

# Ensayo de tangente delta y capacidad

## 1. Introducción

La Tangente Delta es un parámetro dieléctrico muy importante a la hora de evaluar el estado de un sistema de aislación, ya que refiere a las pérdidas dieléctricas que se desarrollan en el volumen de los materiales aislantes.

Debemos recordar que los sistemas de aislación de las máquinas eléctricas de MT, además del envejecimiento natural, se degradan a través del tiempo, como consecuencia de las sollicitaciones a que se encuentran sometidos durante los distintos ciclos de trabajo de operación.

De tal forma, todo plan derivado del Mantenimiento Predictivo, deberá tener en cuenta un programa de controles, que incorpore este ensayo dieléctrico no destructivo.

Junto a la medición de la Tangente Delta, se deberá medir la Capacidad del sistema de aislación. El seguimiento de este parámetro nos permitirá analizar posibles desplazamientos de los bobinados de los transformadores, ante eventuales fallas en el sistema de potencia (ej: esfuerzos electrodinámicos como consecuencia de cortocircuitos).

Es importante destacar que los análisis derivados de este ensayo son del tipo comparativo, por lo que será fundamental contar con valores de referencia, con el fin de evaluar las tendencias en el tiempo.

A continuación expondremos los principios teóricos, ventajas de implementar este ensayo en un plan de mantenimiento predictivo, e interpretación de las mediciones.

## 2. Principios Teóricos

- La **Tangente Delta** es un parámetro del material dieléctrico, el cual representa las pérdidas totales en el volumen de este material. Comprende el resultado neto de varios fenómenos que ocurren en la estructura del Sistema de Aislación.
- Para poder comprender el concepto de Tangente Delta (TD) resulta conveniente plantear un modelo del sistema de aislación basado en parámetros concentrados. Este modelo debe representar todos aquellos procesos físicos que determinan el comportamiento eléctrico macroscópico del sistema en estudio. Nuestro objetivo será el de interpretar y predecir el estado o condición de los materiales que conforman este sistema, en relación a las pérdidas que se desarrollan en su interior.

- Para realizar este 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 a cuatro corrientes, que representan los siguientes procesos físicos:

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  $V$  en  $90^\circ$ , por lo que puede modelarse simplemente con una capacidad ideal  $C_0$  (capacidad geométrica del sistema).

b- Polarización del dieléctrico

El principio básico del modelo físico para estos procesos, se sustenta en que pueden representarse 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 variable aplicado; depende de la estructura molecular, estado del material y temperatura).

c- Conducción superficial y volumétrica

Se debe al movimiento continuo de portadores de carga a través del sistema de aislación, ya que la resistividad del material dieléctrico es finita.

Depende 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.

d- Ionización

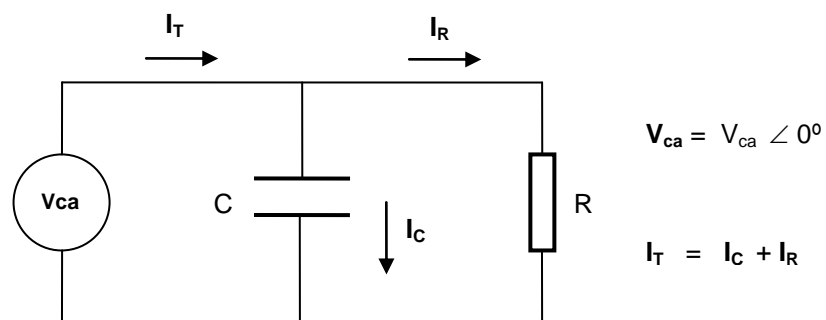
Comprende al proceso físico de las actividades de descargas parciales (DP), ya sean superficiales o internas.

Las DP consumen energía, por lo cual provocan un aumento de las pérdidas dieléctricas; este proceso se puede modelar a través de una resistencia.

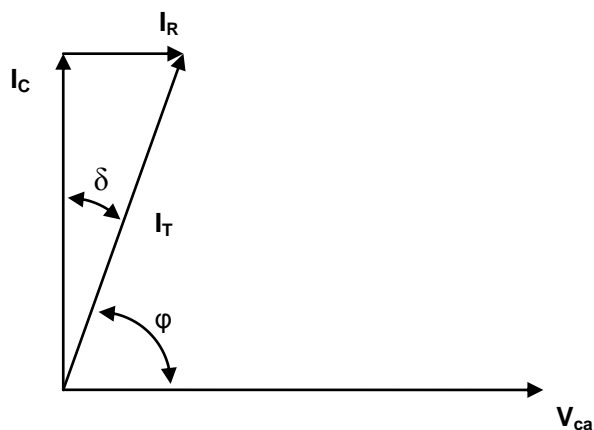
Al mismo tiempo, esta actividad provoca un incremento de la capacidad del sistema ya que al iniciarse una descarga se produce un cortocircuito en el espacio gaseoso que la contiene. Este incremento se representa a través de una capacidad.

Por lo tanto, los efectos combinados de las DP se modelan con una disposición serie de resistencia y capacidad.

- Todos estos procesos dieléctricos pueden sintetizarse en un circuito equivalente simplificado de parámetros concentrados del sistema de aislación de la máquina eléctrica, constituido por una resistencia y capacidad en paralelo, según se observa en la siguiente figura:



Si representamos a través de un diagrama fasorial, tendremos:



En donde:

- $V_{ca}$  : tensión en alterna aplicada.
- $I_T$  : corriente total.
- $I_C$  : corriente capacitiva total o componente reactiva.
- $I_R$  : corriente resistiva total o componente activa.
- $\varphi$  : ángulo de potencia.
- $\delta$  : ángulo de pérdidas =  $90^\circ - \varphi$ .

- La medición del **ángulo de pérdidas ( $\delta$ )** o de la **tangente de este ángulo  $-tg(\delta)$** , representa un indicador de la calidad del aislante ya que las **pérdidas se encuentran correlacionadas con la vida útil del material**. Es por eso que este parámetro es muy utilizado en el sector tecnológico de los materiales aislantes.
- En tal sentido destacamos que en un **material aislante de alta calidad**, el ángulo de pérdidas será de un valor muy pequeño ( $\delta \sim 0^\circ$ ). Análogamente, para este tipo de material, el ángulo de potencia ( $\varphi$ ) tendrá un valor muy próximo a  $90^\circ$ .
- Del diagrama fasorial podemos obtener la expresión de la  $tg(\delta)$ , siendo:  **$tg(\delta) = I_R / I_C$** .
- Resultará de importancia práctica obtener la expresión de las **pérdidas dieléctricas**, en función del parámetro  $tg(\delta)$ , la cual se encuentra relacionada con la potencia activa disipada en el volumen del material. Podemos expresar:

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

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

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

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

- Se observa de la última expresión que la tensión aplicada por la fuente de alimentación ( $V_{ca}$ ) y la frecuencia ( $f$ ), son magnitudes externas al sistema de aislación, mientras que la capacidad ( $C$ ) y la tangente del ángulo de pérdidas  $-tg(\delta)$  son **parámetros intrínsecos** del mismo.
- Debido a que la capacidad  $C$  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, en base a la expresión previa, a la  **$tg(\delta)$  como el parámetro representativo de las pérdidas dieléctricas**.

- Una conclusión que se desprende de la expresión de las pérdidas dieléctricas es que el incremento de la misma estará dado por el incremento de alguna o varias de las siguientes magnitudes:
  - Frecuencia (f).
  - Tensión aplicada ( $V_{ca}$ ).
  - Capacidad del sistema de aislación (C).
  - Características intrínsecas del o los materiales aislantes ( $tg\delta$ ), que conforman el sistema.
- Un hecho a tener en cuenta es que, debido a que el ángulo de pérdidas  $\delta$  es muy pequeño, se suele aproximar la  $tg(\delta)$  con el  $sen(\delta)$  ( **$tg(\delta) \sim sen(\delta)$** ). Pero como  $sen(\delta) = cos(\varphi) \rightarrow$   **$tg(\delta) \sim cos(\varphi)$** . Por esta razón es que en algunos documentos se hace referencia al ensayo de Factor de Potencia (FP), en donde directamente se mide la magnitud "cos  $\varphi$ ".
- Del diagrama fasorial podemos observar que:  **$FP = I_R / I_T$** .
- En algunos textos o documentos se suele denominar a la  $tg(\delta)$  como Factor de Pérdidas. Esta denominación no es correcta, ya que el Factor de Pérdidas (fpd) de un aislante, se define como el producto entre la permitividad dieléctrica relativa y la  $tg(\delta) \rightarrow$   **$fpd = \epsilon_r tg(\delta)$** . Este factor nos sirve para expresar las **pérdidas del dieléctrico por unidad de volumen**; tendremos:

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

- Capacidad geométrica del sistema (o en vacío) =  $C_0 = \epsilon_0 S / d$  [F]

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

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

- Volumen del material dieléctrico =  $S d$  [m<sup>3</sup>]

- Pérdidas por unidad de volumen =  $p_{ca} = P_{ca} / (S d)$  [W / m<sup>3</sup>]

$$\therefore P_{ca} = 2 \pi f V_{ca}^2 \epsilon_r C_0 tg(\delta) = \omega V_{ca}^2 C_0 \epsilon_r tg(\delta) \rightarrow \mathbf{P_{ca} = \omega V_{ca}^2 C_0 fpd}$$

$$\therefore P_{ca} = \omega (E d)^2 (\epsilon_0 S / d) \epsilon_r tg(\delta) = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon_r tg(\delta) S d$$

$$\therefore \mathbf{p_{ca} = \omega \epsilon_0 E^2 \epsilon_r tg(\delta) \rightarrow p_{ca} = \omega \epsilon_0 E^2 fpd}$$

- A veces se suele mencionar al **Factor de Calidad** del material aislante. Este parámetro alternativo a la  $\text{tg}(\delta)$ , y denominado con la letra **Q**, se expresa de la siguiente forma:

$$Q = 1 / \text{tg}(\delta) = \text{cotg}(\delta) = \text{tg}(\varphi).$$

- Es importante destacar que, los materiales aislantes de alta calidad, utilizados en los sistemas de potencia, poseen valores de  $\text{tg}(\delta)$  que se encuentran en el orden de las milésimas y diezmilésimas partes. En el caso de materiales aislantes de menor calidad, este parámetro podrá alcanzar, o superar, valores del orden de las centésimas partes.
- En cuanto a la representación de la  $\text{tg}(\delta)$ , encontramos tres variantes, las cuales se usan indistintamente, tanto en la bibliografía, como en las normas y protocolos de ensayo. Tendremos:
  - En valores porcentuales. Esta representación es muy usada en los protocolos de ensayo. Ej: 0,4%.
  - En notación exponencial. Muy usada por los laboratorios y en las normas. Ej:  $4 \times 10^{-3}$ .
  - En valores por unidad. Usada en cálculos. Ej: 0,004.

### 3. Ventajas en la medición de la $\text{Tg}(\delta)$

- Como ya hemos visto, la pérdida dieléctrica en un sistema de aislación refiere a la potencia disipada por éste, cuando se encuentra sometido a una tensión alterna aplicada. Estas pérdidas, para todos los sistemas aislantes utilizados en la práctica, son cuantificables, si bien las aislaciones de alta calidad poseen pérdidas dieléctricas muy bajas.
- Encontramos distintos factores que pueden afectar al sistema de aislación, y por lo tanto incrementar las pérdidas. Tendremos:
  - Degradación natural de los materiales aislantes que conforman el sistema de aislación.
  - Efectos de la sollicitación térmica.
  - Efectos de la sollicitación eléctrica.
  - Efectos de agentes contaminantes (humedad, polvos, residuos carbonosos, agentes químicos).

- Teniendo en cuenta lo indicado previamente, a continuación podemos establecer las ventajas que se obtienen al implementar el **Ensayo de Tangente Delta y Capacidad**, dentro del Programa de Control del Mantenimiento Predictivo de transformadores.
  - Los ensayos de Referencia Inicial sobre transformadores nuevos, permiten establecer la presencia de defectos de fabricación, así como daños ocasionados durante el traslado de la unidad y su montaje en el sitio de operación.
  - Durante el proceso de fabricación de un transformador de potencia, permite controlar la etapa de secado de los aislantes sólidos, antes de la impregnación en el líquido aislante. El control se basa en implementar el ensayo de Tangente Delta sobre la aislación sólida (parte activa) en la fase final de secado, y finalmente en la fase de impregnación de ésta en el aceite.
  - Los valores obtenidos de los ensayos de Referencia Inicial proveen niveles de base para realizar los análisis comparativos, en futuros controles, y determinar así la tendencia de cada parámetro evaluado.
  - Establecer una condición aceptable para energizar un transformador nuevo o reparado (ensayo de recepción).
  - La implementación de un programa de mantenimiento predictivo efectivo, permitirá establecer controles de seguimiento, los cuales proveerán la información necesaria para evaluar el estado del sistema de aislación (líquido aislante + parte activa, y de los bushings). Lo anterior refiere a monitorear el nivel de degradación normal de los aislantes con el tiempo, o detectar una degradación anómala, como consecuencia de un evento o estado de falla de la máquina.

#### **4. Interpretación de las mediciones**

- Destacamos que el análisis comparativo será el método más efectivo para evaluar el estado del sistema de aislación en el transformador. De aquí resulta evidente la importancia de registrar los valores de referencia de fábrica, y los obtenidos en los sucesivos controles de seguimiento.

- Lo anterior nos determina la importancia de las magnitudes de influencia ambientales, ya que la  $\text{tg}(\delta)$  es muy sensible a la variación de la temperatura, y a la humedad relativa.
- En tal sentido, nuestro criterio de trabajo determina que las magnitudes de influencia, Temperatura del sistema de aislación, Temperatura Ambiente y Humedad Relativa Ambiente, también sean medidas, con el objetivo de poder realizar una evaluación integral de los registros antecedentes, con los adquiridos en los controles actuales.
- Por lo tanto los valores medidos de la Tangente Delta en un transformador, deberán corregirse por la influencia de la temperatura del líquido dieléctrico. A tal efecto, se puede recurrir a un factor de conversión  $K_t$  (especificado en tablas en las normas), el cual permite referir el valor del parámetro, medido a la temperatura  $T$ , a la de referencia de 20 °C. La expresión de cálculo será:

$$\text{tg } \delta(20) = \text{tg } \delta(T) / K_t.$$

- En definitiva, podemos decir que la medición de la  $\text{tg}(\delta)$ , será una herramienta fundamental para establecer el estado del transformador, en relación a la siguiente información, que podemos obtener en base a la misma:
  - Determinación del nivel de degradación del sistema de aislación en el tiempo.
  - Determinación de contaminación acuosa disuelta en el aceite (humedad).
  - Determinación de contaminación por partículas conductoras disueltas en el aceite.
  - Determinación de contaminación por sustancias polares disueltas en el aceite (también afectan a la aislación sólida).
  - Determinación de carbonización de la aislación.
  - Detección de fallas internas.
  - Determinación de defectos o fallas en los bushings.
- La medición de 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). En ambos casos la capacidad tenderá a aumentar en su valor (denominado "incremento aparente de la capacidad").



- También será un indicador de problemas derivados por deformaciones y/o desplazamientos de los arrollamientos, ante esfuerzos electrodinámicos, como consecuencia de fallas en el sistema de potencia.
- En el caso de transformadores con aislación líquida, el ensayo constará en relevar por lo menos un punto de medición (Tangente Delta y Capacidad), correspondiente a la tensión de ensayo especificada. Cada punto de medición corresponderá a un dado esquema de conexionado, el cual nos permitirá adquirir la información necesaria (capacidades parciales), para luego evaluar el estado del sistema de aislación global.
- Para un análisis correcto se deben comparar estos valores entre fases, así como obtener tendencias en el tiempo, de forma tal de analizar la evolución de estos parámetros. También se aconseja comparar resultados con aquellos derivados de ensayos en transformadores de características similares. Recordemos que el análisis comparativo requiere la corrección previa del parámetro, por influencia de la temperatura, según ya hemos indicado.
- La frecuencia de implementación de los controles, basados en el ensayo de Tangente Delta y Capacidad, dependerá del estado de la máquina. Para un estado normal se aconseja realizar los controles de seguimiento en forma anual; para un estado en el cual se ha detectado una situación anómala o de degradación natural avanzada del sistema, se aconseja realizar controles semestrales de seguimiento. Esta información será de vital importancia para el personal de mantenimiento, ya que le permitirá fijar los intervalos de control, y tomar así las decisiones en cuanto a la intervención por reparación, o posible reemplazo de la máquina.

Ing. Ernesto E. Zelaya.  
Ingeniería.  
Nova Mirón S.A.