NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Nota Técnica: "Ensayos de Mantenimiento en Transformadores de Potencia y Distribución."

Ensayos Dieléctricos en Corriente Alterna – Tangente Delta y Capacidad en Bushings

1. Introducción

En la presente Parte 5, correspondiente a la serie de escritos relacionados con los Ensayos de Mantenimiento de Transformadores de Potencia y Distribución, vamos a describir el ensayo dieléctrico en corriente alterna, aplicado sobre los bushings del transformador.

El objetivo principal del citado ensayo, es el de obtener los parámetros de Tangente Delta y Capacidad del sistema de aislación de los bushings.

Será importante remarcar, en un principio, que este ensayo es de aplicación de rutina en los mantenimientos de los bushings de los transformadores de potencia, no aplicándose a los de distribución, debido a las características constructivas de los mismos.

Como en las partes previas, detallaremos la descripción de este ensayo, atendiendo al formato secuencial predefinido de: fundamentos teóricos, metodología a implementar en el Mantenimiento e interpretación/análisis de los resultados obtenidos.

2. Ensayo de Tangente Delta y Capacidad en Bushings

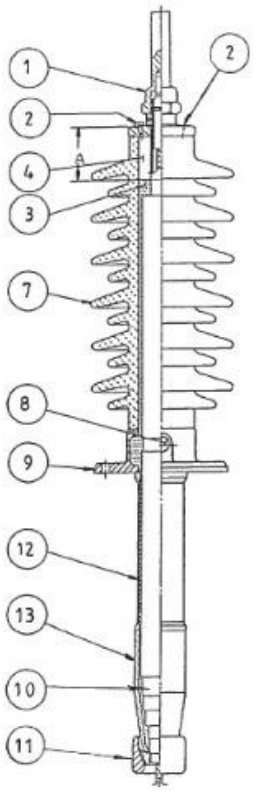
A- Principios Teóricos

- A través de este ensayo dieléctrico en corriente alterna, se trata de obtener el nivel de las pérdidas dieléctricas en el sistema de aislación de los bushings de los transformadores de potencia, así como el estado de la condición estructural del mismo.

- En tal sentido y a los fines de comprender el proceso de implementación de este ensayo, vamos a describir, en primer lugar, los distintos tipos de bushings que podemos encontrar en el campo, relacionados con transformadores con tensión nominal igual o superior a los 132 kV.

Fig. 1. Principio de diseño

1) Terminal externo
2) Orificios de llenado de aceite con tapón hermético
3) Aceite
4) Cámara de expansión
5) Visor de tipo prismático
6) Junta de estanqueidad
7) Aislante de porcelana, lado seco
8) Toma de pruebas
9) Brida de fijación
10) Cuerpo capacitivo
11) Coraza aislada (integrada o independiente)
12) Extensión de la brida
13) Aislante de porcelana, lado húmedo



- Podemos encontrar los siguientes tipos de sistema de aislación en bushings:

a- <u>Papel impregnado en aceite (PIA u OIP)</u>

La estructura principal del bushing se encuentra conformada con papel impregnado en aceite dieléctrico, teniendo además un espacio adjunto de aceite, entre ésta y la envolvente aislante externa.
Representa el sistema de aislación más generalizado entre los bushings pertenecientes a los transformadores de potencia.
Entre algunas ventajas significativas de este sistema, podemos nombrar las siguientes:

- Bajo costo relativo.
- Buen desempeño con una relativa extensa vida útil.
- Desarrollo de bajo nivel de descargas parciales.
- Favorece la implementación de un diagnóstico más preciso del estado del bushing.

Entre las desventajas, podemos citar:

- Muy sensible al ingreso de humedad, ante desgaste o fisuras de las juntas.
- Alto riesgo por evento de explosión y consecuente incendio del transformador.
- Muy sensible a la posición angular, durante el transporte y almacenamiento.

b- Papel impregnado en resina (PIR o RIP)

En este sistema, al papel se encuentra impregnado con resina, en vez de aceite dieléctrico.
El espacio adjunto entre la estructura principal del bushing y la envolvente externa, se encuentra conformado con un líquido aislante (aceite dieléctrico) u otro medio dieléctrico seleccionado a tal fin.
Podemos citar las siguientes ventajas de este sistema:

- Baja sensibilidad al ingreso y contaminación con humedad.
- Desarrollo de bajo nivel de descargas parciales.
- Estructura principal no inflamable.
- Bajo nivel de condicionamiento en la posición angular al transportarlo y almacenarlo.

Con respecto a las desventajas, tendremos:

- Alto costo relativo.
- El líquido aislante adjunto, debe estar protegido de la humedad, durante la fase de almacenamiento del bushing.
- Ídem anterior durante la fase de transporte.

c- Papel ligado con resina (PLR o RBP)

La estructura principal de este sistema se encuentra conformada con papel, recubierto con una fina capa de resina epoxy, junto a una capa de película semiconductora (grafito), de forma tal de uniformar la distribución del campo eléctrico interno.
Este tipo de sistema de aislación no es muy común.
Entre las ventajas, citamos:

- Estructura principal no inflamable.
- Baja capacidad de liberar aceite de la cuba del transformador, ante una falla del bushing.
- Bajo costo relativo.

- Bajo nivel de condicionamiento en la posición angular al transportarlo y almacenarlo

Entre las desventajas, podemos nombrar:

- Alta sensibilidad de la estructura principal para favorecer el ingreso de humedad si no se encuentra correctamente almacenado.
- Alto desarrollo de nivel de descargas parciales.
- El líquido aislante adjunto puede afectarse durante la fase de transporte.

- El sistema de aislación de los bushings con tensiones iguales o superiores a los 132 kV, consta de una estructura compuesta de una serie de capas concéntricas, conformadas con material conductivo. Es decir, se estructura como un sistema de capacidad graduada o en capas.

- El porqué de esta estructura constructiva, encuentra su justificación en la necesidad de lograr una distribución uniforme del campo eléctrico en el interior del bushing.

- En cuanto a las clases de envolventes aislantes de los bushings, podemos destacar:

a- Envolvente de porcelana

La envolvente de material de porcelana es una estructura que le confiere al bushing la necesaria rigidez mecánica y dieléctrica, ambas requeridas para la operación en servicio.
Se caracteriza por tener una vida útil dilatada, así como una buena confiabilidad en el tiempo y bajo las condiciones operativas nominales.
Como aspectos negativos, podemos nombrar el agregado de peso al bushing, así como la fragilidad que presenta ante golpes o acciones de fuerzas (mecánicas y electrodinámicas).

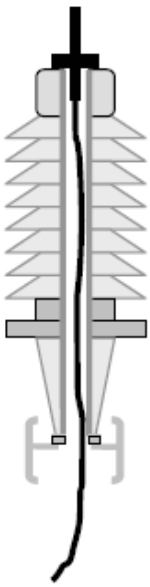
b- Envolvente de material compuesto

Esta envolvente se conforma con un tubo interno de vidrio, rodeado de una cubierta de silicona.
También pueden fabricarse, en su totalidad, en resina epoxy.
En estos casos, el sistema de aislación es de Papel Impregnado en Resina (PIR).
Esta estructura confiere menor peso al bushing, así como una menor capacidad de absorber agua (en especial en ambientes con alta humedad relativa).
Posee una menor confiabilidad, en comparación a la envolvente de porcelana, asignable a un observable deterioro en la superficie del bushing.

- Los tipos de conexionados internos de los bushings dependerán del nivel de corriente nominal que circule por los mismos, así como del sistema de aislación adoptado. Se pueden clasificar en los siguientes:

a- Conductor pasante

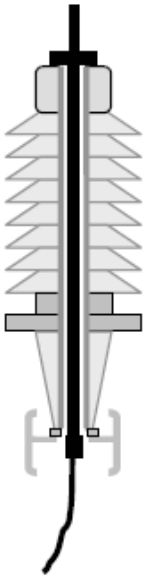
Usado para corrientes nominales ≤ 1200 A.
Como se observa en la figura, consta de un cable que parte del bobinado y se extiende a la largo del orificio central del bushing, hasta conectarse en la parte superior externa del mismo.



b- Conductor sólido

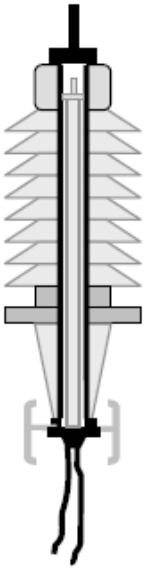
Usado para corrientes nominales ≤ 2000 A.
En este caso, el cable que parte del bobinado, se conecta a un conductor sólido removible, el cual se encuentra instalado en el orificio central del bushing.
El conductor removible, se conecta al terminal superior del bushing.

Este tipo de conexionado se puede observar en la siguiente figura.



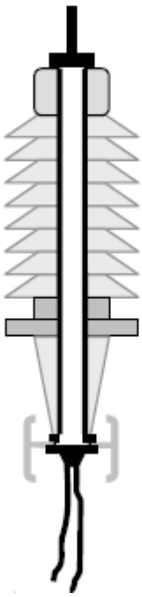
d- Conexionado inferior con varilla

Usado para altas corrientes nominales.
En este caso, la estructura metálica interna del bushing (orificio central), se utiliza como medio conductor de la corriente.
Con el fin de asegurar un contacto eléctrico eficiente, se aloja, en el centro del tubo, una varilla aislante, la cual ejerce presión para lograr tal objetivo.



c- Conexionado inferior sin varilla

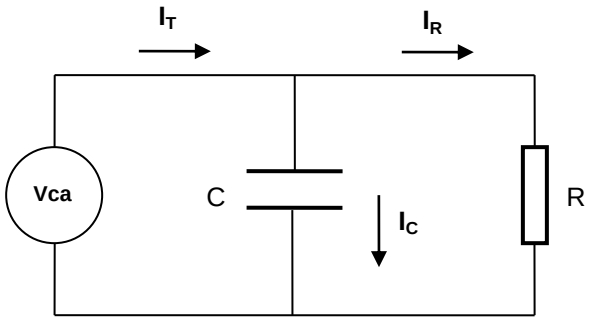
Usado para muy altas corrientes nominales.
En este caso la estructura requiere de un conductor central de sección robusta, el cual se encuentra directamente conectado en la parte inferior del bushing.



- Recordando lo visto en la Parte 4, el parámetro Tangente Delta representa una medida de las pérdidas de potencia que se desarrollan a través del sistema de aislación, debido a la existencia de corrientes de fuga.

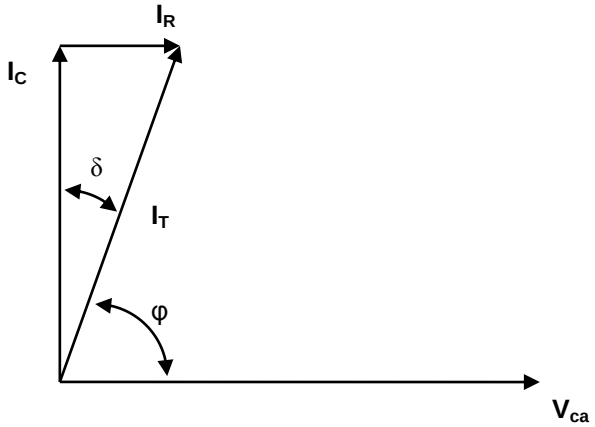
- Además, habíamos planteado un modelo del sistema de aislación, el cual nos permitía incorporar los distintos componentes que presentaba el mismo. Esta representación se basaba en utilizar parámetros concentrados (modelo de Resistencia y Capacidad en paralelo).

- En tal sentido, teníamos:



$V_{ca} = V_{ca} \angle 0^o$

$I_T = I_C + I_R$



- En donde:

  - V_{ca}: tensión en alterna aplicada al terminal del bushing.
  - I_T: corriente total
  - I_C: corriente capacitiva total
  - I_R: corriente resistiva total
  - φ: ángulo de potencia
  - δ: ángulo de pérdidas = 90º - φ

- Como ocurre en el caso de la medición en los bobinados del transformador, el valor de la tangente δ (tg δ), es un indicador de la calidad del sistema de aislación que conforma al bushing (recordemos que las pérdidas dieléctricas, se encuentran correlacionadas con la vida útil del material aislante).

- En tal sentido, se establece que la técnica más adecuada para determinar el estado de la condición de los bushings, es la que refiere a la medición de la tg δ y la capacidad.

B- Metodología

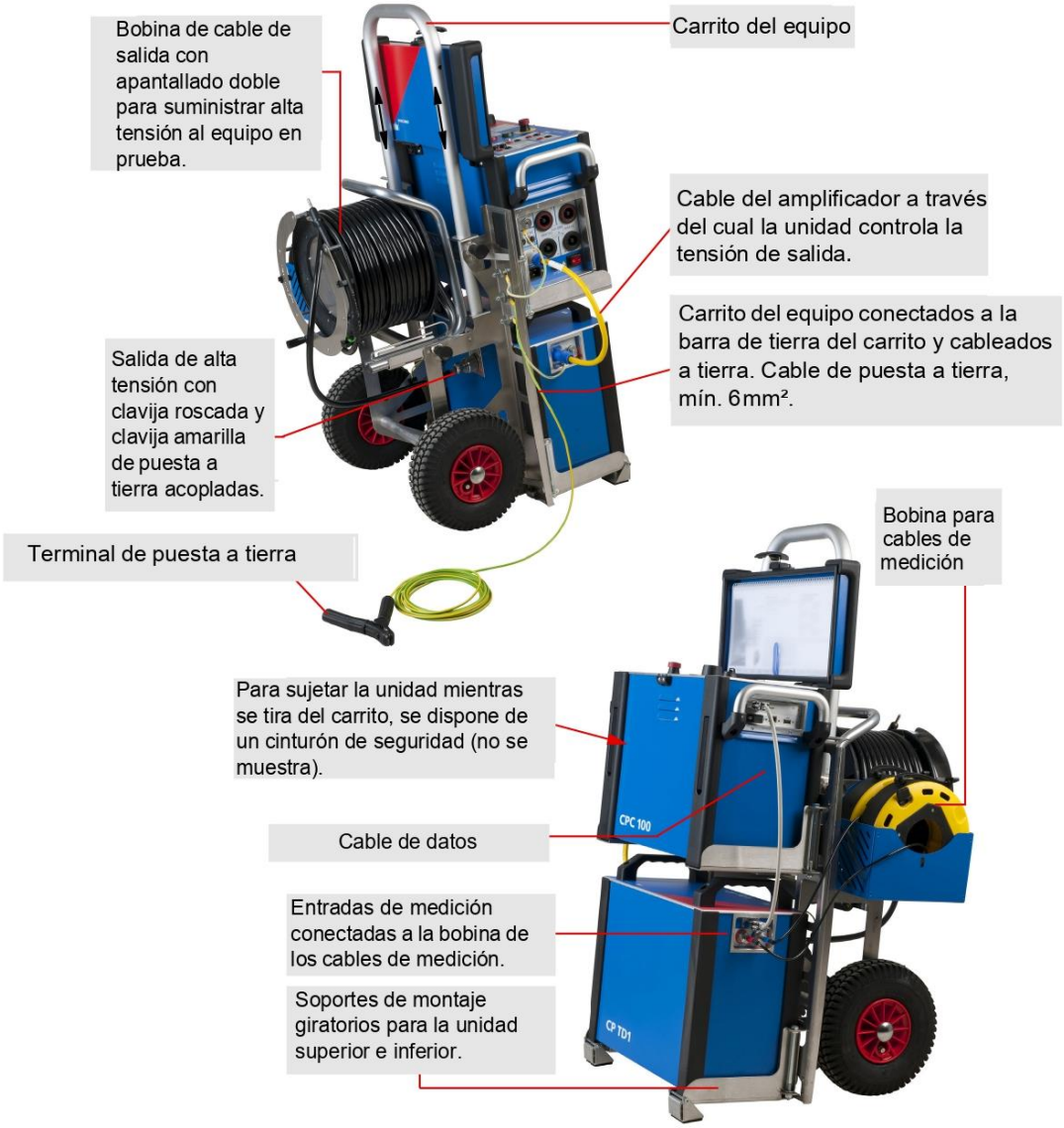
- La norma de referencia a adoptar es la **IEC 60137** “Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V”. Comprende las características y ensayos sobre los bushings utilizados en equipos eléctricos (máquinas, transformadores, interruptores), en instalaciones trifásicas de corriente alterna de tensiones nominales ≥ 1000 V y con frecuencias de 15 Hz a 60 Hz.

- También se adoptan los lineamientos establecidos en la norma **IEEE C57.19.00** “General requirements and test procedure for outdoor power apparatus bushings”.

- El instrumento utilizado es el denominado Puente de Tangente Delta y Capacidad, el cual se observa en la siguiente figura.

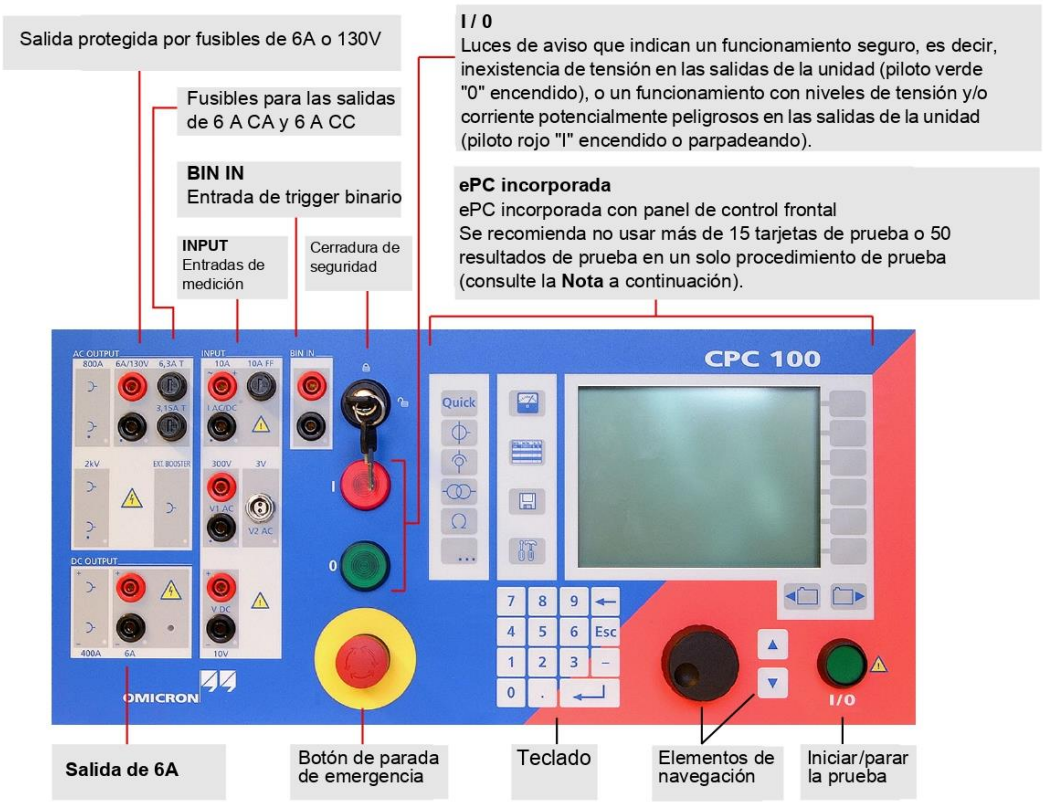
NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Equipo de medición de Tangente Delta y Capacidad.



Componentes funcionales del equipo

Panel frontal



- La tensión de ensayo a aplicar será, por lo general, de 10 kV (bushings ≥ 132 kV). Ver los esquemas de ensayo indicados previamente, para una mayor comprensión del proceso de medición.

C- <u>Interpretación y Análisis</u>

- Los valores medidos de la tg δ y la capacidad de los bushings nos permiten establecer el estado de la condición de los mismos.

- De igual forma que en el caso de la evaluación del estado de los bobinados del transformador, el análisis implementado en este ensayo es del tipo <u>comparativo</u>, por lo que se requiere el seguimiento de los valores de la tg δ y la capacidad a lo largo del tiempo.

- El valor de referencia inicial, adoptado para el seguimiento de ambos parámetros, es el especificado en la placa de características del bushing, o bien el indicado por el fabricante de los mismos.

- Hay que tener muy en cuenta las variaciones en incremento o decremento, con respecto al valor dado por la referencia inicial. Estas variaciones pueden ser un indicador clave de eventuales procesos de contaminación y/o degradación del sistema de aislación de los bushings.

- En relación a lo comentado previamente, se deberán considerar, especialmente, las variaciones en el valor de la capacidad del bushing. Dependiendo del tipo de bushing, se deberá adoptar un límite de referencia para decidir por la existencia o no de problemas en el sistema de aislación (por ejemplo un nivel de referencia de 5 %).

- La temperatura es una magnitud de influencia decisiva en la medición del valor de la tg δ, tal cual vimos en el caso de la medición de la tg δ de los bobinados.

- De igual forma que en el caso de la medición en los bobinados y con el objetivo de comparar los resultados y obtener las tendencias, se deberán corregir los valores de la tg δ a una temperatura de referencia, la cual se adopta en el nivel de **20 °C**.

- Para este caso, la dependencia del valor de la tg δ con la temperatura, estará funcionalmente ligada con el tipo de bushing medido. A continuación se indica una tabla con los factores de corrección, correspondientes a bushings del tipo PIA y PIR. El rango de temperaturas corresponde a 5 °C a 80 °C.

Temperatura (°C)	**Factor de Corrección K PIA**	**Factor de Corrección K PIR**
5	1,20	1,32
10	1,13	1,18
20	1,00	1,00
30	0,90	0,87
40	0,84	0,78
50	0,77	0,73
60	0,74	0,70
70	0,78	0,72
80	0,83	0,75

- En la siguiente tabla se muestran valores de la tg δ, correspondiente a 20 °C y medidos a una frecuencia de 50 Hz, recomendados para distintos tipos de sistemas de aislación de bushings nuevos:

Sistema de aislación	**Papel impregnado en aceite (PIA)**	**Papel impregnado en resina (PIR)**	**Papel ligado en resina (PLR)**
Valores de TD para bushings nuevos a 50 Hz y 20 °C	0,15 % a 0,4 %	0,25 % a 0,45 %	0,45 % a 0,6 %

- Los resultados obtenidos de este ensayo, permiten determinar:
  - Nivel de degradación del sistema de aislación del bushing, en el tiempo.
  - Contaminación acuosa (aislación líquida y sólida).
  - Descargas parciales por deficiente contacto en la toma de medición del bushing.
  - Fallas en el sistema de aislación del bushing.
  - Contaminación en la superficie de la envolvente.
  - Fisuras o ruptura de la envolvente.
  - Ruptura de las capas capacitivas graduadoras del sistema de aislación.

Ingenieria Nova Mirón S.A.
03/01/2022.