Estado del Papel. Fin de la Vida en Transformadores

1. Introducción

Siguiendo con el lineamiento planteado en el artículo Extensión y Fin de la Vida en Transformadores, en el presente vamos a describir el mecanismo de degradación principal de los arrollamientos de un transformador, el cual refiere al envejecimiento y consecuente pérdida de las propiedades del papel aislante.

Este hecho, principalmente desarrollado en la etapa de Fin de la Vida del transformador, resulta muy complejo de analizar, debido a la acción múltiple de solicitaciones (en especial la térmica).

En tal sentido, la correlación entre los compuestos generados por el proceso de degradación del papel aislante y el estado de la condición del mismo, resultará muy difícil de determinar.

Además, el tipo de papel aislante utilizado introducirá otra variable, que llevará a replantear el método de análisis y el diagnóstico.

Nos referimos, en este caso, al uso de papel mejorado térmicamente, el cual posee una impregnación con el aditivo Dicyandiamida (DICY), cuyo fin será el de mejorar las propiedades térmicas del mismo.

El objetivo del presente trabajo será el de realizar una introducción al concepto de degradación del papel en la etapa de Fin de la Vida del transformador, así como presentar una visión de las variables en juego, a la hora de determinar el estado de la condición de la aislación sólida.

Todo este conocimiento será vital para asistir en el desarrollo del Plan de Contingencia (reacondicionamiento/reposición) del transformador.

2. Estado del papel. Fundamentos

Sabemos que la celulosa, al descomponerse, libera, además de los gases CO y CO_2, unos compuestos químicos solubles en el aceite, denominados furanos.

El más importante de estos compuestos, desde el punto de vista del análisis y el diagnóstico, con el fin de establecer el estado de degradación de la celulosa, es el 2-furfuraldehído (2-FAL).

Antes de proceder a describir el proceso de degradación del papel/celulosa, vamos a repasar algunos conceptos útiles, asociados a la Gestión de Activos, en general y a la Gestión del Ciclo de Vida de los Activos, en particular.

En primer lugar, se define como <u>Envejecimiento de un Activo</u> a la degradación acumulada de un sistema de activos o activo, que puede resultar en una pérdida de las funciones inherentes y/o en una afectación de la seguridad de las personas o de las instalaciones.

Siguiendo con este enfoque, podemos listar, a continuación, los factores principales que favorecen el envejecimiento de los activos.

- Procesos físico-químicos internos.
- Procesos físico-químicos externos.
- Solicitaciones externas.
- Condiciones operativas del servicio.
- Deficiencias derivadas de la etapa de Pre Puesta en Servicio.

En cuanto a la Extensión de la Vida de un activo, podemos decir que es el conjunto de actividades a implementar, cuyo fin es el de incrementar la vida útil del activo más allá del tiempo originalmente previsto.

Como ya hemos visto en el artículo Extensión y Fin de la Vida en Transformadores, los transformadores de potencia y de distribución se encuentran sometidos a un conjunto de solicitaciones (térmicas, eléctricas, mecánicas, químicas), que aceleran el proceso de envejecimiento de los materiales que los conforman.

El efecto inmediato de los procesos de degradación de los materiales, será el desarrollo de puntos calientes (en especial en los arrollamientos y el núcleo magnético), así como de actividad de descargas parciales (descargas de baja energía) y en el peor de los casos de arcos (descargas de alta energía).

Teniendo en cuenta que la degradación del papel aislante es el factor principal en la determinación del estado de Fin de la Vida de un transformador, será importante establecer un conjunto de técnicas que permitan monitorear y evaluar esta condición.

A estos fines, se debe considerar:

- El inicio del proceso de degradación del papel aislante se encuentra íntimamente relacionado con el comienzo de la pérdida de la confiabilidad del transformador en el sistema, entre otras causas.

- El proceso de degradación del papel tiene su causa en la ruptura de las cadenas moleculares de la celulosa, por acción de la solicitación térmica, así como del oxígeno y el agua.

- El efecto de este proceso será, en primera instancia, la pérdida de las propiedades mecánicas del papel, con evidencia de descoloración y fragilidad.

- En segunda instancia, a medida que el proceso sigue avanzando, el papel comenzará a perder su integridad dieléctrica, llevando a un probable estado de falla por eventual descarga eléctrica.

Cuando, por efecto de la degradación del papel, se establecen puntos calientes en los arrollamientos, se generarán gases combustibles, en distintas proporciones relativas, así como otros compuestos químicos.

Entre los gases combustibles generados tendremos: H_2, CH_4, C_2H_4, C_2H_6, C_2H_2, CO y CO_2. También se obtendrá agua, compuestos orgánicos volátiles, compuestos orgánicos no volátiles, así como otros compuestos orgánicos, característicos de la degradación del papel, denominados compuestos furánicos.

A continuación se detallan estos compuestos.

Tabla N° 1

Denominación	Código
2-furfuraldehído	2-FAL
2-furylalcohol	2-FUROL
5-hidroximetil-2-furfuraldehído	5HM-FAL
2-acetil furano	2A-FUR

5-metil-2-furfural	5M-FAL

En lo que sigue, haremos una breve descripción de algunas características de estos compuestos.

a) Estabilidad de los compuestos furánicos

La característica principal de estos compuestos es que se encuentran directamente relacionados con el proceso de degradación del papel, es decir, no son productos generados por la descomposición del aceite.
En tal sentido, representan un indicador directo de la pérdida de las propiedades físico-químicas del papel aislante que conforma los arrollamientos.
De entre los 5 compuestos indicados en la tabla N° 1, el más relevante, como indicador del estado del papel, es el 2-FAL, siendo, por lo tanto, el más utilizado en los análisis.
Sin embargo, debemos resaltar que existe una limitación decisiva a la hora de utilizar estos compuestos en el proceso de determinación del estado de la condición de la aislación sólida.
Este hecho radica en la alta sensibilidad a la degradación que poseen los furanos, ante la acción de la temperatura y la oxidación.
En base a estudios realizados, se puede concluir:

- Sin la acción directa del oxígeno, se ha encontrado que todos los compuestos furánicos son estables en el rango de temperatura de 65 °C a 110 °C.

- Con la acción directa del oxígeno y para el mismo rango de temperatura, la degradación de los furanos se torna apreciable, correspondiendo de mayor a menor degradación, la siguiente: 2-FUROL, 5HM-FAL, 2-FAL, 5M-FAL, 2A-FUR.

- A temperaturas entre 110 °C a 150 °C y con acción directa de oxígeno, todos los furanos, con excepción del 2A-FUR y 5M-FAL, presentan estados de inestabilidad.

b) Afinidad relativa - Coeficiente de Partición

Debido a la característica polar de los compuestos furánicos, éstos poseen una mayor afinidad por el papel, en relación al aceite.
Es decir, a medida que la temperatura en el interior del transformador varía, según los estados de carga, los furanos migrarán del papel al aceite y viceversa, en función del coeficiente de partición, asociado a cada compuesto.
El Coeficiente de Partición es una medida de la afinidad química y por lo tanto establece la relación del contenido, en ppm, de un dado furano en el papel y el contenido de éste en el aceite, en ppm.

Hay que tener muy en cuenta que este proceso es dinámico, variando en el día las cantidades de los compuestos furánicos en el aceite (o papel), según los estados de carga del transformador.
A continuación (tabla N° 2) se indican los coeficientes de partición de los compuestos furánicos, a tres niveles de temperatura.

Tabla N° 2

Furano	**Coeficiente de Partición**		
	25 °C	**70 °C**	**90 °C**
2-FUROL	33	12,5	25
5M-FAL	0	0	0
2-FAL	4,5	5,26	5,26
5HM-FAL	2,04	3,45	3,33
2A-FUR	1,63	2,63	2,78

Podemos observar de la tabla que, en condiciones nominales de operación de un transformador, los compuestos furánicos se encuentran principalmente alojados en el papel (a excepción del 5M-FAL).
También se destaca que la afinidad relativa es un parámetro que depende significativamente de la temperatura, pero también por los contaminantes disueltos en el aceite.
Es decir, cuanto mayor sea la concentración de contaminantes, en especial los de constitución polar (agua, ácidos, aldehídos, etc.), mayor será la variación del coeficiente de partición.

NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

3. Identificación e interpretación

Los factores que influyen en la constitución de la concentración del compuesto 2-FAL en el aceite, son los siguientes:

a) <u>Temperatura del Punto Caliente</u>

Representa el factor más importante en la formación del compuesto 2-FAL en el aceite, como consecuencia de la degradación del papel.
Con el fin de ponderar este factor en el análisis, hay que tener en cuenta que la temperatura en los arrollamientos del transformador no es uniforme punto a punto, adoptando valores variables en el tiempo, dependiendo de los estados de carga.
Además, se debe atender al hecho de que el proceso de calentamiento-refrigeración interno del transformador genera gradientes de temperatura, a través de la aislación, los cuales influyen en la conformación y distribución de los compuestos furánicos.

b) Clase de papel aislante

Es importante tener en cuenta que el papel mejorado térmicamente genera una menor proporción de compuestos furánicos, bajo las mismas condiciones que el papel convencional (Kraft).
Como referencia, se puede considerar que el papel mejorado térmicamente genera una mayor concentración del compuesto 2-furil alcohol (2-FUROL) que el papel convencional (asumir en el orden de 2 a 6 veces).

c) Humedad y oxígeno

Ambos parámetros poseen una influencia significativa en la generación de los furanos.
Se establece que, a bajas temperaturas internas del transformador, el efecto de la humedad es preponderante en la formación de los compuestos furánicos.
También influye en la distribución de los compuestos en el aceite, estado en directa relación con el contenido de humedad.
Por lo tanto, al efectuar el análisis de 2-FAL, se deberá tener en cuenta el nivel de humedad en el aceite.
El oxígeno disuelto en el aceite también influye en el proceso de degradación del papel, pero con un factor de peso menor.

d) Temperatura del aceite

El valor de la temperatura del aceite también influye sobre la estabilidad en el largo plazo de las concentraciones de los furanos disueltos en el aceite.
Además, afecta la distribución de los compuestos entre el aceite y el papel, por lo que será conveniente tomar nota de la temperatura del aceite, al momento de adquirir la muestra para el análisis.

e) Tipo de aceite y estado

Este factor tiene en cuenta la acción de los aditivos inhibidores en el aceite, en el sentido que no favorecen la generación de furanos, en relación a los aceites no inhibidos, que sí favorecen la formación de estos compuestos.
La degradación de las propiedades físico-químicas del aceite acelera la formación de algunos compuestos furánicos, mientras que reducen la generación de otros.

f) Historia operativa

El tratamiento o cambio del aceite llevará a remover los compuestos furánicos. Pero habrá que tener en cuenta que, debido a la naturaleza polar de los furanos, se producirá una absorción del papel de los mismos, en una cierta proporción, en relación al aceite.
Este proceso conlleva a establecer un estado de equilibrio, a través de una transferencia lenta de los furanos absorbidos por el papel y el aceite tratado (o renovado).
La tasa de transferencia vendrá dada por el tipo de compuesto (coeficiente de partición entre papel y aceite) y la temperatura.

g) Diseño del transformador

La relación papel/aceite, así como la refrigeración, representan factores importantes en la formación y distribución de los compuestos furánicos.
A mayor cantidad de papel, involucrado en la conformación de los arrollamientos, mayor será la propensión a generar los compuestos en el aceite y a su distribución en el volumen del mismo.

4. Estado de falla y fin de la vida

Un análisis y diagnóstico eficaz del estado de degradación del papel aislante, requiere conocer la cantidad y velocidad de generación de los gases asociados a este proceso.

La determinación correcta del estado de la aislación de los bobinados llevará a obtener un conjunto de beneficios, desde el punto de vista de la Gestión del Ciclo de Vida del transformador. Tendremos:

- Detección temprana en el desarrollo de puntos calientes en los arrollamientos, los cuales representan causas potenciales de salidas de servicio no programadas o eventuales estados de falla catastrófica.

- Priorización del mantenimiento de las unidades afectadas, de forma tal de apuntalar el Mantenimiento Preventivo y de adecuar las técnicas de monitoreo de la condición.

- Promover la extensión de la vida operativa del transformador, adecuando las condiciones de carga y/o sobrecarga.

- Optimización de la operación del transformador, en condiciones seguras y nominales de diseño.

- Estimación de la pérdida de vida del papel y en consecuencia del transformador.

- Promover la extensión de la vida del transformador, en base a decisiones sustentadas en la gestión del conocimiento.

- Disminuir la necesidad de inversión, en la adquisición de un nuevo transformador.

Otra característica que deberá tenerse en cuenta en la evaluación del estado de la condición del transformador, en la etapa de Fin de la Vida, será la correlación entre los compuestos furánicos y el Grado de Polimerización (GP) de la celulosa.

En este sentido, se han realizado varios estudios, cuyos objetivos son los de establecer fehacientemente una relación entre las cantidades absolutas de los compuestos disueltos en el aceite del transformador y el estado de la condición del papel aislante.

Se puede establecer la relación entre el contenido de 2-FAL y el GP, a través de la siguiente expresión logarítmica:

$$\log(2\mathrm{FAL}) = \mathrm{A\ GP} + \mathrm{B}$$

2FAL = concentración del compuesto 2-furfuraldehído (ppm).
A = valor comprendido entre -0,005 y -0,002.
B = valor comprendido entre 0,9 y 4,2.

A partir de esta expresión, en función de los valores que adopten A y B, se establecen distintos modelos, de los cuales indicaremos los siguientes:

a) <u>Modelo de Burton</u>

En este caso A = -0,005 y B = 2,5, determinando la siguiente expresión de cálculo:

$$\log(2\mathrm{FAL}) = -0{,}005\ \mathrm{GP} + 2{,}5$$

NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

b) <u>Modelo de Vuarchex</u>

En este caso A = -0,0049 y B = 2,6, determinando la siguiente expresión de cálculo:

$$\log(2\mathrm{FAL}) = -0{,}0049\ \mathrm{GP} + 2{,}6$$

c) <u>Modelo de Stebbins</u>

En este caso A = -0,0035 y B = 1,5655, determinando la siguiente expresión de cálculo:

$$\log(2\mathrm{FAL}) = -0{,}0035\ \mathrm{GP} + 1{,}5655$$

Debemos destacar que las expresiones previas corresponden a un papel convencional del tipo Kraft.

Para el caso de un papel mejorado térmicamente, el modelo de Stebbins adopta la siguiente expresión:

$$\log(2\mathrm{FAL}) = -0{,}002908\,\mathrm{GP} + 1{,}0355$$

Otra expresión que relaciona el GP con la concentración 2FAL, esta vez en (ppb), para un papel mejorado térmicamente, es la siguiente:

$$\mathrm{GP} = -303{,}03\log(2\mathrm{FAL}) + 1327{,}303$$

Con el fin de verificar un eventual estado de degradación del papel, una técnica efectiva será la de determinar la relación entre el 2-FUROL y el 2-FAL.

En base al resultado obtenido de esta relación podemos decir:

- Un valor < 0,2 representa un posible problema de sobrecalentamiento en los arrollamientos.

- Un valor ≥ 0,2 representa un posible problema en el arrollamiento (estado de degradación avanzado).

- Para una velocidad de crecimiento del 2-FUROL o 2-FAL > 400 ppb/año, en un papel tipo Kraft, nos indica la probable existencia de un estado de falla activa en los arrollamientos.

- Para una velocidad de crecimiento del 2-FUROL o 2-FAL > 200 ppb/año, en un papel mejorado térmicamente, nos indica la probable existencia de un estado de falla activa en los arrollamientos.

Para concluir con este ítem, en relación a la generación y análisis de los compuestos furanos y la etapa de Fin de la Vida del transformador, podemos establecer un conjunto de condiciones que deberán tenerse en cuenta, al momento de establecer el estado de la aislación sólida:

- Tipo de papel utilizado en la aislación de los arrollamientos del transformador.
- Fabricante, modelo, año de fabricación y características nominales del transformador.
- Diseño del transformador y volumen de aceite.
- Historia clínica del transformador.
- Temperatura del aceite al momento de obtener la muestra para el análisis de furanos.
- Temperatura del punto caliente del transformador.
- Velocidad de generación de los compuestos furánicos.
- Relación entre el 2-FUROL y el 2-FAL.
- Estado físico-químico del aceite (contenido de humedad, oxígeno, etc.).
- Tipo de aceite (inhibido o no inhibido).

5. Conclusiones

- Será muy importante, a la hora de evaluar el estado del papel de un transformador, tener en cuenta la conformación de los compuestos furanos y la temperatura de los arrollamientos. Este hecho nos permite diferenciar entre un problema perjudicial, ocasionado por un pequeño punto caliente de alta temperatura localizado en los arrollamientos y un problema no significativo, debido a un punto caliente de mayor tamaño pero de baja temperatura.

- Los transformadores que poseen aislación de papel térmicamente mejorado se caracterizan por generar, en el proceso de degradación de éste, una menor concentración del compuesto 2-FAL comparado con un papel convencional del tipo Kraft.

- En contrapartida, los papeles mejorados térmicamente se degradan generando una mayor proporción del compuesto 2-FUROL, en relación a las mismas condiciones de degradación que el papel convencional.

- Habrá que tener muy en cuenta la degradación de los compuestos furánicos por acción de la temperatura y el oxígeno, a la hora de efectuar los análisis que permitan determinar el estado de la condición del papel.

- Lo anterior exige registrar y evaluar las magnitudes de influencia citadas, de forma tal de lograr un diagnóstico confiable del estado del papel.

- Si bien dentro del rango de temperaturas de 65 °C a 110 °C, que es el normal de operación de un transformador de potencia, los compuestos se mantienen estables, considerando que no existe un proceso de oxidación interno, igualmente se deberán tener en cuenta estas eventuales influencias, al momento de considerar las concentraciones para el análisis.

- Las concentraciones de los compuestos furánicos, obtenidas de una muestra de aceite, serán dependientes de la afinidad relativa entre el papel y el aceite. Este parámetro es muy dependiente de la temperatura y de la existencia de contaminantes en el aceite (en especial los polares).

- Teniendo en cuenta la indicado previamente, se deberá tener en cuenta los factores citados, al momento de realizar un análisis de furanos, con el fin de establecer el estado de la condición del papel.

- La relación entre los compuestos 2-FUROL y 2-FAL, así como las velocidades de crecimiento asociadas, permiten determinar los posibles estados del papel, tanto para convencional como para el mejorado térmicamente.

- El proceso de envejecimiento de un papel mejorado térmicamente es muy diferente de aquel que corresponde al papel convencional, con la consecuente generación de concentraciones diferentes de los compuestos furánicos.

- En tal sentido, las concentraciones de furanos, en un papel mejorado térmicamente, serán menores, en comparación a las obtenidas de un papel del tipo convencional. Nos determina, de

esta forma, una correlación distinta entre el GP del papel y el compuesto 2-FAL, llevando a la aplicación de diferentes modelos para estimar el estado de la condición de la aislación sólida.

- Considerar: valores de 2-FAL > 1,6 ppm, para papeles convencionales, es un indicador de un estado avanzado de degradación.

- Considerar: valores de 2-FAL > 1 ppm, para papeles mejorados térmicamente, es un indicador de un estado avanzado de degradación.

- Considerar: en el caso de los papeles mejorados térmicamente, no solamente las concentraciones de furanos serán menores, en comparación a las del papel convencional, sino que también presentarán menor estabilidad en el aceite, como consecuencia del aditivo DICY.

.
Ingeniera Nova Mirón
.

NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES