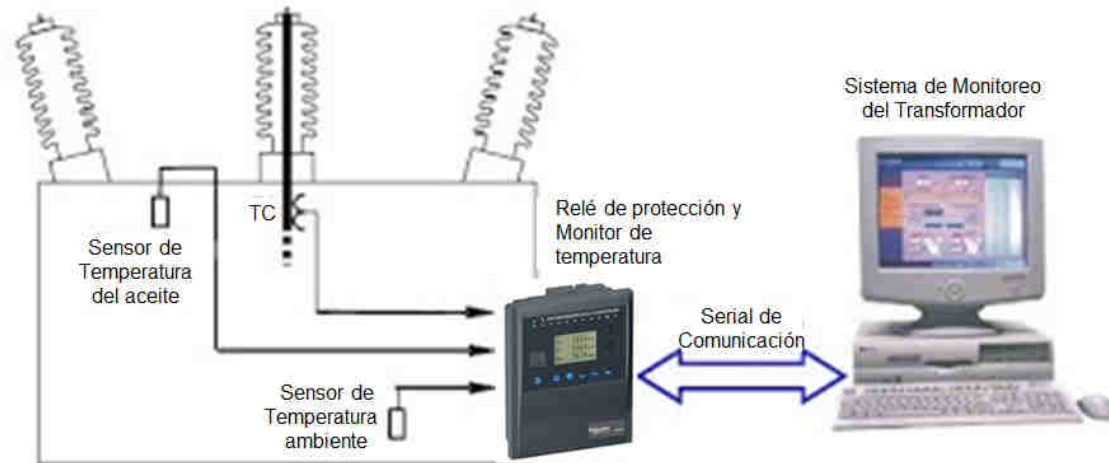


Protección de Imagen Térmica (ANSI 49)

Andrés Granero



Es utilizada para proteger las máquinas eléctricas contra sobrecargas (motores, alternadores, transformadores...)

Esta protección simula el calentamiento de la máquina a proteger por medio de la medida de corriente.

• Principio

La protección determina el calentamiento E de la máquina a partir de un modelo térmico definido por la ecuación diferencial siguiente:

$$\tau \frac{dE}{dt} + E = \left(\frac{I}{I_n} \right)^2$$

Con:

E : calentamiento

τ : constante de tiempo térmica de la máquina

I_n : corriente nominal

I : corriente eficaz

Demostraremos seguidamente el origen de esta ecuación y la solución de dos casos particulares de calentamiento de una máquina a partir de su estado frío y la sobrecarga a partir de su estado caliente.

Necesitaremos escribir la ecuación de equilibrio energético durante un tiempo dt (figura 1).

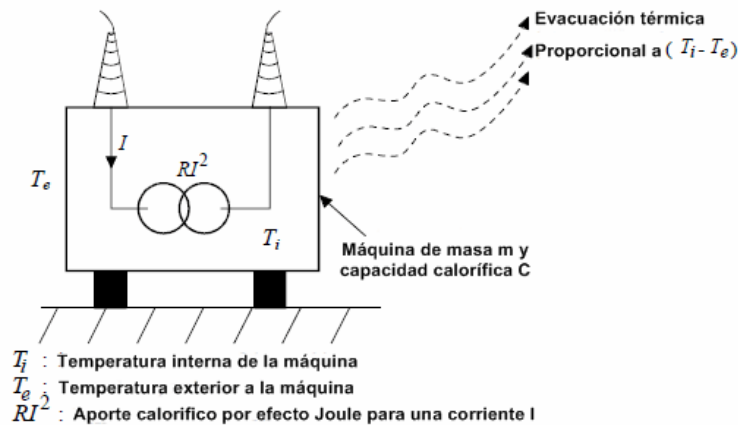


Figura 1: Equilibrio energético de un transformador

El aporte calorífico por efecto Joule $RI^2 dt$ es igual a la suma de:

- La evacuación térmica de la máquina por convección con el medio exterior
Esta evacuación es proporcional a la relación de temperatura entre el exterior y el interior de la máquina.
Sea $\theta = T_i - T_e$, la evacuación térmica valdrá $K\theta dt$
Con K : constante característica del intercambio térmico
- La cantidad de calor almacenado por la máquina por elevación de su temperatura, sea $mCd\theta$.
Con m : masa de la máquina
 C : capacidad calorífica media de la máquina.

Se tiene en la ecuación de equilibrio siguiente:

$$RI^2 dt = K\theta dt + mCd\theta$$

Dividiendo por dt , se obtiene la ecuación diferencial de primer orden siguiente:

$$mC \frac{d\theta}{dt} + K\theta = RI^2 \quad (1)$$

Seguidamente se demuestra como se determina el calentamiento de la máquina a partir de esta ecuación térmica, suponiendo que la corriente eficaz I es constante.

Definiremos el calentamiento E de la máquina tal que:

$$E = \frac{\theta}{\theta_n}$$

θ_n : diferencia entre la temperatura de la máquina y el medio exterior, cuando la máquina funciona a su corriente nominal después de un tiempo suficientemente largo para que se establezca su temperatura.

Por ejemplo si $E = 120 \%$, la máquina experimenta una sobrecarga del 20 % con relación a su funcionamiento nominal.

Según la ecuación (1), cuando $I = I_n$ y la temperatura es estable, se tiene $d\theta/dt = 0$

Luego:

$$\theta_n = \frac{R}{K} I_n^2$$

Se puede entonces reescribir (1) dividiendo por θ_n , obteniéndose:

$$mC \frac{dE}{dt} + KE = K \frac{I^2}{I_n^2}$$

O bien:

$$\frac{mC}{K} \cdot \frac{dE}{dt} + E = \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \quad (2)$$

La protección de imagen térmica tiene por objeto determinar el calentamiento E de la máquina a partir de esta ecuación.

● Calentamiento de una máquina a partir de un estado frío

Cuando la máquina está en estado frío, su calentamiento es $E = 0$ porque está a la misma temperatura que el exterior.

Suponiendo que la máquina se pone en carga con una corriente constante I_{ch} , determinaremos su calentamiento en función del tiempo.

La ecuación (2) se convierte:

$$\frac{mC}{K} \cdot \frac{dE}{dt} + E = \left(\frac{I_{ch}}{I_n} \right)^2$$

Resolviendo esta ecuación con la condición inicial $E = 0$, tenemos:

$$E = \left(\frac{I_{ch}}{I_n} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{K}{mC}t} \right)$$

Haciendo $\tau = \frac{mC}{K}$

Se tiene:

$$E = \left(\frac{I_{ch}}{I_n} \right)^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

τ : representa la constante de tiempo térmica de la máquina

El calentamiento E evoluciona según la curva de la figura 2.

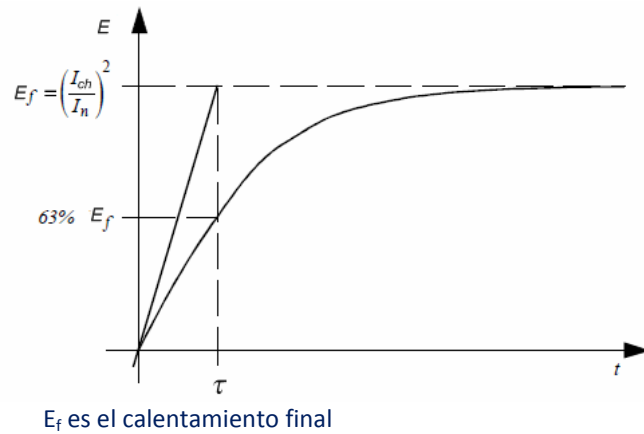


Figura 2: Puesta en carga de una máquina a partir de su estado frío

Después de un tiempo τ correspondiente a la constante de tiempo, el calentamiento de la máquina ha alcanzado el 63% de su valor final.

La constante de tiempo térmica de la máquina la especifica el fabricante o es estimada o medida por el usuario.

La protección de imagen térmica determina la evolución del calentamiento por medio del conocimiento de la constante de tiempo τ y de la corriente de carga.

Si se fija un nivel de regulación E_s , se puede calcular el tiempo de actuación t_a de la protección:

$$E_s = \left(\frac{I_{ch}}{I_n} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{t_a}{\tau}} \right)$$

$$e^{-\frac{t_a}{\tau}} = 1 - E_s \left(\frac{I_n}{I_{ch}} \right)^2$$

$$t_a = \tau L_n \left(\frac{1}{1 - E_s \left(\frac{I_n}{I_{ch}} \right)^2} \right)$$

L_n = Logaritmo neperiano

Observaciones:

- La protección de imagen térmica no puede utilizarse para los arranques muy largos de motores.

En efecto, la corriente de arranque de un motor es muy elevada, su calentamiento es aproximadamente proporcional al cuadrado de la corriente, y es muy rápido.

Durante el arranque, el aporte calórico no está totalmente extendido en el motor, el calentamiento local a nivel de los arrollamientos y aislantes puede ser excesivo.

La protección de imagen térmica considera una capacidad calorífica global del motor y una difusión calorífica instantánea, no teniendo en cuenta los calentamientos locales.

La protección de imagen térmica determina el calentamiento provocado por el arranque, pero no puede proteger un motor contra los arranques muy largos o el bloqueo de rotor. Para ello existen protecciones específicas como las indicadas en el post: "Protección contra arranques demasiado largos y el bloqueo de rotor (ANSI 51 LR/48)" disponible en el siguiente link:

<http://imseingenieria.blogspot.com.es/2017/05/proteccion-contrarranques-demasiado.html>

La protección de imagen térmica es particularmente eficaz en las sobrecargas lentas.

Ejemplo:

Sea un transformador con una constante de tiempo térmica $\tau = 45$ min.

A partir de un estado frío, el transformador se pone en carga con una corriente I_{ch} del 30 % superior a la corriente nominal I_n $I_{ch}/I_n = 1,3$.

Se autoriza un calentamiento del transformador $E_s = 115$ %

Calculamos el tiempo en que se activa la protección:

$$t_a = 45L_n \left(\frac{1}{1 - \frac{1,15}{1,3^2}} \right)$$
$$t_a = 51 \text{ min.}$$

● Sobrecarga de una máquina a partir de un estado caliente

Se supone que la máquina protegida funciona a su corriente nominal I_n después de un tiempo suficientemente largo para que la temperatura sea estable.

Por definición, en el estado inicial de calentamiento $E = 100$ %

La máquina sufre una sobrecarga de corriente I_s constante, determinaremos su calentamiento en función del tiempo.

La ecuación diferencial (2) se convierte en:

$$\frac{mC}{K} \frac{dE}{dt} + E = \left(\frac{I_s}{I_n} \right)^2$$

Resolviendo esta ecuación con $E = 1$ como condición inicial, se tiene:

$$E = \left(\frac{I_s}{I_n} \right)^2 - \left[\left(\frac{I_s}{I_n} \right)^2 - 1 \right] e^{-\frac{K}{mC}t}$$

Haciendo: $\tau = \frac{mC}{K}$

Se tiene:

$$E = \left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 - \left[\left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 - 1\right] e^{-\frac{t}{\tau}}$$

τ : representa la constante de tiempo térmica de la máquina

El calentamiento E evoluciona siguiendo la curva de la figura 3.

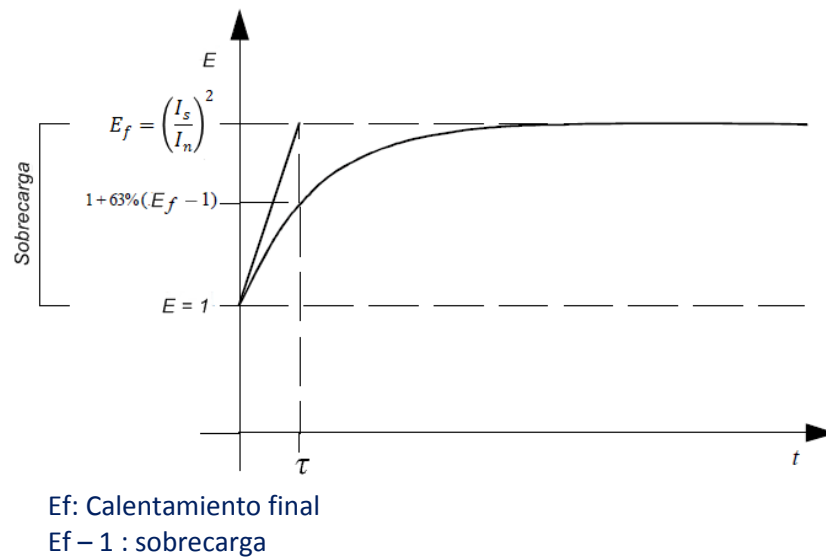


Figura 3: Evolución del calentamiento E después de una sobrecarga de la máquina

Después de un tiempo τ correspondiente a la constante de tiempo, la máquina alcanza el 63 % de la sobrecarga final, es decir el calentamiento de la máquina si esta sufriera esta sobrecarga durante un tiempo infinito (suficientemente largo para que su temperatura se estabilice).

La constante de tiempo térmica de la máquina viene dada por el fabricante o, estimada o medida por el usuario.

La protección de imagen térmica determina la evolución del calentamiento a partir del conocimiento de la constante de tiempo τ y de la corriente de sobrecarga I_s .

Si se fija un nivel de regulación E_s , se puede calcular el tiempo de actuación t_a de la protección:

$$E = \left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 - \left[\left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 - 1\right] e^{-\frac{t_a}{\tau}}$$

$$e^{-\frac{t_a}{\tau}} = \frac{\left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 - E_s}{\left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 - 1}$$

$$t_a = \tau \operatorname{Ln} \left[\frac{\left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 - 1}{\left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 - E_s} \right]$$

Ln : logaritmo neperiano

Ejemplo 1:

Sea un transformador con una constante de tiempo térmica $\tau = 45 \text{ min.}$

A partir de un estado caliente inicial $E = 100 \%$, experimenta una sobrecarga de corriente constante I_s , del 30 % superior a su corriente nominal,

$$\frac{I_s}{I_n} = 1,3$$

Se autoriza un calentamiento del transformador $E_s = 115 \%$

El tiempo de actuación de la protección será:

$$t_a = 45 \operatorname{Ln} \left[\frac{1,3^2 - 1}{1,3^2 - 1,15} \right]$$

$$t_a = 11 \text{ min.}$$

Ejemplo 2:

Sea un transformador con una constante térmica $\tau = 35 \text{ min.}$

Se autoriza un calentamiento del transformador $E_s = 120 \%$

¿Qué sobrecarga puede admitir durante 15 minutos sin que la protección actúe?

Para $t_a = 15 \text{ min.}$ se tiene:

$$1,2 = \left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 - \left[\left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 - 1\right] e^{-\frac{15}{35}}$$

$$\left(\frac{I_s}{I_n}\right)^2 = \frac{e^{-\frac{15}{35}} - 1,2}{e^{-\frac{15}{35}} - 1}$$

$$\frac{I_s}{I_n} = 1,25$$

El transformador podrá admitir una sobrecarga máxima del 25 % durante 15 minutos, sin que la protección actúe.

FUENTE:

Schneider Electric: Guide des protections des réseaux industriels (Christophe Prévé)