

D.I: Sistemas de Protección de Transformadores

Curso: Introducción a los Sistemas de Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia
IIE - Facultad de Ingeniería - UDELAR

1. Introducción

Los transformadores de potencia son los equipos de mayor costo en las subestaciones de transformación, además de fundamentales en la salida de la potencia generada en las subestaciones de centrales de generación y vitales en todos los casos para el normal funcionamiento del sistema eléctrico de potencia.

Cuando ocurre una falta en un transformador, el daño es normalmente severo. El transformador debe ser transportado para ser reparado, lo cual toma un tiempo considerable. Operar un sistema de transmisión con un transformador fuera de servicio es siempre muy complicado. Frecuentemente, el impacto de una falta un transformador es más serio que la salida de servicio de una línea.

1.1. Tipos de fallas en un transformador:

Los devanados y el núcleo del transformador están sometidos a diferentes fuerzas durante la operación normal:

1. vibración
2. expansión y contracción debido al ciclo térmico
3. calentamiento debido al flujo magnético
4. fuerzas debido a corrientes de falta pasantes
5. calentamiento debido a sobrecarga o refrigeración inadecuada

Estas fuerzas pueden causar deterioro y falla de la aislación.

Las fallas en los transformadores de potencia pueden causar exigencias tanto internas como externas que hacen que la unidad no sea capaz de realizar su función, tanto desde el punto de vista eléctrico como mecánico.

Causas iniciales

Las causas iniciales que llevan a fallas en los transformadores se pueden agrupar:

falla en los devanados : Algunas de las razones que llevan a este tipo de falla son: deterioro de la aislación, defectos de fabricación, sobrecalentamiento, stress mecánico, vibraciones.

terminales y cambiador en vacío : Fallas debido al montaje incorrecto, daño durante el transporte, vibraciones excesivas o diseño inadecuado.

fallas en los bushings : Las causas para este tipo de falla incluyen vandalismo, contaminación y animales.

cambiador bajo carga : Estas fallas pueden ser debido a mal funcionamiento del mecanismo, problema de contacto, contaminación del medio aislante. Los cambiadores bajo carga generalmente se utilizan en las empresas eléctricas más que en el sector industrial.

Otras fallas : Entre otras causas de fallas se encuentran las fallas en la aislación, falla en los transformadores de corriente que están en el interior de los bushings.

1.2. Tipos de transformadores:

Hay dos tipos de transformadores de potencia que se utilizan tanto en la industria como en los sistemas de potencia:

- de aislación líquida
- de aislación seca

Los transformadores con aislación líquida están diseñados de manera que el núcleo y los devanados están contenidos en un tanque lleno de líquido, generalmente aceite. Este líquido sirve tanto para la aislación de los equipos y como medio para la disipación del calor. Los transformadores de aislación seca, generalmente, tienen el núcleo y los devanados rodeados por un gas, en algunos casos puede ser aire.

Todos los transformadores de potencia tienen sistemas para preservar la aislación. El detalle y estudio de los mismos está fuera del alcance de este curso.

1.3. Objetivo del sistema de protección de un transformador:

El sistema de protección para un transformador de potencia es una combinación de funciones de manera de:

- proteger el sistema de potencia de las fallas en el transformador.
- proteger el transformador debido a las perturbaciones que ocurren en el sistema de potencia.
- proteger al transformador de fallas incipientes dentro del mismo.

Las principales causas de defectos en la aislación, que pueden producirse son: *sobretensiones* de origen atmosférico y *calentamiento* inadmisibles de los devanados. Para las primeras, se protege al transformador mediante *descargadores* de sobretensiones ubicados en la proximidad de éste.

Los calentamientos excesivos se producen por sobrecargas permanentes o temporarias de frecuente repetición, por condiciones anormales de funcionamiento como pueden ser baja frecuencia y sobretensiones, y pueden conducir al envejecimiento prematuro de la aislación de los devanados, provocando finalmente cortocircuitos entre espiras y entre fases.

La mejor protección contra sobrecargas inadmisibles, es el *relé de imagen térmica* mientras que el *control de la temperatura de aceite*, previene contra fallas en la refrigeración. Los relés de sobrecorriente también proporcionan una protección térmica y los relés contra sobreexcitación protegen el transformador frente a corrientes excesivas de excitación.

Las fallas en el núcleo son raras, pero sumamente destructivas: cuando se perfora la aislación entre las chapas, se producen recalentamientos locales, por incremento de las pérdidas de histéresis y Foucault, y ello conduce a una intensificación de la destrucción de la aislación.

Las fallas internas más comunes son entre espiras. La probabilidad de daño, e incluso incendio, al producirse fallas internas, es elevada, por lo que se requiere aislar el transformador, en un tiempo muy corto, del resto del sistema.

Las fallas internas se pueden clasificar en dos grupos:

1. fallas que inmediatamente causan serios deterioros, como son los cortocircuitos en los devanados, y que generalmente se detectan por desbalances en corrientes o tensiones.
2. fallas incipientes, fallas que inicialmente no son serias pero que van desarrollando daños lentamente. No se detecta por desbalance de las

corrientes en los devanados.

Estas fallas incluyen:

- conexión eléctrica pobre entre conductores o fallas en el núcleo (debido a pérdida de aislación entre chapas del núcleo) que originan arcos y vaporización del aceite.
- falla en la refrigeración, que provoca elevación de la temperatura, aún con carga inferior a la nominal.

Además de métodos utilizando medidas eléctricas, hay dos métodos para detectar fallas internas:

1. acumulación de gases debido a la descomposición lenta de la aislación del transformador o del aceite.
2. aumento de la presión del aceite causada por fallas internas en el transformador.

El *Buchholz* es muy sensible a los efectos internos y el *relé diferencial* protege además contra cortocircuitos externos a la cuba.

Cuando ocurre una falta en un transformador, el daño es proporcional al tiempo de la falta. Por lo tanto, el transformador debe ser desconectado tan rápido como sea posible de la red. Debido a esto, se utilizan normalmente relés de protección rápidos y confiables. Se recomienda que el sistema de protección provoque el disparo instantáneo de todos los interruptores del transformador en caso de falta interna, y que también desconecte el transformador en caso de falta externa, a modo de respaldo.

Transformador: potencia > 5MVA

Un sistema de protección de un transformador de potencia superior a 5MVA está compuesto por al menos:

- Relé detector de gas (Relé Buchholz)
- Relé de imagen térmica
- Termómetro
- Protección diferencial contra faltas entre fases
- Protección contra sobreflujo
- Protección de sobrecorriente
- Protección contra faltas a tierra

Transformador: potencia < 5MVA

Un sistema de protección de un transformador de potencia menor a 5MVA está compuesto por al menos:

- Relé detector de gas (Relé Buchholz)
- Relé de imagen térmica
- Protección de sobrecorriente
- Protección contra faltas a tierra

2. Protecciones mecánicas:

La Figura 1 muestra la ubicación del relé Buchholz, el termómetro y el relé de imagen térmica.

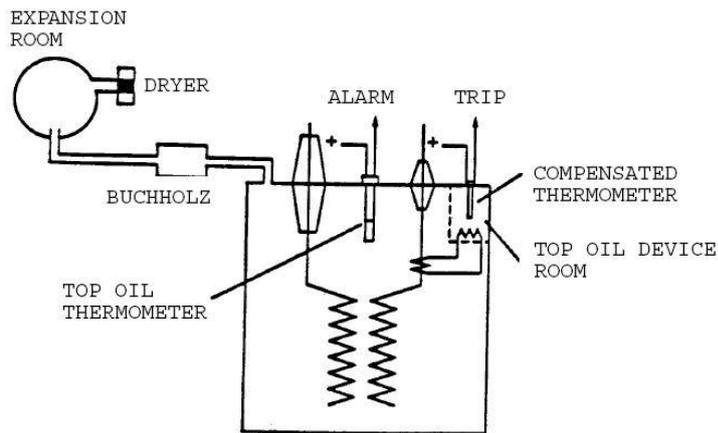


Figura 1: Ubicación de las protecciones internas

2.1. Relé Buchholz:**Relé Buchholz:**

Esquema simplificado de un relé Buchholz y su ubicación en un transformador:

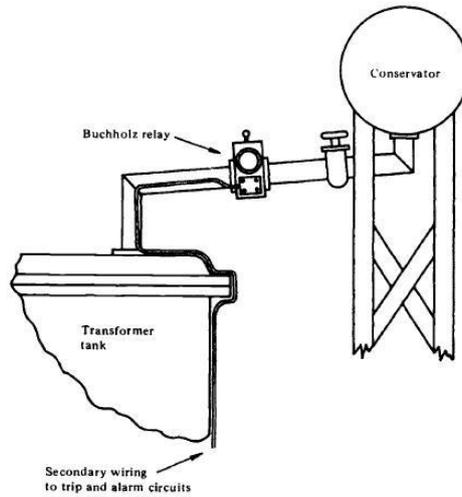


Figura 2: Relé Buchholz

Los relés que detectan gases pueden identificar la evolución de los gases dentro del aceite del transformador. El análisis de la composición del gas nos puede indicar la causa de la formación de esos gases; el arco eléctrico puede generar acetileno, las descargas parciales y la degradación del papel por causas térmicas puede generar otros gases.

En los transformadores con tanque de expansión, los defectos internos se detectan en forma simple y segura, por el relé Buchholz, que actúa ante la formación de gases, la pérdida de aceite o la acumulación de aire por lo que además vigila el nivel de aceite.

Defectos poco importantes (corrientes parásitas, uniones defectuosas, es decir defectos incipientes) producen gas en escala reducida, burbujas que se acumulan y hacen actuar el contacto de alarma. El calor producido localmente por estos defectos, descompone los materiales aislantes, sólidos y/o líquidos, generando gases.

Defectos graves, forman arcos de gran energía y producen gran cantidad de gas de descomposición del aceite, por la acción del calor y del propio arco eléctrico, proporcionan un flujo brusco de aceite desde el transformador y hacen actuar el contacto de disparo que lo aísla del sistema. Este contacto también puede ser accionado si el nivel de aceite desciende considerablemente.

La sensibilidad de este relé no debe ser muy alta, porque podrían surgir disparos incorrectos por vibración, o por movimiento del aceite expandido

por calentamiento causado por defectos externos.

En los transformadores con regulador en carga, éste también tiene su propio Buchholz, que da disparo en caso de defecto en el regulador: circuito abierto, contactos falsos, etc.

El relé Buchholz tiene un tiempo mínimo de operación de alrededor de 0.1s y un tiempo de operación promedio de 0.2s. Es un relé lento, pero detecta fallas incipientes y cortocircuitos entre espiras que involucran pocas espiras que no son detectadas por otro tipo de relé.

A continuación se explica el funcionamiento del relé Buchholz:

Acumulación de gas:

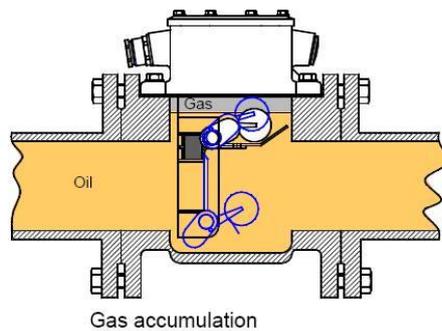


Figura 3: Acumulación de gas

El gas en el líquido se mueve hacia arriba, haciendo bajar el nivel de aceite. El flotador se mueve hacia abajo, cerrando el contacto de alarma. El flotador de abajo no es afectado.

Pérdida de aceite:

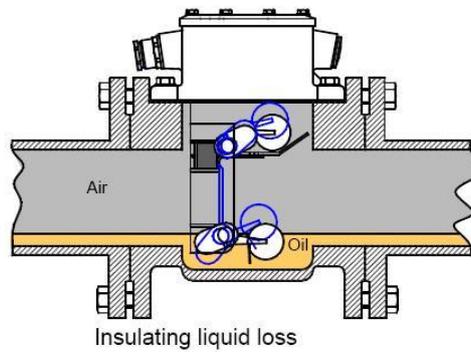


Figura 4: Pérdida de aceite

Como el líquido baja, el flotador superior hace actuar el contacto de alarma. Si el nivel continúa bajando, el flotador inferior hace actuar el contacto de disparo, que desconecta el transformador.

Flujo de aceite

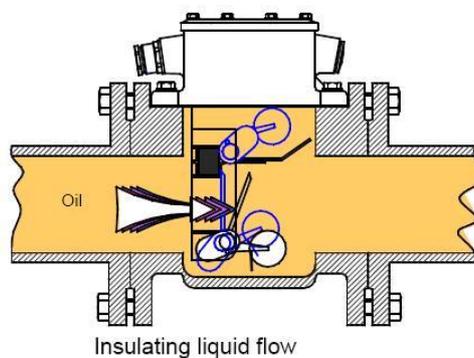


Figura 5: Pérdida de aceite

Cuando el flujo de aceite pasa a través del amortiguador (damper), dependiendo de la aceleración del mismo puede hacer actuar solo el contacto de alarma o también puede hacer actuar el contacto de disparo, desconectando el transformador.

2.2. Protección térmica

Los transformadores pueden sobrecalentarse debido a las siguientes razones:

- Temperatura ambiente altas
- Fallas en el sistema de enfriamiento
- Fallas externas no despejadas
- Sobrecarga
- Condiciones anormales del sistema como baja frecuencia, alta tensión, corriente de carga no sinusoidal.

Los resultados indeseables del sobrecalentamiento son:

- El sobrecalentamiento acorta la vida del aislamiento del transformador en proporción a la duración de la alta temperatura y en proporción al grado de la alta temperatura.
- La sobretemperatura severa puede causar una falla en la aislación.
- La sobretemperatura severa puede hacer que el refrigerante del transformador se caliente y se incendie.
- El sobrecalentamiento puede generar gases que pueden resultar en una falla eléctrica.

2.2.1. Imagen térmica:

La protección de imagen térmica busca determinar la temperatura de los devanados, en base a la medición de la corriente que circula a través de ellos.

La carga máxima admisible en un transformador, está determinada por la temperatura del punto más caliente del devanado, y su conocimiento permite la utilización de la capacidad térmica del transformador, o sea grandes sobrecargas durante cortos intervalos de tiempo, y pequeñas sobrecargas durante largos períodos.

Mientras que en el segundo caso, la temperatura del aceite refleja el estado del carga, en el primero no, debido a la gran diferencia entre las constantes de tiempo térmicas: constante térmica del cobre: unos pocos minutos; constante térmica del transformador: 1 a 4 horas.

Este relé toma la señal de corriente de los devanados, usando un transformador de corriente, y lo hace circular por una resistencia, que tiene la función de transmitir el calor producido por la corriente secundaria y que además

debe tener una constante térmica tan próxima como sea posible a la del transformador para poder reproducir el comportamiento térmico de los devanados de manera confiable.

Este tipo de relé considera tanto la temperatura del aceite como la producida por la circulación de corriente por el devanado. La resistencia conectada al transformador de corriente se encuentra inmerso en el aceite en la parte superior del tanque (donde la temperatura del aceite es mayor) conjuntamente con un sensor térmico.

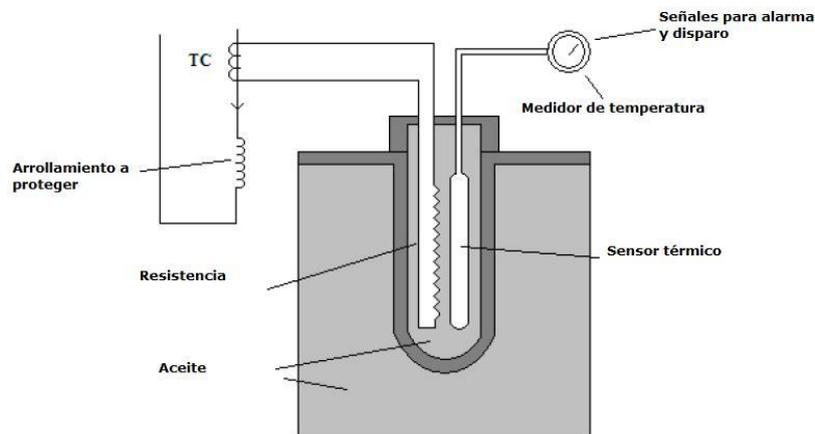


Figura 6: Imagen térmica

Funcionamiento:

Si llamamos:

Θ_e : temperatura del punto más caliente del devanado

$\Delta\Theta_h$: elevación de la temperatura del punto más caliente del aceite respecto a la temperatura ambiente

Θ_a : temperatura ambiente

$\Delta\Theta$: diferencia de temperatura del punto más caliente del devanado y del punto más caliente del aceite. Diferencia que llamaremos: diferencia de devanado.

tenemos: $\Theta_e = \Theta_a + \Delta\Theta_h + \Delta\Theta$

La temperatura del punto más caliente del devanado es igual a la máxima temperatura del aceite, más la diferencia de devanado, que depende de las

características térmicas del transformador, y las condiciones de carga. La temperatura del aceite sigue lentamente las variaciones de la carga, depende de las pérdidas totales en el transformador, y del sistema de enfriamiento del aceite.

La diferencia de devanado sigue rápidamente las variaciones de la carga además de las pérdidas en el cobre y del enfriamiento del arrolamiento en el aceite. La medida directa de la temperatura del cobre, se sustituye por un dispositivo que mide la máxima temperatura del aceite, sumándole la diferencia del devanado.

2.2.2. Termómetro:

Muchos transformadores están equipados con termómetros o medidores de temperatura a base de resistencias (RTD) sumergido en la parte superior del aceite. El monitor de temperatura para medir la temperatura del aceite se usa generalmente para dar una alarma y requiere que personal reduzca la carga por el transformador de manera de evitar alcanzar una condición donde deba disparar el transformador.

El termómetro da una medida directa de la máxima temperatura del aceite, y en régimen normal permite conocer la temperatura de los devanados.

Mediante contactos auxiliares, los termómetros pueden dar, a determinadas temperaturas, señales de alarma y/o señales de disparo.

3. Protección de transformador frente a sobrecorrientes:

La protección del transformador frente a faltas externas debe tomarse con mucho cuidado. Este tipo de falta puede causar daño por causas térmicas, daño mecánico debido a las corrientes que circulan por el transformador. Las curvas de soportabilidad de la corriente que circula a través del transformador muestra el tiempo que el transformador puede soportar corrientes de falta sin dañarse.

La protección de un transformador por medio de fusibles puede ser adecuada para transformadores pequeños, con valores de potencia menores a 1MVA. Pero los transformadores de potencia mayores requieren utilizar relés de sobrecorrientes y de interruptores, debido a que los fusibles no tienen capacidad para abrir frente a faltas.

3.1. Curva de soportabilidad del transformador:

La protección contra sobrecarga del transformador se puede proporcionar, además, con los relés de sobrecorriente.

Estos relés tiene la función de sobrecorriente temporizada que permite ajustarse en valores superiores a la sobrecarga normal y la característica de actuación debe coordinarse con los relés de sobrecorriente aguas abajo y aguas arriba. La función de sobrecorriente instantánea se ajusta, siempre que sea posible, dentro de los rangos de corriente permitido por el transformador, para la corriente de falta que puede soportar (through-fault current).

Los relés de sobrecorriente tienen su característica de operación definida.

Relay Characteristic	Equation (IEC 60255)
Standard Inverse (SI)	$t = TMS \times \frac{0.14}{I_r^{0.02} - 1}$
Very Inverse (VI)	$t = TMS \times \frac{13.5}{I_r - 1}$
Extremely Inverse (EI)	$t = TMS \times \frac{80}{I_r^2 - 1}$
Long time standby earth fault	$t = TMS \times \frac{120}{I_r - 1}$

Figura 7: Relés de sobrecorriente

Curva de soportabilidad:

La características de operación de las funciones de sobrecorriente se deben coordinar con las curvas de soportabilidad del transformador a las corrientes de cortocircuito.

La norma IEEE Std C57.109 describe estas curvas que tienen en cuenta tanto el daño por efecto mecánico como por efecto térmico que afecta a un transformador cuando está sometido a corrientes de falta.

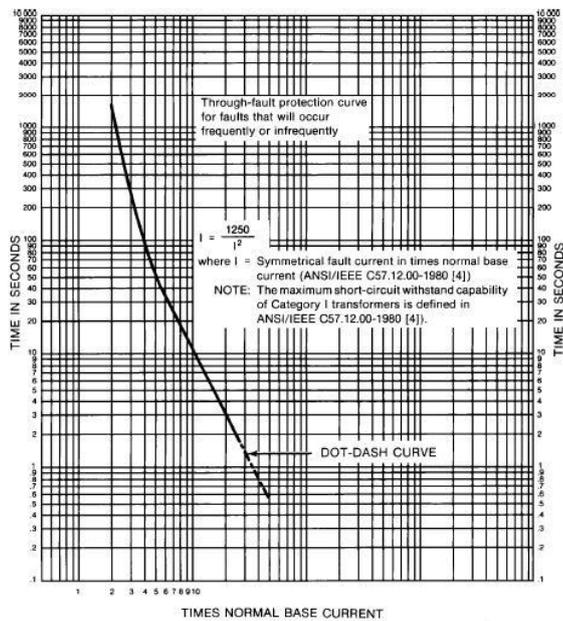
Las mismas están divididas en cuatro categorías de transformadores inmersos en aceite:

- Categoría I: 5-500kVA single-phase, 15-500kVA three-phase
- Categoría II: 501-1667kVA single-phase, 501-5000kVA three-phase
- Categoría III: 1668-10000kVA single-phase, 501-30000kVA three-phase

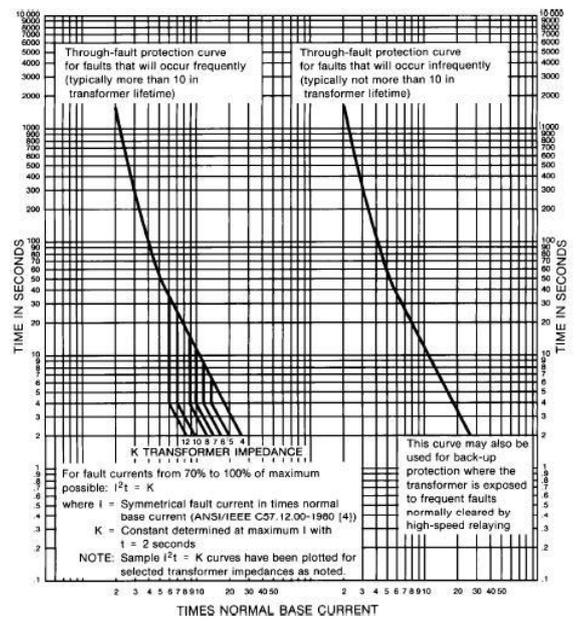
- Categoría IV: above 10000kVA single-phase, above 30000kVA three-phase

Curva de soportabilidad:

Para los transformadores de las categorías II y III, se necesitan 2 curvas. Dependiendo de la cantidad de faltas esperables en la vida útil del transformador, el daño por efecto mecánico es despreciable. En ambas curvas se tiene parte de la misma en una línea sólida y otra punteada. La curva con línea sólida representa la duración máxima de la corriente de falta por encima de la cual se produce un daño por efecto térmico. La curva con la línea punteada representa la duración máxima de la corriente de falta por encima de la cual hay daño por efecto mecánico acumulado. Los transformadores sometidos a faltas en forma frecuente, deben ser representados por la combinación de ambas curvas; mientras que los transformadores que no están sometidos a faltas en forma frecuente pueden ser representados por la curva que representa el efecto térmico.



—Through-fault protection curve for liquid-immersed Category I transformers (5–500 kVA single-phase, 15–500 kVA three-phase)



—Through-fault protection curves for liquid-immersed Category II transformers (501–1667 kVA single-phase, 501–5000 kVA three-phase)

Figura 8: Curva de soportabilidad del transformador

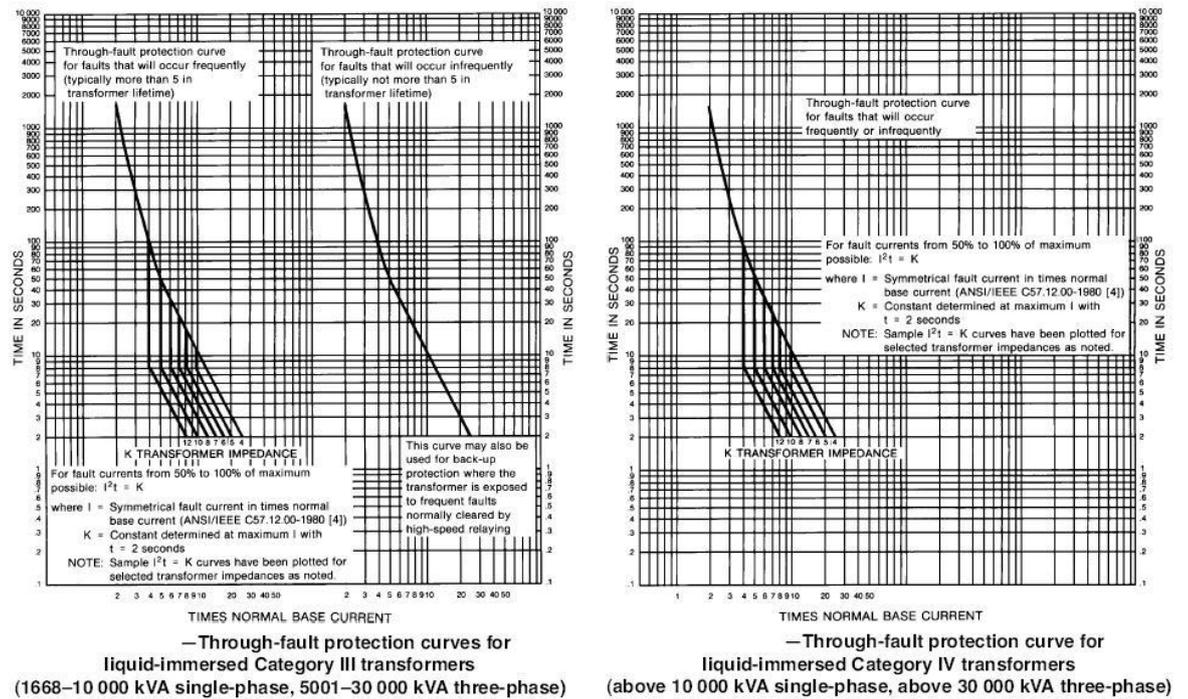


Figura 9: Curva de soportabilidad del transformador

3.2. Protección de sobrecorriente de fase:

Las protecciones de sobrecorriente se utilizan para proteger al transformador frente a faltas externas. En los transformadores pequeños, la protección de sobrecorriente se utilizan para proteger frente a faltas internas. En los transformadores grandes, la protección de sobrecorriente se utiliza como respaldo de la protección diferencial.

Cuando se utilizan las protecciones de sobrecorriente en los transformadores, su sensibilidad es limitada, dado que hay que ajustarlos en una corriente superior a la corriente de carga. Para las protecciones de tierra se deben utilizar transformadores instalados en el neutro del transformador con relaciones de transformación más bajas que las utilizadas en los de fase.

3.2.1. Protección de sobrecorriente de fase temporizada:

La protección de sobrecorriente temporizada, que se instala en el lado primario del transformador de potencia, proporciona protección para faltas en el interior del mismo y proporciona una función de respaldo para faltas en

el lado secundario y terciario del transformador.

Esta función proporciona una protección limitada para las faltas internas del transformador, porque no es posible que los ajustes sean sensibles y además operen en forma rápida.

Corriente de arranque:

El valor de la corriente de arranque debe ser superior a capacidad de sobrecarga del transformador, y además debe ser capaz de soportar la corriente de energización del mismo.

Además, debe coordinar con la protección de sobrecorriente instalada en el lado secundario y terciario del transformador.

Ajustes: Curva de operación:

La curva de operación debe coordinar con la protección de sobrecorriente instalada en el lado secundario y terciario del transformador. Sin embargo, los transformadores tienen limitada el tiempo que puede soportar una corriente de falta, ya sea por efecto térmico como mecánico.

Para obtener una protección apropiada para el transformador, la protección de sobrecorriente debe operar antes que el transformador se dañe por una falta externa.

Sobrecorriente del lado secundario y terciario

Cuando se instalan protecciones de sobrecorriente del lado secundario del transformador, estas funciones son la protección principal para faltas del lado secundario del mismo. Sin embargo, estas protecciones de sobrecorriente no proporcionan una protección para faltas internas.

3.2.2. Protección de sobrecorriente de fase instantánea:

La protección de sobrecorriente instantánea, instalada en el lado primario del transformador, proporciona protección rápida frente a faltas internas en el mismo. El valor de la corriente de operación se ajusta de manera de no operar para faltas en el lado secundario del transformador y no operar para la corriente de energización del transformador.

La corriente de operación de la protección de sobrecorriente instantánea se ajusta entre un 120 % - 175 % de la corriente de falta del lado secundario del transformador.

La función de sobrecorriente instantánea en el lado secundario y terciario no se habilita debido a que no se puede coordinar con las funciones instantáneas de las salidas.

4. Protección contra sobreflujo:

4.1. Efecto del sobreflujo:

El término de sobreflujo significa una densidad de flujo excesiva en el transformador, densidad de flujo por encima del codo (knee-point) de saturación. Cuando se produce una condición de sobreflujo, se puede producir saturación del núcleo del transformador y los campos magnéticos aumentan en intensidad. Dependiendo de la duración, el sobreflujo puede ocasionar un daño serio o simplemente deteriorar la aislación.

Causas que producen sobreflujo en un transformador:

- sobretensiones
- operar por debajo de su frecuencia nominal

El sobreflujo es motivo de mucha preocupación en los transformadores conectados a las unidades generadoras. Una de las principales causas del sobreflujo es el arranque o parada de la unidad generadora que en esos momentos trabaja a frecuencias bajas. También puede ocurrir sobreflujo cuando hay un rechazo total de carga.

4.2. Protección contra subflujo

La protección contra el sobreflujo (saturación) de un transformador de potencia debe impedir su calentamiento debido a una densidad de flujo demasiado elevada. Una mayor saturación provoca la existencia de una mayor corriente magnetizante, mayor pérdidas en el hierro y calentamiento adicional del circuito magnético.

El dispositivo de protección contra la saturación vigila el flujo magnético, midiendo la relación: $\frac{\text{tensión}}{\text{frecuencia}}$.

Si un relé de máxima tensión vigila el flujo magnético, sólo suministra una información equívoca pues un aumento simultáneo de la tensión y de la frecuencia no significa todavía que haya saturación. En la Figura 10 se muestra una curva con el tiempo admisible de sobreflujo en un transformador de potencia.

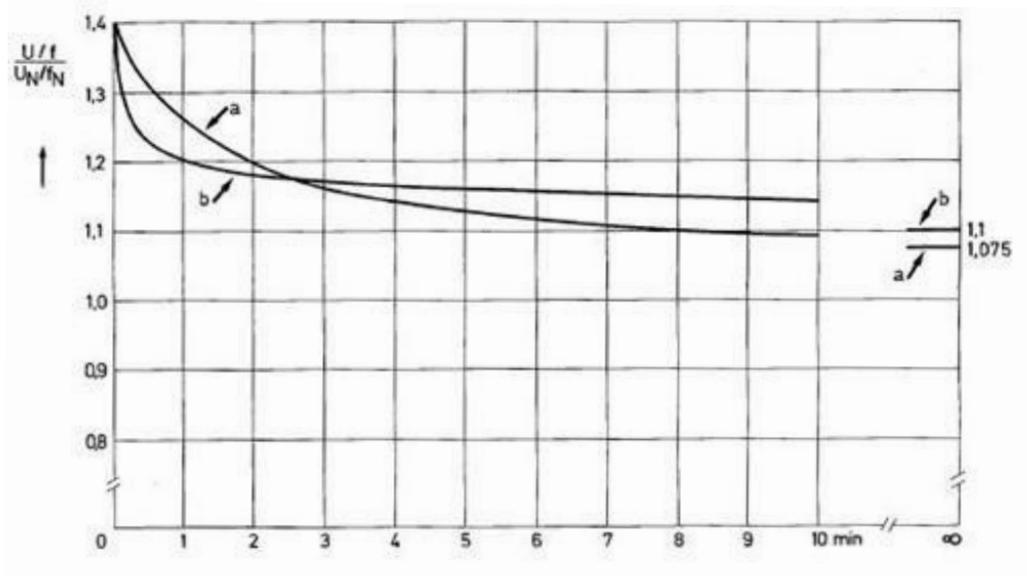


Figura 10: Curva de sobreflujo

La protección normal es un relé que mide V/f , con una característica operación de tiempo inversa. Una característica típica se puede ver en la Figura 11:

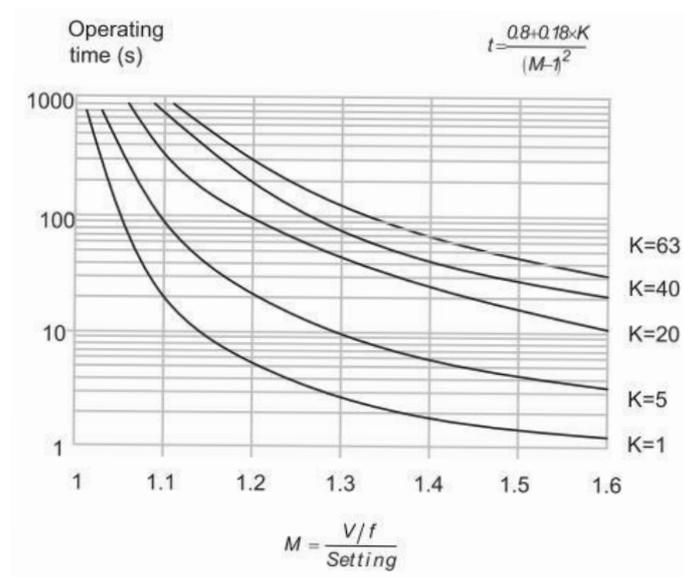


Figura 11: Característica de la protección de sobreflujo

La protección de sobreflujo se instala en el devanado en el cual se puede

medir la tensión del transformador; por lo cual esta función se implementa en el devanado donde no hay cambiador de puntos.

5. Anexo: Imagen térmica

Introducción

La carga máxima de un equipo está determinada por la temperatura del punto más caliente del mismo, y su conocimiento permite utilizar la totalidad de la capacidad térmica del transformador. El relé de imagen térmica busca determinar dicha temperatura.

El principio de funcionamiento se apoya en un modelo térmico del equipo protegido. El relé tiene un modelo que intenta describir el comportamiento térmico del punto más caliente del transformador.

Implementación

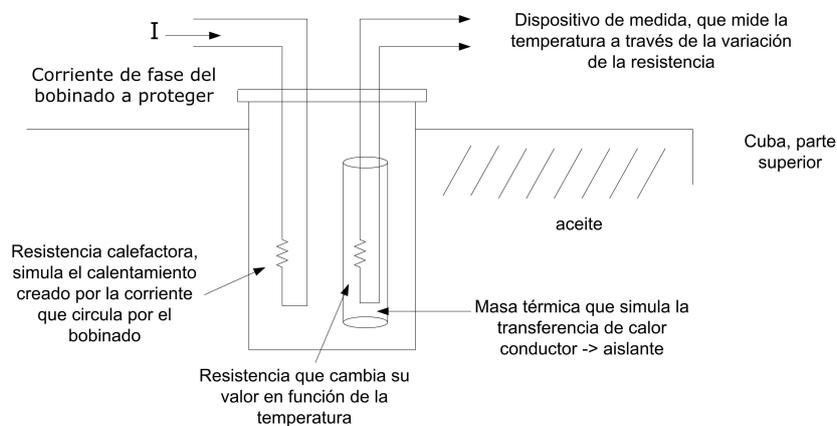


Figura 12: Imagen térmica

El dispositivo se ubica en la parte superior del transformador (punto más caliente del aceite) y es calefaccionado por la corriente del bobinado protegido.

Se tiene una réplica de la $\text{temperatura diferencia de devanado} + \text{temperatura máxima del aceite} \Rightarrow \text{temperatura máxima del bobinado}$.

Equivalente térmico que permite estudiar el fenómeno

Cuerpo homogéneo: elevación de la temperatura

Elevación de la temperatura en función del tiempo, de un cuerpo homogéneo, cuando la fuente de calor es constante.

Cuerpo homogéneo:

- conductividad térmica interna infinita
- calor específico constante en todo su cuerpo

Definiciones:

m : masa

A : superficie

c : calor específico

α : coeficiente de transferencia de calor

t : tiempo

Otras definiciones:

$\Theta = \Theta(t)$: temperatura en función del tiempo

Θ_a : temperatura ambiente (se supone constante)

$\Delta\Theta = \Theta(t) - \Theta_a$: elevación de la temperatura

P : potencia de la fuente

Ecuación diferencial del fenómeno:

$$\underbrace{mc \frac{d\Theta(t)}{dt}}_{\text{variación del calor almacenado}} + \underbrace{A\alpha(\Theta(t) - \Theta_a)}_{\text{calor transferido al medio ambiente}} = \underbrace{P}_{\text{fuente}} \quad (1)$$

$$\tau \triangleq \frac{mc}{A\alpha} \quad (2)$$

$$\Delta\Theta_{\infty} \triangleq \frac{\tau P}{mc} = \frac{P}{A\alpha} \quad (3)$$

Solución:

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta_{(0)} + (\Delta\Theta_{\infty} - \Delta\Theta_{(0)})(1 - e^{-t/\tau}) \quad (4)$$

Equivalente eléctrico que permite estudiar el fenómeno

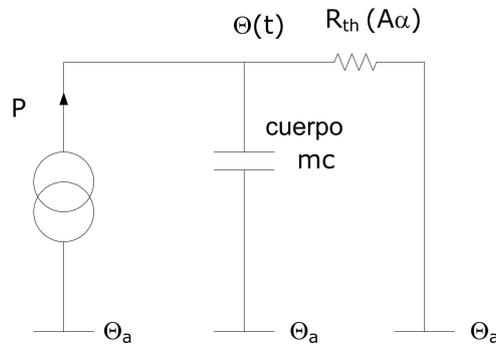


Figura 13: Equivalente eléctrico

Comportamiento térmico en régimen

El comportamiento térmico a una corriente ($I_i = cte$) de un transformador está dado por la siguiente ecuación:

$$P = k(\Delta\Theta)^{1/n} \quad (5)$$

donde:

P : potencia convertida en calor

$\Delta\Theta$: elevación de temperatura

n : constante que depende de la disipación del calor

k : constante de proporcionalidad

Comportamiento térmico transitorio

$$I_i \rightarrow I \Rightarrow \frac{I_i}{I} = \left(\frac{\Delta\Theta_i}{\Delta\Theta}\right)^{1/n} \quad (6)$$

Circuito equivalente:

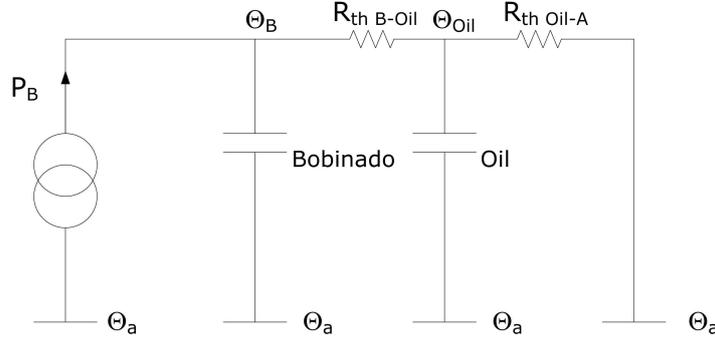


Figura 14: Comportamiento térmico

$$m_B c_B \frac{d\Delta\Theta_B}{dt} + A_B \alpha_B (\Delta\Theta_B - \Delta\Theta_{oil}) = P_B \quad (7)$$

$$m_{oil} c_{oil} \frac{d\Delta\Theta_{oil}}{dt} + A_{oil} \alpha_{oil} \Delta\Theta_{oil} = A_B \alpha_B (\Delta\Theta_B - \Delta\Theta_{oil}) \quad (8)$$

Simplificación válida:

$$\tau_B \rightarrow 0 \quad \Delta\Theta_B = \frac{P_B}{A_B \alpha_B} + \Delta\Theta_{oil} \quad (9)$$

$$\Delta\Theta_B - \Delta\Theta_{oil} = cte = \Delta\Theta_{BO\infty}$$

Solución:

$$\Delta\Theta_B = \Delta\Theta_{oil\infty} + \Delta\Theta_{BO\infty} + (\Delta\Theta_{oil}(0) - \Delta\Theta_{oil_{infy}}) e^{-t/\tau_{oil}} \quad (10)$$

$$\Delta\Theta_B(t) = \Delta\Theta_{BO\infty} + [\Delta\Theta_{oil}(0) + (\Delta\Theta_{oil\infty} - \Delta\Theta_{oil}(0))(1 - e^{-t/\tau_{oil}})] \quad (11)$$

$$\Delta\Theta_B(t) = \Delta\Theta_{BO\infty} + \Delta\Theta_{oil}(t) \quad (12)$$

Donde:

$\Delta\Theta_{BO\infty}$ diferencia de devanado

Este modelo térmico del transformador constituye el principio de funcionamiento del relé de imagen térmica.