Degradación de la celulosa en transformadores en aceite

1. Introducción

Los transformadores en aceite (distribución o potencia) se encuentran sometidos a un conjunto de solicitaciones, cuyos efectos son los de degradar, en forma paulatina, el sistema de aislación de la máquina.

De los resultados derivados de los análisis de falla en estos transformadores, se llega a la conclusión que las actividades de mantenimiento se deberán orientar a asegurar la confiabilidad del sistema de aislación. Y de todos ellos, el más importante es el sólido (basado en celulosa), cuya vida útil determina la del transformador.

Es por esto que será fundamental, para aplicar una efectiva estrategia de mantenimiento, conocer el proceso de degradación del sistema de aislación sólido-celulosa, y los medios técnicos para analizar este proceso y así determinar con precisión el estado del mismo.

A continuación desarrollamos las clases de solicitaciones que son causa de este fenómeno, así como los métodos requeridos para la evaluación.

2. Clases de Solicitaciones

Podemos establecer cuatro (4) clases de solicitaciones, en donde agrupar todas las causas de degradación sobre el sistema de aislación. Tendremos:

a) Térmica (cuando el transformador se encuentra operando a temperaturas excesivas, que superan las de diseño).
b) Eléctrica (corresponde a esfuerzos eléctricos, como ser arcos y/o descargas, o sobretensiones).
c) Existencia de oxígeno.
d) Existencia de humedad.

En el mismo instante que el transformador es puesto en servicio, estas solicitaciones comenzarán a degradar en forma paulatina e irreversible al sistema de aislación (sólido y líquido). Es decir que, la vida útil de la máquina estará relacionada con el proceso inexorable e irreversible de envejecimiento de los materiales que constituyen los distintos sistemas que la componen.

Como consecuencia de lo expresado previamente, podemos concluir que la vida útil de un transformador estará íntimamente relacionada con la vida útil de su sistema de aislación sólido.

De tal forma, la evaluación o monitoreo del estado de este sistema, será la clave para asegurar la confiabilidad operativa de la máquina.

A continuación detallamos los factores de degradación de la aislación sólida.

3. Factores de degradación

Destacamos los siguientes factores que contribuyen a la degradación del sistema de aislación sólida de un transformador en aceite.

a) Térmico

La acción de la temperatura contribuye a la generación de reacciones químicas que terminan degradando a la celulosa.
Las reacciones que influyen en este proceso son la Oxidación y la Hidrólisis, las cuales son altamente dependientes de las proporciones de **oxígeno**, **agua** y **ácidos**, contenidos en el volumen del líquido aislante, y que se encuentran en contacto con la celulosa.
En la medida que la solicitación térmica sobre el transformador se incremente, también aumentará la velocidad en que las reacciones químicas se desarrollen, y mayor será el nivel de degradación.
Para estos casos, existe una regla empírica que establece: *"Por cada 10 ºC de incremento en la temperatura, la velocidad en que se establecen las reacciones químicas se duplican"*.
En definitiva, concluimos que tanto la celulosa como el aceite, sometidos a un incremento de la solicitación térmica de 10 ºC, reducirán irreversiblemente la vida útil en un 50 %.
También debemos tener en cuenta que, cuanto mayor sea la concentración de los componentes contaminantes (oxígeno, agua y ácidos), mayor será la velocidad de degradación de la aislación sólida.
La ecuación química que resume este proceso es la siguiente:

$$\text{Celulosa} \rightarrow \text{Glucosa} + H_2O + CO + CO_2 + \text{Ácidos orgánicos} \quad (\text{Calor})$$

b) Humedad

La celulosa posee una gran afinidad para absorber y retener el agua.

Es un hecho conocido que el agua retenida en la aislación sólida migrará al volumen del líquido aislante, a medida que la temperatura en el transformador se incrementa.

De la misma forma, el agua contenida en el volumen del líquido aislante migrará a la aislación sólida, en la medida que la temperatura disminuya.

La humedad tiene la particularidad de deteriorar la rigidez dieléctrica del papel aislante, así como su resistencia mecánica. Se establece que la resistencia mecánica disminuye a la mitad cuando aumenta al doble el contenido de humedad.
Además, no debemos subestimar el fenómeno de la "oxidación" de la celulosa, ya que de este proceso se agrega un adicional de agua, aunque la máquina se encuentre perfectamente sellada, por efecto de la degradación.

La velocidad de generación de agua por degradación de la celulosa, se encuentra profundamente relacionada por el contenido de oxígeno en el aceite y por la solicitación térmica sobre la máquina.
El incremento de ambos parámetros llevará a un aumento de la velocidad de generación de agua.

c) Oxidación

La oxidación de la celulosa, es un proceso químico que lleva a la degradación y a la consecuente generación de óxidos de carbono (CO y CO_2).
De tal forma, una de las formas de controlar el nivel de degradación de la aislación sólida, es el de monitorear los niveles de estos gases a través del tiempo.
A medida que la celulosa reacciona químicamente con el oxígeno, se generará fundamentalmente gas CO_2 y agua; también se podrá generar gas CO, siempre que no haya una suficiente provisión de oxígeno que requiera el proceso de oxidación.
Podemos representar por la siguiente ecuación química:

$$\text{Celulosa} \rightarrow \text{Glucosa} + H_2O + \text{Radicales libres}$$
$$(O_2)$$

d) Acidez

Otro proceso químico que degrada la celulosa es la hidrólisis (conocida como Degradación Hidrolítica).

Se refiere a las reacciones químicas, en donde el agua, contenida en el volumen del líquido aislante, se insume en romper las cadenas poliméricas

que constituyen las moléculas de celulosa, quedando así la glucosa en estado libre.

Los ácidos, también contenidos en el líquido aislante como consecuencia del proceso de oxidación, actuarán como catalizadores de la descomposición de la celulosa en su reacción con el agua.

Entonces, podemos establecer que la degradación de la aislación sólida está íntimamente relacionada con el incremento de la acidez en el líquido aislante.
La expresamos de la siguiente forma:

$$\text{Celulosa} \xrightarrow[(H_2O + \text{Ácidos})]{} \text{Glucosa libre}$$

4. Monitoreo y Evaluación de la degradación

Se han elaborado métodos para monitorear y evaluar el estado de degradación de la aislación sólida en transformadores en aceite.
Destacamos:

a) Medición de gases disueltos en el líquido aislante (CO y CO_2)
b) Medición de compuestos furánicos disueltos en el aceite.
c) Medición del Grado de Polimerización.

Estos métodos de medición se basan en considerar que, cuando la aislación sólida (basada en celulosa), comienza a degradarse, se generan, como ya hemos visto, gases CO y CO_2, así como furanos y una consecuente disminución del Grado de Polimerización.

El Grado de Polimerización (GP) de la celulosa representa el número de monómeros β de glucosa ($C_6H_{10}O_5$) que constituyen la molécula del papel aislante.

Para un sistema de aislación sólido nuevo, el papel posee un GP con valores que oscilan entre 1000 y 1400, mientras que para uno envejecido en condiciones normales, los valores se encuentran entre 800 y 500.

Debemos destacar que este parámetro se encuentra estrechamente relacionado con la resistencia mecánica del papel, y por tal motivo, como consecuencia de estudios realizados en el campo, se determina que para un GP ≤ 250 el papel ya ha perdido sus propiedades mecánicas, y por lo tanto ha llegado al final de su vida útil.

Cada molécula de celulosa está inicialmente compuesta de aproximadamente 1000 unidades monoméricas, similares a la glucosa. A medida que se degrada la molécula de celulosa, se produce la ruptura de las cadenas del polímero, y el número promedio de unidades en cada molécula se reduce.

Como ya hemos mencionado, esta reducción en el GP de la celulosa, se encuentra relacionado con una disminución de la resistencia mecánica, así como un cambio en el color del papel aislante. Debido a esta degradación, la celulosa alcanzará un punto en donde ya no cumplirá la función de aislante.

Los compuestos furánicos (CF), son productos químicos que se generan como consecuencia de las reacciones de deshidratación de las moléculas de glucosa. Son cinco (5) compuestos, a saber:

1) 2-Furfural (2-FAL)
2) 5-Hidroximetil-2-2furfural (HMF)
3) Furfuril alcohol (FOL)
4) 2-Acetil furfural (AF)
5) 5-Metil-2-furfural (MF)

Es importante destacar que los CF se pueden generar como consecuencia de un sobrecalentamiento en el transformador (carga por encima de la nominal o por sucesos de fallas), disolviéndose éstos en el líquido aislante.

Los tipos de CF generados será función directa de la temperatura a la cual se desarrolla la degradación de la celulosa, así como del contenido de O_2 y agua, tanto en la aislación sólida como líquida.

Importante es tener en cuenta que, la degradación hidrolítica será la generadora principal del componente furánico 2-FAL, en transformadores en servicio.

Se deberá considerar con mucha atención, a la hora de evaluar resultados de análisis de furanos, que estos compuestos no sólo pueden provenir de la degradación de la celulosa, sino también de aceites que han sido reutilizados, los cuales se derivan de secados excesivos, en concordancia al proceso de refinación.

Para finalizar, diremos que un análisis certero del estado de la celulosa, dependerá de considerar, en la evaluación de los resultados, todos aquellos factores que determinan su degradación, así como el diseño y fabricación, junto a todos los eventos, procesos e historia clínica del transformador.

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