



VII/CE-A2-04

Utilización de modelos matemáticos en el control de sobrecarga/evaluación del envejecimiento de la aislación de transformadores de potencia inmersos en aceite

Aldo Antonio Brizuela

Entidad Binacional Yacyretá

Paraguay

RESUMEN

El trabajo se basó en la necesidad de sobrecargar un autotransformador trifásico de 250 MVA, 500/220 KV, que alimenta el sistema paraguayo desde Yacyretá. Adoptando las fórmulas utilizadas en la publicación 354 de la norma IEC, además de otras publicaciones mencionadas en la bibliografía, se obtienen a través de una planilla de cálculo los diferentes valores límites de temperaturas del arrollamiento y del aceite aislante, para las diversas condiciones de carga inicial y sobrecarga en función del tiempo y temperatura ambiente, haciendo posible evaluar de manera anticipada la posibilidad o no de atender determinadas contingencias de sobrecargas de emergencia. Simultáneamente se calcula la pérdida de vida relativa, lo cual podrá ser adicionado a los valores de desgaste diario en operación normal, para facilitar la planificación de la época más oportuna para sustituir o reacondicionar un determinado transformador. Esta metodología podría ser utilizada en sustitución de las voluminosas tablas que normalmente se incluyen en los manuales de los fabricantes, y los cuales no incluyen valores intermedios de duración de sobrecargas, como por ejemplo entre 8 y 12 horas o entre 12 y 24 horas.

PALABRAS CLAVES

Transformador, sobrecarga, temperatura, punto más caliente, envejecimiento, aislamiento, modelo matemático.

1 INTRODUCCION

Uno de los principales componentes de los sistemas de transmisión es el transformador de potencia, por lo que merece también una especial atención visando principalmente respetar las limitaciones operativas impuestas para los diferentes diseños y tipos de fabricación. Dentro de este contexto el factor temperatura de trabajo de los arrollamientos, directamente relacionado a la carga aplicada, a la temperatura ambiente y al tiempo que dure esta condición, son los que determinan los índices de utilización de la vida útil del transformador, por lo que deberá ser llevado en cuenta para acompañar el envejecimiento de la aislación sólida del mismo y planificar con mayor exactitud el momento oportuno para su repotenciación o sustitución.

La evaluación de los variados regímenes de carga o límites de sobrecarga en transformadores de potencia inmersos en aceite aislante, está en la recomendación de la Norma IEC 60354 y el objeto de este trabajo, es sencillamente, su aplicación práctica para un caso específico de un autotransformador trifásico de 250 MVA, 500/220 kV, instalado en la Central Hidroeléctrica de Yacyretá, haciendo uso de una planilla de cálculo EXCEL..

2 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL PUNTO MÁS CALIENTE DEL BOBINADO

A continuación se describen las dos páginas elaboradas en planilla de cálculo EXCEL utilizadas para evaluar las condiciones de temperatura, tanto del aceite como del bobinado, en diversas condiciones de carga previa y posterior sobrecarga de hasta 30 % sobre la nominal, para que sumados a la temperatura ambiente, ya sea la pronosticada o la que se tenga en el momento de la evaluación, se obtenga la temperatura que alcanzará el punto más caliente del bobinado. Con este valor se sabrá si en una determinada condición operativa del transformador en cuestión, existe o no la posibilidad de atender a determinadas sobrecargas de emergencia necesarias al sistema y permitirá también el cálculo del desgaste relativo de la vida útil de la aislación del mismo en aquella condición operativa. Todos los parámetros utilizados corresponden al autotransformador mencionado más arriba y se asume una configuración rectangular de ciclo de carga con un solo pico.

Se aclara que lo que aquí se muestra es solo descriptivo y para un caso particular de 100 % de carga inicial $K_i = 1$ (temperatura estabilizada) y 20 % ($K_p = 1,2$) de sobrecarga durante 8 horas, con temperatura ambiente de 38 ° C, lo cual lleva a una temperatura inadmisibile del punto más caliente del bobinado de 134,57 °C, que para nuestro caso está limitado a 130 °C, por lo que no podría ser atendida esta condición particular de sobrecarga. Para tener acceso a la planilla propiamente se deberá abrir el archivo disponible como adjunto en la copia digital de este trabajo para simular o evaluar otras condiciones.

Determinación de la temperatura del punto más caliente del bobinado de alta tensión del autotransformador ATLP2

Modelo térmico(matemático) aplicado:

$$\theta_b = \Delta\theta_a + \Delta\theta_b + \theta_{amb} \quad (1) \quad \rightarrow \quad 134,57$$

Donde:

θ_b - temperatura del punto más caliente del bobinado

$\Delta\theta_a$ - elevación de la temperatura del tope del aceite sobre la del ambiente

$\Delta\theta_b$ - elevación de temperatura del punto más caliente del bobinado sobre la del tope del aceite

θ_{amb} es la temperatura ambiente \rightarrow 38

Obs: todos los valores de temperatura son dados en grados Celsius

$$\Delta\theta_a = (\Delta\theta_{af} - \Delta\theta_{ai}) (1 - e^{-t/T_a}) + \Delta\theta_{ai} \quad (2) \quad \rightarrow \quad 45,03$$

Donde:

$\Delta\theta_{af}$ - elevación final de temperatura del tope del aceite sobre la del ambiente p/carga de pico S_p

$$\Delta\theta_{af} = \Delta\theta_{an} [(K_p^2 R + 1) / (R + 1)]^n \quad (3) \quad \rightarrow \quad 46,59$$

Donde:

$\Delta\theta_{an}$ - elevación final de temperatura del tope del aceite sobre la del ambiente para carga nominal \rightarrow 34,5

K_p es la relación entre la carga de pico S_p y la carga nominal $S_n \rightarrow$ 1,2

R - relación entre las pérdidas en carga con carga nominal y la pérdida en vacío \rightarrow 3,91

n - exponente utilizado en el cálculo de la elevación de temperatura del tope del aceite , que depende del tipo de refrigeración en funcionamiento \rightarrow 1

$\Delta\theta_{ai}$ - elevación inicial de temperatura del tope del aceite sobre la del ambiente para $t = 0$

$$\Delta\theta_{ai} = \Delta\theta_{an} [(K_i^2 R + 1) / (R + 1)]^n \quad (4) \quad \rightarrow \quad 34,5$$

Donde:

K_i es la relación entre la carga inicial S_i y la carga nominal $S_n \rightarrow$ 1

t = tiempo en horas \rightarrow 8

T_a es la constante de tiempo térmica del transformador para cualquier carga y para cualquier diferencia de temperatura entre la elevación final y la inicial del tope del aceite, siendo:

$$T_a = C(\Delta\theta_{af} - \Delta\theta_{ai}) / \Delta P \quad (5) \quad \rightarrow \quad 3,90$$

Siendo ΔP la variación de la pérdida total debida a la variación de carga

$$\Delta P = [(P_h + P_{cu} K_p^2) - (P_h + P_{cu} K_i^2)] \quad 190080$$

C es la capacidad térmica del transformador (watt-horas por grados Celsius) \rightarrow 61396

$C = 0,132$ (peso del núcleo y de las bobinas, en kg) +
 + 0,088 (peso del tanque y de los accesorios, en kg) +
 + 0,510 (litros de aceite)

$$\Delta\theta_b = (\Delta\theta_{bf} - \Delta\theta_{bi}) (1 - e^{-t/T_b}) + \Delta\theta_{bi} \quad (6) \quad 51,54$$

Donde:

$\Delta\theta_{bf}$ - elevación final del punto más caliente por sobre el tope del aceite para la carga de pico S_p

$$\Delta\theta_{bf} = \Delta\theta_{bn} (K_p^2)^m \quad (7) \quad \rightarrow \quad 51,54$$

m - exponente utilizado en el cálculo de la elevación de temperatura del punto más caliente y depende del tipo de refrigeración en funcionamiento \rightarrow 0,8

$\Delta\theta_{bn}$ - elevación final de temperatura del punto más caliente sobre la del tope del aceite para carga nominal \rightarrow 38,5

$\Delta\theta_{bi}$ es la elevación inicial del punto más caliente por sobre el tope del aceite para $t = 0$

$$\Delta\theta_{bi} = \Delta\theta_{bn}(K_i^2)^m \quad (8) \quad \rightarrow \quad 38,5$$

T_b es la constante de tiempo térmica del punto más caliente \rightarrow 0,08

Límite de temperatura admisible del medio refrigerante

$$\theta_{refr} = 130 - (\Delta\theta_a + \Delta\theta_b) \quad (9) \quad \rightarrow \quad 33,43$$

3 DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE VIDA ÚTIL

$$PV\% = 10^{-[B/(273+\theta_b)+A]} \times 100 \times \Delta t \quad (10) \quad \rightarrow \quad 0,15399536$$

Donde:

PV es la pérdida de vida porcentual en el intervalo de tiempo Δt

A y B son constantes de origen experimental para un determinado tipo de material aislante

Siendo:

$$A \rightarrow -13,391$$

$$B \rightarrow 6972,15 \quad \text{para transformadores de } 65 \text{ }^\circ\text{C de elevación promedio de temperatura del bobinado}$$

Determinación del desgaste diario relativo V

$$V = [e^{0,693(\Delta\theta_a + \Delta\theta_b + 28 - 98)/6} \times \Delta t + e^{0,693(\Delta\theta_a + \Delta\theta_b + 28 - 98)/6} \times (24 - \Delta t)] / 24 \quad (11)$$

$V \rightarrow 8,11599329$

4 CONCLUSIONES

Los cálculos o simulaciones que pueden realizarse con las planillas arriba descritas pueden facilitar la toma de decisión sobre la viabilidad de una determinada condición de sobrecarga, ya que ingresando en las mismas las condiciones requeridas de K_i , K_p y la duración de la sobrecarga, así como la temperatura ambiente, se tiene un resultado inmediato sobre si será o no excedido la temperatura máxima admitida para el punto más caliente del bobinado y el desgaste al cual estará sometido el transformador. Esto evidentemente también es posible hacerlo con la tabla que suministra el fabricante, pero con esta metodología se busca aprovechar los recursos disponibles en cualquier computadora y no tener que hojear páginas y más páginas para llegar al mismo resultado.

BIBLIOGRAFIA

[1]Coletânea de Normas de Transformadores de Potência, mm Editora, 1982, páginas 11 a 14.

[2]Norma IEC Publicación 354, Loading guide for oil-immersed power transformers.