NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Ensayos de Mantenimiento en Transformadores de Potencia y Distribución

Parte 4 - Ensayos Dieléctricos en Corriente Alterna

1. Introducción

Habiendo visto en las partes 2 y 3 los fundamentos de los ensayos dieléctricos en corriente continua, en la presente procederemos a describir los correspondientes a los ensayos dieléctricos en corriente alterna, dedicando especial atención al de Tangente Delta y Capacidad.

Debemos tener en cuenta que este ensayo es de aplicación de rutina en los transformadores de potencia, tanto para evaluar el estado de la aislación de los bobinados, así como de la aislación de los bushings.

Sin embargo, es de aplicación especial para el caso de transformadores de distribución, justificándose su implementación cuando se requiera obtener mayor información del estado de la condición de la aislación del sistema papel+aceite.

A continuación se detallarán, siguiendo con el formato ya establecido, los fundamentos teóricos de este ensayo, así como la metodología a implementar en el Mantenimiento y la interpretación/análisis de los resultados obtenidos.

En la presente, nos abocaremos a describir los fundamentos de este ensayo en los bobinados del transformador, evaluando de tal forma el sistema de aislación papel+aceite. En la Parte 5 detallaremos la medición de la tangente delta y capacidad en los bushings.

2. Ensayo de Tangente Delta y Capacidad

A- Principios Teóricos

- El objetivo principal de este ensayo dieléctrico en corriente alterna, es el de determinar las pérdidas dieléctricas en el sistema de aislación que conforman los bobinados del transformador y el aceite, en el cual se encuentran embebidos.

- Podemos decir entonces que, el parámetro Tangente Delta es una medida de las pérdidas de potencia a través del sistema de aislación, como consecuencia de la circulación de corrientes de fuga (sistema equivalente a capacidad + resistencia).

- Para poder comprender el concepto de Tangente Delta (TD) resultará conveniente plantear un modelo del sistema de aislación basado en parámetros concentrados.

- En tal sentido, el modelo planteado, deberá representar todos aquellos procesos físicos que determinan el comportamiento eléctrico macroscópico del sistema de aislación, con el fin de poder interpretar y predecir el estado o condición del mismo.

- Para desarrollar el modelo, se deberá tener en cuenta que al aplicar una tensión de alterna al sistema de aislación, circulará por éste una corriente total, la cual tendrá como componentes cuatro corrientes que representarán los siguientes procesos:

a- Carga de la Capacidad Geométrica

Esta corriente posee una magnitud dada por la relación: $I_0 = C_0$ dV/dt.
En un campo de alterna, I_0 adelantará a V (tensión aplicada) en 90º, por lo que puede modelarse simplemente con una capacidad ideal C_0 (capacidad geométrica del sistema de aislación).

b- Polarización del dieléctrico

El principio básico del modelo físico, para estos procesos, se sustenta en que se pueden representar por resistencias y capacidades en serie.
Estos parámetros concentrados circuitales involucran los procesos físicos de pérdidas, magnitud de la polarización y tiempo de relajación (tiempo que requiere cada una de las clases de polarización para responder al campo eléctrico aplicado; depende de la estructura molecular, estado del material y temperatura).

c- Conducción superficial y volumétrica

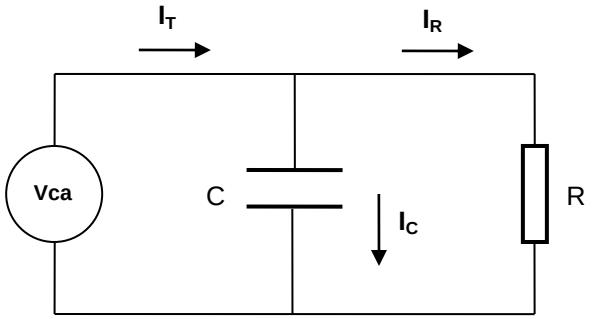
Esta componente debe su existencia al movimiento continuo de portadores de carga a través del sistema de aislación, ya que la resistividad del material es finita.
Su valor dependerá de la temperatura, humedad, contaminación, nivel de la tensión aplicada, calidad y estado de la aislación.
Esta corriente será proporcional a la tensión aplicada y se modela con una resistencia que involucre tanto a los efectos

superficiales como volumétricos del material aislante considerado.

d- Ionización

Comprende al proceso físico de las actividades de descargas parciales (DP), ya sea superficiales o internas, que se desarrollan en la aislación.
Las DP consumen energía, por lo cual provocarán un aumento de las pérdidas dieléctricas.
Es importante resaltar que este proceso se podrá modelar a través de una resistencia concentrada.
Al mismo tiempo, esta actividad provocará un incremento de la capacidad del sistema bobinado-aceite ya que al iniciarse una descarga se producirá un cortocircuito en el espacio gaseoso que la contiene. Este incremento se podrá representar a través de una capacidad concentrada.
Por lo tanto, los efectos combinados de las DP se modelarán con una disposición serie de resistencia y capacidad.

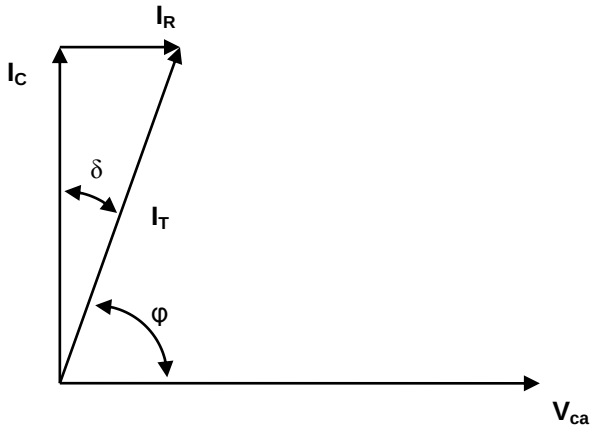
- Todos estos procesos dieléctricos podrán sintetizarse en un circuito equivalente simplificado de parámetros concentrados del sistema de aislación papel-aceite, constituido, según ya hemos comentado, por una resistencia y capacidad en paralelo, según se observa en la siguiente figura:



$\mathbf{V_{ca}} = V_{ca} \angle 0º$

$\mathbf{I_T} = \mathbf{I_C} + \mathbf{I_R}$

- Si representamos el diagrama fasorial tendremos:



- En donde:

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

- Se puede establecer que la medición del ángulo de pérdidas (δ) o de la tangente de este ángulo (tg δ), representa un indicador de la calidad del aislante ya que las pérdidas se encuentran correlacionadas con la vida útil del material.

- Por lo tanto, resultará de importancia práctica obtener la expresión de las **pérdidas dieléctricas**, la cual se encontrará relacionada con la potencia activa disipada en el volumen del material. Podemos expresar:

  - Potencia reactiva del dieléctrico = $Q = V_{ca}^2 / Xc = \omega C V_{ca}^2 = 2 \pi f C V_{ca}^2$

  - Componente capacitiva de la corriente total = $I_C = V_{ca} / Xc = \omega C V_{ca} = 2 \pi f C V_{ca}$

  - Componente resistiva de la corriente total = $I_R = I_C \text{ tg } \delta = 2 \pi f C V_{ca} \text{ tg } \delta$

  - Potencia activa disipada en el material dieléctrico = $\mathbf{P_{ca}} = V_{ca} I_R = \mathbf{2 \pi f V_{ca}^2 C \text{ tg } \delta}$

- Se observa, de la última expresión, que la tensión aplicada por la fuente de ensayo (V_{ca}) y la frecuencia (f) son magnitudes externas al material, mientras que la capacidad (C) y la tangente del ángulo de pérdidas (tg δ) son **parámetros intrínsecos** del mismo.

- Debido a que la capacidad C del sistema de aislación no sufre grandes variaciones, siempre que no se varíe la frecuencia de la fuente y se mantenga constante la temperatura del material, se puede considerar a la tg δ como el parámetro representativo de las pérdidas dieléctricas.

- Además, atendiendo a que el ángulo de pérdidas δ es <u>muy pequeño</u>, será muy común encontrar en protocolos de ensayos que se suele aproximar la tg δ con el sen δ (tg δ ~ sen δ). Pero como sen δ = cos φ → **tg δ ~ cos φ**.

- Lo anterior se especifica como el parámetro <u>Factor de Potencia</u>, en donde, como hemos visto, directamente se mide la magnitud cos φ.

- En algunos textos o documentos se suele denominar a la tg δ como Factor de Pérdidas. Esta denominación no es correcta ya que el <u>Factor de Pérdidas</u> (fpd) de un aislante se define como el producto entre la permitividad dieléctrica relativa y la tg δ → **fpd = ε_r tg δ**. Este factor nos sirve para expresar las pérdidas del dieléctrico por unidad de volumen; tendremos:

  - Potencia activa disipada en el material dieléctrico = $P_{ca} = 2\,\pi\, f\, V_{ca}^2\, C \operatorname{tg}\delta$ [W]

  - Capacidad geométrica del sistema (o en vacío) = $C_0 = \varepsilon_0\, S / d$ [F]

  - Capacidad del sistema = $C = \varepsilon_r\, C_0$ [F]

  - Campo eléctrico en el interior del dieléctrico = $E = V_{ca} / d$ [V / m]

  - Volumen del material dieléctrico = S d [m^3]

  - Pérdidas por unidad de volumen = $p_{ca} = P_{ca} / (S\, d)$ [W / m^3]

  $\therefore\ P_{ca} = 2\,\pi\, f\, V_{ca}^2\, \varepsilon_r\, C_0 \operatorname{tg}\delta = \omega\, V_{ca}^2\, C_0\, \varepsilon_r \operatorname{tg}\delta$ → $\mathbf{P_{ca} = \omega\, V_{ca}^2\, C_0\, fpd}$

  $\therefore\ P_{ca} = \omega\, (E\, d)^2\, (\varepsilon_0\, S / d)\, \varepsilon_r \operatorname{tg}\delta = \omega\, E^2\, \varepsilon_0\, \varepsilon_r \operatorname{tg}\delta\, S\, d$

  $\therefore$ $\mathbf{p_{ca} = \omega\, \varepsilon_0\, E^2\, \varepsilon_r \operatorname{tg}\delta}$ → $\mathbf{p_{ca} = \omega\, \varepsilon_0\, E^2\, fpd}$

- Entonces podemos decir, en base a lo visto, que la **Tangente Delta** es un parámetro del material dieléctrico que representará las pérdidas totales en el volumen del mismo.

- Tener en cuenta: la medición del **ángulo de pérdidas (δ)** o de la **tangente de este ángulo (tg(δ))**, representará un indicador de la calidad del sistema de aislación, ya que las **pérdidas se encontrarán relacionadas con la vida útil del material**.

B- Metodología

- La norma de referencia es la **IEC 60076-3** "Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air".

- También se adoptan los lineamientos establecidos en la norma **IEEE 57.12.90** "Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers".

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

Ilustración 1: Equipo para medición de Tangente Delta y Capacidad.

El equipo de medición puede realizar pruebas eléctricas de transformadores de potencia, transformadores de corriente, transformadores de tensión, máquinas rotatorias, sistemas de puesta a tierra, líneas eléctricas, y cables, e interruptores de potencia.

Datos Técnicos
Hasta 800 A o 2000 V con hasta 5 kVA en un rango de frecuencias de 15-400 Hz o 400 A CC

Una eliminación muy eficaz de las interferencias facilita la medición de señales pequeñas incluso en presencia de un elevado nivel de ruido.

Fácil de transportar - Ideal para pruebas de campo

Plantillas de pruebas, procedimientos de prueba generados automáticamente e informes de pruebas

Hasta 2000 A o 12 kV/15kV con el uso de amplificadores de corriente o tensión

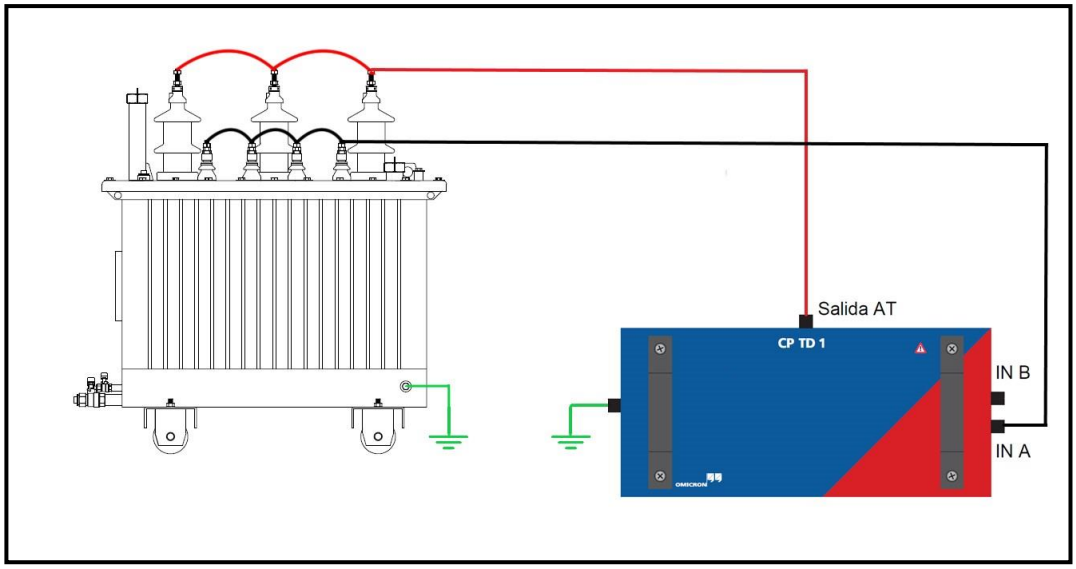


Ilustración 2: Esquema de conexionado de la medición de Tangente Delta y Capacidad para transformadores con dos devanados.

- En cuanto a la tensión a aplicar a los bobinados durante el ensayo, existe una regla que establece que la misma no debe ser mayor al correspondiente valor de fase del transformador, siguiendo siempre las especificaciones o recomendaciones, en este sentido, del fabricante.

- Como referencia para los ensayos, se han adoptado los siguientes niveles de tensión: 500 V, 2500 V y 10 kV.

- Por lo tanto, para un bobinado de BT (400 V en vacío), la tensión de ensayo será de 500 V, evaluando la posibilidad de aplicar hasta 1000 V.

- Para un bobinado de MT (13,2 kV), la tensión de ensayo recomendada será de 7500 V, evaluando aplicar una tensión de 10 kV.

C- <u>Interpretación y Análisis</u>

- Los valores medidos de la tg δ permiten determinar la <u>calidad</u> y <u>estado</u> del sistema de aislación del transformador.

- Se destaca que el análisis es del tipo comparativo, es decir, su evaluación requiere el seguimiento de los valores de la tg δ a lo largo del tiempo.

- Una característica importante a tener en cuenta es que este parámetro depende significativamente de la temperatura (entre otros).

- En tal sentido y a los fines de comparar los valores y obtener las tendencias, los mismos deberán corregirse a una temperatura de referencia, la cual se adopta, en el caso de transformadores en aceite, en un valor de **20 °C**.

- A continuación, se indica una tabla con el factor de corrección K, para un rango de temperaturas de 10 °C a 60 °C.

Temperatura (°C)	Factor de Corrección K
10	0,79
20	1,00
30	1,25
40	1,57
50	1,98
60	2,45

- A partir del factor de corrección K, la expresión de cálculo para la tg δ a 20 °C, teniendo el valor de la misma para una temperatura de ensayo θ (en °C), será:

$$\mathrm{tg}\ \delta(20°\mathrm{C}) = \frac{\mathrm{tg}\ \delta(\theta)}{\mathrm{K}}$$

- Los resultados obtenidos de este ensayo, permiten determinar:

  - Nivel de degradación del sistema de aislación en el tiempo.
  - Contaminación acuosa disuelta en el aceite (humedad).
  - Contaminación por partículas conductoras disueltas en el aceite.
  - Contaminación por sustancias polares disueltas en el aceite.
  - Envejecimiento de la aislación.
  - Detección de fallas internas.

- Defectos o fallas en los bushings (este tema lo desarrollaremos en la Parte 5).

- La **Capacidad** en alterna del sistema de aislación, es otro parámetro útil a la hora de evaluar la degradación del dieléctrico y/o actividad de descargas (ionización), como ya comentamos en los principios teóricos. En ambos casos la capacidad tenderá a aumentar en su valor (denominado "incremento aparente de la capacidad").

- Tener en cuenta: el valor en la variación de la Capacidad es un indicador de problemas, debido a deformaciones y/o desplazamientos de los arrollamientos, ante esfuerzos electrodinámicos, como consecuencia de fallas en el sistema de potencia.

- Tener en cuenta: el valor de la tg δ depende significativamente de la temperatura, del elemento a ensayar, por lo que este parámetro deberá siempre asociarse al valor de esta magnitud de influencia, o bien su corrección a un nivel de referencia (por lo general al valor de 20 °C).

- En la siguiente tabla se muestran valores de la tg δ, correspondiente a 20 °C, recomendados para distintos tipos de transformadores:

Tipo de transformador	**TD a 20 °C (%)**
Potencia nuevo	0,25 a 0,5
Potencia con 15 años de servicio	0,75 a 1,5
Distribución nuevo	0,5 a 1
Distribución con 15 años de servicio	1 a 2

Ingenieria Nova Miron.