado en la Figura 3.(b), el Vector Alteración ΔI , que expresa el desplazamiento de la corriente de su valor inicial hasta su valor final se refleja también en la



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

corriente sumada, que cambia en relación a su valor inicial, según el mismo Vector Alteración ΔI .

$$\Delta I = I_{a \text{ ACTUAL}} - I_{a \text{ ANTERIOR}} = \frac{I_{\text{SUMA ACTUAL}} - I_{\text{SUMA ANTERIOR}}}{\text{ANTERIOR}}$$

Este Vector Alteración es prácticamente insignificante cuando es comparado con la magnitud de la corriente de fuga de la fase A. Sin embargo, lo mismo no ocurre cuando este vector es comparado con la corriente sumada, lo que permite su detección y, por consiguiente, la detección de la alteración ocurrida en la impedancia del bushing en cuestión.

Por lo arriba expuesto, 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 con las nuevas mediciones on-line, de forma de determinar las alteraciones ocurridas en la capacitancia y en el factor de disipación de los bushings;
- No se realiza la medición de los valores absolutos de capacitancia y tangente delta de los bushings, pero sí la medición de las variaciones ocurridas en estos parámetros. No obstante ello, 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 los valores de placa determinados por el fabricante de los bushings. Sin embargo, para bushings ya en operación es recomendable que, en la instalación del sistema de monitoreo on-line, sea efectuada la medición de estos parámetros, a través de métodos convencionales, con los bushings desenergizados. Con ello se garantiza que estén siendo utilizados por el sistema de monitoreo valores iniciales correctos.

2.3 Seguridad del sistema de monitoreo on-line

Como se puede observar, a partir de lo anteriormente expuesto, las corrientes de fuga y la corriente sumada son influenciadas no sólo por los cambios en la capacitancia y tangente delta de los bushings, sino también por alteraciones en las tensiones fase-tierra en cada bushing. Esta 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 operación del sistema de monitoreo. En consecuencia, 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 fue demostrado anteriormente, siendo la porción inferior de este divisor normalmente cortocircuitada conectando a tierra el tap del bushing, de modo que la tensión de este, en relación a tierra es de cero voltios. Para que sea posible la medición de la corriente de fuga del bushing, esta conexión a tierra pasa a ser efectuada por el circuito de medición de la corriente de fuga. Debido a la baja impedancia de este circuito, la tensión del tap en relación a tierra permanece próxima a cero. Sin embargo, en caso de interrupción accidental del circuito de medición, el



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

divisor de tensión capacitivo generaría una tensión en el tap del bushing que normalmente es superior a la rigidez dieléctrica del tap en relación a tierra, con riesgos de daños al bushing.

Para evitar que esto suceda, el adaptador de conexión al tap del bushing está provisto de dos dispositivos limitadores de tensión conectados en paralelo, en una configuración redundante. Estos dispositivos entran en conducción en caso de abertura 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 permanece en pocos voltios. Los dispositivos limitadores de tensión no son susceptibles a desgastes de naturaleza eléctrica o mecánica, lo que permite que cada uno de ellos separadamente conduzca, por tiempo indeterminado, como mínimo 2,5 veces la máxima corriente de fuga encontrada en los diversos modelos de bushing existentes.

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

3.0 - INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO ON-LINE

El sistema de monitoreo de bushings empleado tiene concepción modular, estando constituido por 3 partes básicas:

- Adaptadores para tap – proveen la conexión eléctrica a los taps de los bushings, garantizando también su sellado contra la intemperie. Incorpora las protecciones redundantes contra abertura accidental del circuito de medición, evitando que el tap permanezca abierto;
- Módulos de Medición – reciben las corrientes de fuga de tres bushings de un conjunto trifásico, efectúan las mediciones de estas corrientes y su procesamiento matemático y estadístico, entregando al módulo de interfase los valores actuales de capacitancia y tangente delta, a través de una puerta de comunicación serial;
- Módulo de Interfase – recibe las informaciones de los módulos de medición y las entrega en forma local en su display y remotamente a través de contactos de salida para alarma, salidas analógicas (mA) y puertas de comunicación serial. Opcionalmente, el Módulo de Interfase puede ser conectado también a la red Intranet de la empresa para acceso remoto a las mediciones.

En esta aplicación, la instalación del sistema de monitoreo de bushings incluye los siguientes equipamientos:

- Tres bushings de 550kV y tres de 245kV, todos con taps de tensión conectados a Dispositivos de Potencial de Bushing (DPB), en un banco de autotransformadores monofásicos;
- Tres bushings de 550kV con taps de prueba, sin conexión a DPB's, en un banco de reactores de derivación monofásicos.

En el caso del banco de reactores, que no utilizan DPB's, la conexión a los taps de prueba fue efectuada utilizándose Adaptadores para Tap suministrados por Treotech, como muestra la

Figura 4-(b). Los Adaptadores de los bushings de las tres fases del banco son entonces conectados a las entradas de un Módulo de Medición instalado en el Panel Común del banco de reactores, Figuras 4-(c) y 4-(d).

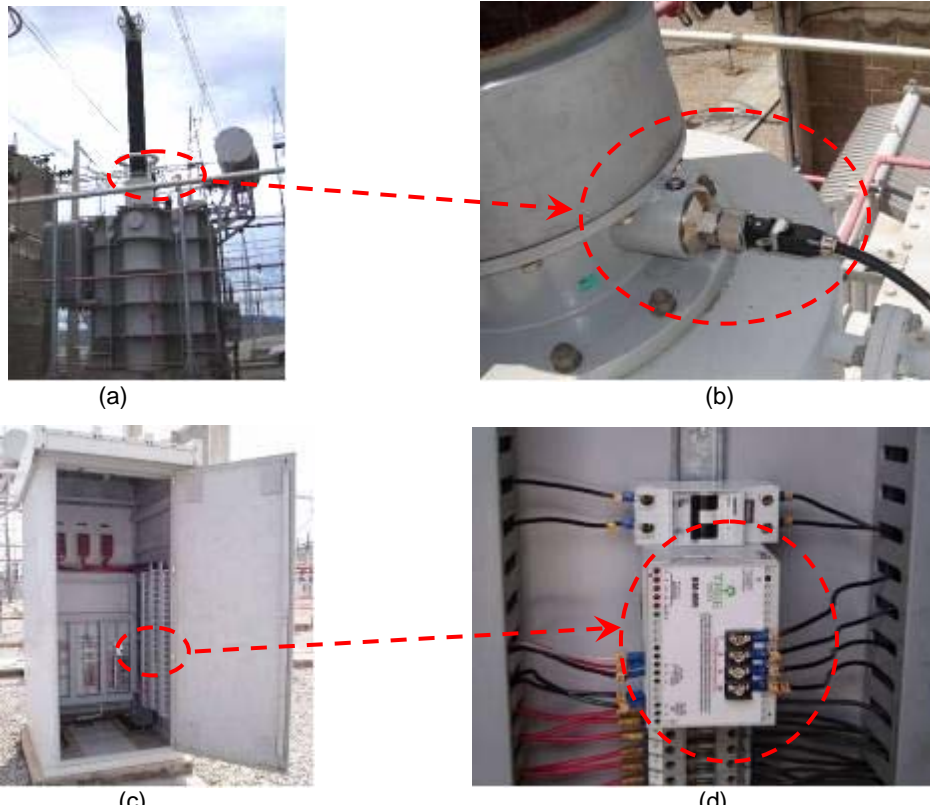


Figura 4 – Monitoreo de los bushings del banco de reactores monofásicos; (a) reactores; (b) Adaptador en el tap de bushing 525kV; (c) Panel Común del banco de reactores; (d) Módulo de Medición para los bushings de los reactores.

Para el banco de autotransformadores no son empleados Adaptadores para Tap, ya que como se observa en la Figura 5-(b), ya existen Dispositivos de Potencial de Bushing conectados a los taps de los bushings. Dado que la tensión de salida de un DPB varía en forma proporcional a las variaciones en la capacitancia $C1$ del bushing a que está conectado, esas tensiones son empleadas como señales de entrada para los Módulos de Medición del sistema de monitoreo, utilizándose para esto capacitores de acoplamiento.

De esta forma, para los bancos de autotransformadores son empleados dos Módulos de Medición: uno que recibe las señales de los DPB's de los bushings de 550kV y otro que recibe las señales de los DPB's de los bushings de 245kV. Ambos Módulos de Medición son instalados en el interior del Panel Común del banco de autotransformadores, como muestran las Figuras 5-(c) y 5-(d).

Un único Módulo de Interfase fue empleado para el banco de autotransformadores y el de reactores, inicialmente instalado en el Panel Común del banco de autotransformadores. Como la interconexión entre los Módulos de Medición y el Módulo de Interfase es efectuada a través de

una red RS485, con cable tipo par-trenzado, posteriormente el Módulo de Interfase fue cambiado a la Sala de Relés de la subestación, situada a cerca de 100 metros de los equipamientos. Ese cambio tuvo por objetivo permitir la interconexión del Módulo de Interfase a la red intranet de Furnas, que ya se encontraba disponible en esta sala, sin la necesidad de llevar la intranet al patio de la subestación, lo que exigiría un link de fibra óptica. A la inversa de ello, la red RS485 que interconecta los módulos del sistema de monitoreo fue llevada a la Sala de Relés a través de un simple cable par-trenzado blindado de bajo costo. Ver Figura 5-(b).

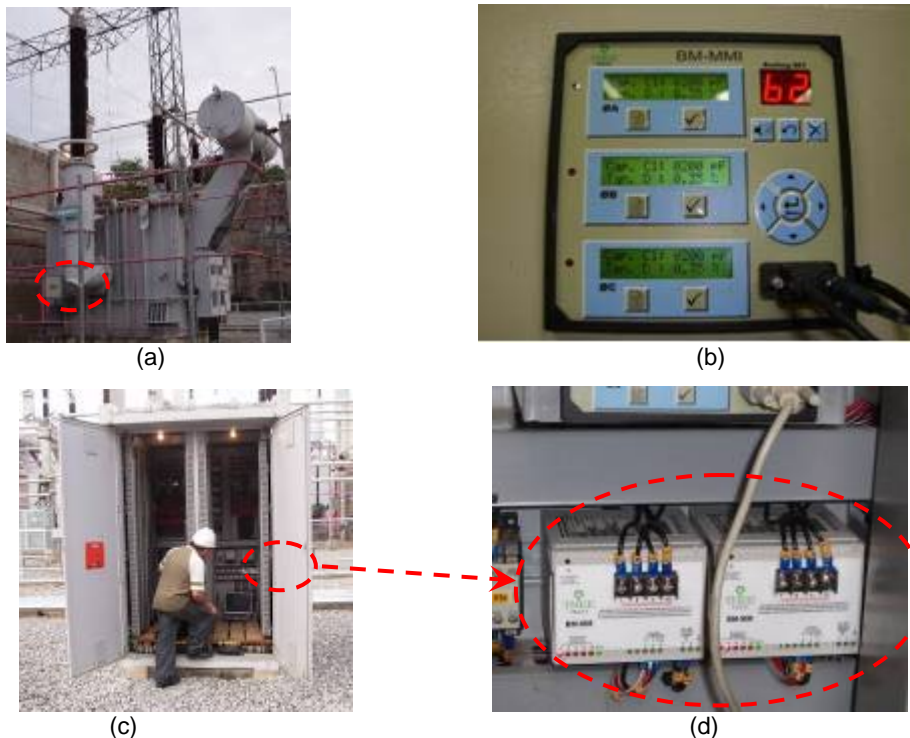


Figura 5 – Monitoreo de los bushings del banco de autotransformadores monofásicos; (a) Autotransformador con DPB; (b) Módulo de Interfase en la Sala de Relés; (c) Panel Común del banco de autotransformadores; (d) Módulos de Medición para los bushings de los autotransformadores.

Con el Módulo de Interfase conectado a la intranet de Furnas, todas las informaciones del sistema de monitoreo de bushings, tales como mediciones actuales y actuación de alarmas, pueden ser accedidas remotamente desde las oficinas de la empresa en la central o fuera de ella.

4.0 - RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Estabilidad de las mediciones

En el caso del banco de reactores, en que existe la conexión directa entre los Adaptadores para Tap y el Módulo de Medición, son monitoreadas tanto la capacitancia como la tangente delta de los bushings de 550kV. En los gráficos de la Figura 6 es mostrado el comportamiento típico de esas variables, donde se observa que el sistema de monitoreo proporcionó mediciones estables,

con variaciones del orden del 0,1% para las capacitancias y 0,1% (en variación absoluta) para las mediciones de tangente delta.

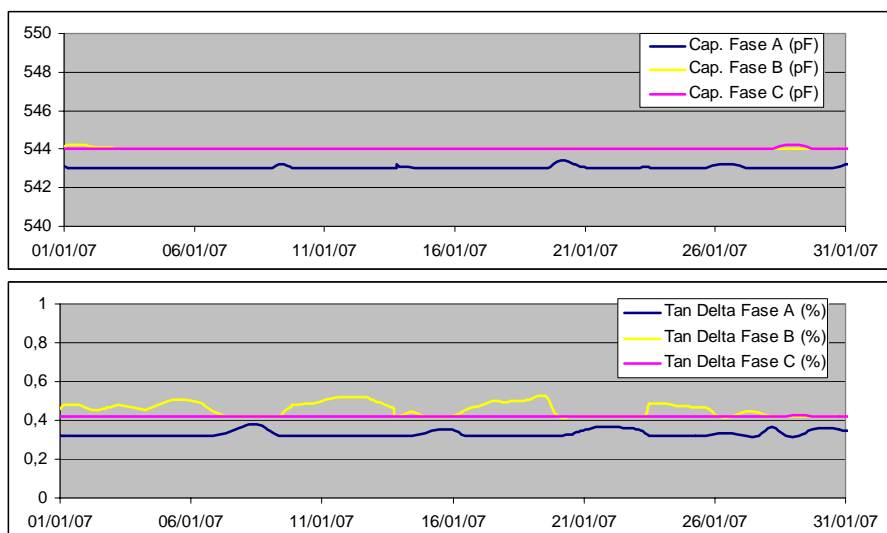


Figura 6 – Comportamiento típico de las mediciones de Capacitancia y Tangente Delta en los bushings de los reactores

Además de mostrar que la aislación de esos bushings no presentó variación en el período, esos resultados, demuestran también la estabilidad de la técnica empleada para el monitoreo on-line, prácticamente inmune a la interferencia de fenómenos normalmente encontrados en los sistemas de potencia, tales como oscilaciones en las tensiones fase-tierra, desequilibrios entre fases y sobretensiones de maniobra.

Para los bushings del banco de autotransformadores, la tensión de salida de los Dispositivos de Potencial de Bushing (DPB) es utilizada como señal de entrada para el sistema de monitoreo. Por lo tanto, eventuales variaciones en esa salida de los DPBs, causadas por cambios de temperaturas, por ejemplo, pueden influir en las mediciones del sistema de monitoreo on-line. Ese hecho es más evidente en las mediciones de tangente delta, debido a la pequeña magnitud de las corrientes de pérdidas dieléctricas de la aislación de los bushings comparadas con las corrientes capacitivas. Las mediciones de capacitancias, por el mismo motivo, son muy poco afectadas por variaciones en los DPBs.

De esa forma, los bushings de 550kV y 245kV del banco de autotransformadores son monitoreados sólo a través de la medición de sus capacitancias, no empleándose la medición de tangente delta. El comportamiento típico de esa medición es mostrado en el gráfico de la Figura 7, donde se verifican oscilaciones inferiores a 0,2% en la medición de capacitancia a pesar de las variaciones causadas por los DPBs.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

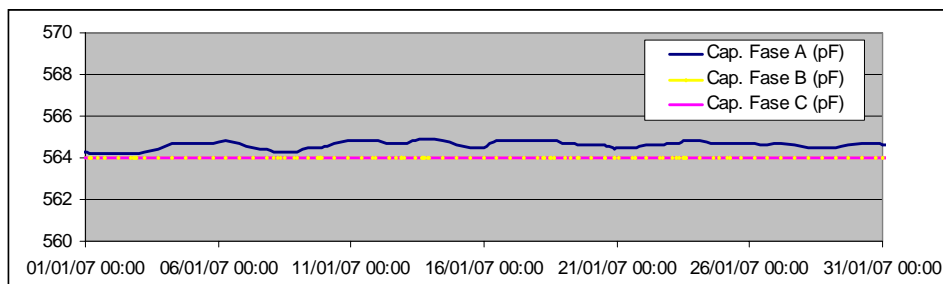


Figura 7 – Comportamiento típico de las mediciones de Capacitancia en los bushings de 550kV de los autotransformadores

4.2 Detección de defecto en un bushing de 550kV

Como fuera mencionado anteriormente, la instalación del monitoreo on-line de bushings fue motivado por las sospechas que existían en relación a una familia de bushings. Esas sospechas fueron confirmadas durante la operación del sistema de monitoreo, que emitió alarma debido a una gran elevación de la capacitancia en el bushing de 550kV del autotransformador de la fase A, de 560pF a 594pF, cerca de 6%, como muestra el gráfico de la Figura 8.

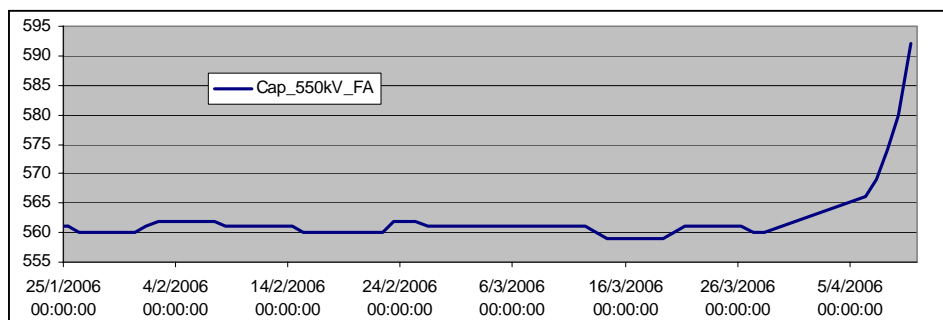


Figura 8 – Aumento de la Capacitancia en el bushing de 550kV del autotransformador de la fase A

Aún más grave, sin embargo, fue la constatación de una elevada tasa de aumento para la capacitancia, lo que llevó a la rápida desconexión del banco. Con el banco de autotransformadores desenergizado fueron realizadas mediciones off-line de capacitancia, además de retirarse muestras de aceite para análisis de gases disueltos en laboratorio. Las muestras fueron enviadas al laboratorio de Furnas y también al del fabricante de los autotransformadores, ambos indicando resultados semejantes, mostrados abajo en la tabla 1. Llamen la atención las elevadas concentraciones de gases combustibles, principalmente el acetileno, con casi 7000ppm, lo que confirma la existencia de un defecto interno en evolución en el bushing.

Tabla 1 – Gases disueltos en el aceite del bushing del autotransformador de la fase A

Gás	H2	O2	N2	CH4	CO	CO2	C2H4	C2H6	C2H2	TGC
Teor (ppm)	7401	2100	47969	5477	2000	10665	4597	1728	6904	28107

A través de las mediciones off-line de capacitancia fue posible confirmar también la alarma emitida por el monitoreo de bushings on-line, indicando la existencia de capas de aislación en



corto-circuito. En esas mediciones fue verificada tangente delta de 0,97% y capacitancia de 853pF, superior a la indicada en las mediciones on-line. Esa diferencia entre las mediciones se explica por el hecho de que la capacitancia se encuentra en un proceso de elevación continua, lo que causa un desfase de tiempo entre la capacitancia real y la indicada por el monitoreo on-line debido al tiempo de respuesta de esta, conforme explicado en el ítem 2.3. En otras palabras, si la capacitancia de los bushings se estabilizara en un determinado valor, la medición del monitoreo on-line alcanzaría este mismo valor después de transcurrido su propio tiempo de respuesta.

5.0 - CONCLUSIÓN

Los bushings de alta tensión capacitivos son un accesorio esencial para la operación de diversos equipamientos de alta tensión, tales como transformadores de potencia y reactores. Este artículo demostró el principio de funcionamiento que permite el monitoreo on-line de este tipo de bushing, así como la experiencia de aplicación de ese sistema a los bushings de autotransformadores monofásicos 550/245kV y de reactores monofásicos de 550kV en Furnas, en la Central de Serra da Mesa.

Durante la operación, las oscilaciones observadas en las mediciones on-line fueron del orden de hasta 0,4% para capacitancia y 0,13% para tangente delta (en valor absoluto, en el banco de reactores, donde esta es medida), permitiendo ajustes bastante sensibles para las alarmas. Ello permitió que fuese detectada con éxito la evolución de defecto en la aislación de un bushing de 550kV en uno de los autotransformadores, permitiendo la retirada de operación de ese equipamiento antes que ocurriese una falla grave, con la probable explosión de ese bushing.

De esa manera, quedó demostrado en la práctica que el monitoreo on-line de bushings puede ser un instrumento adicional y confiable para la prevención de accidentes con ese tipo de equipamiento, no sólo aumentando la confiabilidad y disponibilidad del sistema eléctrico y manteniendo la integridad de los equipamientos, sino también aumentando la seguridad para las personas presentes en las instalaciones.

BIBLIOGRAFÍA

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