Sobrecarga y efectos térmicos en transformadores

1. Introducción.

Desde el punto de vista de la operación y mantenimiento del transformador es muy importante analizar los distintos estados de sobrecarga a los cuales puede ser solicitado, ya que los efectos por actividad térmica, superior a la nominal, tiene una influencia decisiva en el proceso de degradación de la aislación sólida y por lo tanto en la vida útil de la máquina.

En este artículo haremos una descripción conceptual de la sobrecarga, describiendo además los efectos que promueven la degradación del papel, relacionándolos con los conceptos de envejecimiento, vida útil de la aislación y pérdida de vida de la misma..

2. Tipo de cargas en transformadores.

A los efectos del análisis, los tipos de cargas a que pueden ser solicitados los transformadores, se establecen de la siguiente forma:

2.1. Carga con expectativa normal de vida

En este caso el trafo opera continuamente a una temperatura del punto más caliente del conductor en el valor de 110 ºC.
Se permite una temperatura máxima de 120 ºC, sólo en el caso de que la máquina haya operado con temperaturas inferiores a los 110 ºC, durante largos intervalos de tiempo.
La temperatura del aceite, en la parte superior, será de 105 ºC.

2.2. Carga planificada superior a la nominal

Corresponde al caso de los trafos que no operan en forma continua a 110 ºC, pudiendo ser cargados a una temperatura máxima comprendida en el rango de 120 ºC a 130 ºC.
Se deberá evaluar la pérdida de vida de la aislación, durante el tiempo en que operó a las temperaturas previamente indicadas.
La temperatura del aceite, en la parte superior, será de 110 ºC.

2.3. Carga de contingencia de largo plazo

En condiciones de contingencia la temperatura del punto más caliente del conductor puede llegar a valores comprendidos en el rango de 120 ºC a 140 ºC.
Se deberá tener en cuenta que el tiempo de la sobrecarga dependerá de la pérdida de vida del aislamiento.
Se asume que estos estados de sobrecarga pueden ocurrir solamente de 2 a 3 veces durante la vida útil del trafo.
La temperatura del aceite, en la parte superior, será de 110 ºC.

2.4. Carga de contingencia de corto plazo

Durante un segundo o tercer evento de contingencia, se puede permitir alcanzar una temperatura máxima del punto más caliente del conductor de 180 ºC.
Esta sobrecarga solamente deberá permitirse en un rango de tiempo comprendido entre 2 a 3 horas, con una ocurrencia de 1 a 2 eventos durante la vida útil del trafo.
La temperatura del aceite, en la parte superior, será de 110 ºC.

Se deberá tener en cuenta que una temperatura de operación ≥ 140 ºC puede generar actividad de gases, tanto en el aceite como en la aislación sólida.

3. Efectos de las sobrecargas.

Cargas que superan las nominales, asociadas con el diseño de los arrollamientos y el sistema de refrigeración del trafo, causan problemas significativos, por lo que se deberán establecer condiciones o limitaciones a los citados estados de carga.

También será un factor decisivo en la operación de la máquina las altas temperaturas ambientales, ya que éstas establecen una condición adicional en el estado eventual de sobrecarga.

Este último hecho deberá evaluarse, especialmente en los casos de trafos emplazados en recintos con ventilación natural, ya que la temperatura ambiente será mayor que en aquellos ubicados a la intemperie.

Por lo tanto, una parte del análisis térmico deberá centrarse en determinar la diferencia de la temperatura ambiente, antes de especificar los límites de sobrecarga.

Podemos establecer los siguientes problemas, derivados de los efectos por sobrecarga:

3.1. Daño permanente

Es importante considerar que ante casos de excesivas sobrecargas térmicas se tendrán efectos de dilatación en materiales, cuya consecuencia final será la de generar deformaciones plásticas (permanentes) en distintos componentes. Lo anterior confiere el inicio de eventuales fallas mecánicas o en la aislación.

3.2. Reducción de la vida útil de la aislación

El sistema de aislación del trafo se encuentra sometido a un proceso de degradación como consecuencia de la solicitación térmica, lo cual lleva a la paulatina pérdida de la vida útil del mismo. Por lo tanto, será fundamental evaluar los ciclos de carga de operación, así como el cálculo o medición de las temperaturas del aceite y de los bobinados.

3.3. Fallas que provocan la salida de servicio del trafo

Las sobrecargas traen aparejados distintos tipos de problemas en distintos componentes del trafo. Podemos citar algunos: disminución de la resistencia mecánica del aislamiento (baja capacidad para soportar esfuerzos electrodinámicos), ciclos de dilatación/contracción de partes metálicas, pérdidas de aceite en los bushings por incremento de la presión interna, generación de burbujeo en zonas con temperatura superior a los 140 ºC, etc.

4. Reducción de la vida útil de la aislación.

Podemos decir que el sistema de aislación se encuentra sometido a un proceso de "pérdida de vida" como consecuencia del envejecimiento, por efectos combinados de la actividad térmica, acción del oxígeno y humedad.

Debemos destacar, que de todos estos parámetros, la temperatura más alta en los arrollamientos es la que determina el envejecimiento térmico del trafo. Ésta además nos determina el riesgo de "burbujeo" en el aceite, bajo condiciones extremas de carga.

Con el fin de evaluar estos efectos se han desarrollado modelos, basados en la Teoría de la Reacciones Químicas, en donde se puede expresar una relación para la **vida de la aislación**, de la siguiente forma:

$$\text{Vida } (^{o}/1) = A \exp(B / (Th + 273))$$

En donde:

Th = temperatura del punto más caliente.
A = cte basada en la temperatura establecida por 1 º/1 de vida.
B = velocidad del envejecimiento.

Para el caso de trafos con temperatura promedio de los arrollamientos de 65 ºC, tendremos:

$$\text{Vida } (^{o}/1) = 9{,}8\ E\text{-}18 \exp(15000 / (Th + 273)) \qquad (1)$$

A partir de (1) se puede obtener la expresión del **Factor de Envejecimiento Acelerado**:

$$\text{Fea } (^{o}/1) = \exp((15000 / 383) - (15000 / (Th + 273))) \qquad (2)$$

Para un ciclo de carga (dividido en N pasos de tiempo) determinado del trafo, se puede definir el **Factor de Envejecimiento Equivalente** de la aislación:

$$Feaeq = Sum_{n=1,N} (Fea_n\ \Delta t_n) / Sum_{n=1,N} (\Delta t_n)$$

n = número de paso de tiempo.
N = número total de pasos de tiempo.
Δt_n = paso de tiempo.
Fea_n = factor de envejecimiento acelerado para la temperatura en Δt_n.

Debido a que la pérdida de vida de la aislación es un buen indicador de la pérdida de vida del trafo, se calcula el denominado **Porcentaje de Pérdida Total de Vida (PV)**, para el cual previamente se requiere establecer la **Vida Normal de la Aislación** a la temperatura de referencia.

Por ejemplo, se puede adoptar una vida normal de 180000 hs (IEEE Std C57.91) para una temperatura máxima de 110 ºC, correspondiente al punto caliente.

Por lo tanto, se define:

PV(%) = Feaeq t 100 / Vida Normal de la Aislación

En donde "t" es el tiempo de operación en hs del trafo.

Considerando las expresiones previas, podemos determinar la pérdida de vida del aislamiento del trafo para una dada temperatura del punto más caliente.

Por ej., si operamos la máquina a una temperatura del punto más caliente de 120 ºC durante un período de tiempo continuo de 24 hs, tendríamos que la PV(%) será de **0,036 %**.

Desde otro punto de vista podemos establecer cuál debiera ser el tiempo de operación de una dada temperatura del punto más caliente, para obtener la misma pérdida de vida que la correspondiente a la temperatura de referencia.

Por ej., para una temperatura del punto más caliente de **120 ºC**, se deberá operar el trafo, en forma continua, solamente por **8,83 hs** para obtener la misma PV(%) que operando en forma continua a **110 ºC** durante **24 hs**, del punto más caliente.

Todo esto nos permite evaluar y diseñar el sistema de refrigeración más conveniente, adaptado al ciclo de carga del trafo.

Nova Miron S.A.
Ingeniería.