



## **EXPERIENCIA EN EL AJUSTE DE UN RELÉ DIGITAL MULTIFUNCIÓN PARA PROTECCIÓN DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN**

**J. Z. Vernieri \***

**M. B. Barbieri \***

**M. C. Beroqui \***

**P. L. Arnera \***

**\* IITREE-FI-UNLP (Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos-Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional de La Plata)**

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se describen los pasos empleados durante el ajuste de un relé digital multifunción para un motor de inducción de aplicación en la industria petroquímica, de manera de compatibilizar el ajuste de la protección con las especificaciones y limitaciones del motor. Sólo se incluye el módulo de sobrecarga por la complejidad que presenta. La falta de información incluida en el manual técnico de la protección hace necesario, para su correcto ajuste, una interpretación del modelo dinámico de calentamiento implícitamente asumido por la protección. Se presentan los datos disponibles del motor bajo estudio, utilizados para ajustar los parámetros del relé.

### **PALABRAS-CLAVE**

Protección de motores de inducción, microprocesador, arranques, calentamiento.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El objetivo del presente trabajo es brindar la experiencia adquirida durante el ajuste de una protección digital para un motor de inducción de 810 kW y 6,6 kV de tensión nominal. La protección analizada [1] es un relé versátil multifunción basado en un microprocesador y diseñado principalmente para proteger motores en un amplio rango de aplicaciones.

### **1.1 Características de la protección**

La protección integral del motor bajo análisis tiene disponibles una gran cantidad de funciones de protección [1]. En particular el módulo de sobrecarga térmica requiere de un profundo análisis e interpretación de sus parámetros de ajuste para de esta manera lograr un ajuste óptimo que permita un apropiado uso del motor.

### **1.2 Datos del Motor**



El motor es una máquina de inducción trifásica, rotor tipo jaula ardilla. Los datos del motor fueron entregados por el proveedor, volcándose a continuación aquellos necesarios para realizar el ajuste de la protección:

- Potencia : 810 kW
- Tensión nominal: 6600 V
- Corriente nominal ( $I_n$ ) : 98,66 A
- Método de arranque: directo
- Corriente de arranque a 100%  $U_n$  : 6  $I_n$  (592 A)
- Tiempo de arranque a 100%  $U_n$ : 4,5 seg
- Corriente de arranque a 80%  $U_n$  : 4,5  $I_n$  (444 A)
- Tiempo de arranque a 80%  $U_n$  : 9,8 seg
- Constante de tiempo de calentamiento: 177 minutos
- Constante de tiempo de enfriamiento: 888 minutos
- Temperatura ambiente considerada 40°C
- Aislación clase F
- EX-E Motor, ZONE1, GROUP IIC, T3 (200°C), tiempo  $T_e=8$  seg.
- Curvas de límite térmico se indican en la Fig. 1. De las curvas del límite térmico se obtiene que el comportamiento a rotor bloqueado se corresponde a curvas del tipo  $I^2t = \text{constante}$ , donde I es la corriente del motor
  - o Para rotor bloqueado en frío  $I^2t = 551$ .
  - o Para rotor bloqueado en caliente  $I^2t = 288$ .
- La curva de sobrecarga es única y los valores extraídos se indican en la Tabla I.
- El motor es apto para tres (3) tentativas consecutivas de arranques en frío y un arranque adicional después de estar 20 minutos en marcha o bien después de 45 minutos parado, habiendo llegado anteriormente a su temperatura nominal.

TABLA I  
CURVA DE SOBRECARGA

I [pu.]	t[s]
1,25	1000,0
1,50	450,0
1,70	300,0
2,00	200,0
2,70	100,0

### 1.3 Datos de los Transformadores de Corriente

Los transformadores de corriente de fase (TI) utilizados para alimentar la unidad de protección tienen la siguiente relación de transformación: 100 A /5 A.

## 2. AJUSTE DEL MÓDULO DE SOBRECARGA

### 2.1 Descripción del módulo de sobrecarga



Este módulo detecta sobrecargas de corta y larga duración. El manual técnico de la protección [1], no explicita el modelo que usa para representar al comportamiento térmico del motor, sin embargo es posible deducir que se basa en un modelo de primer orden, con una sola constante de tiempo.

Resulta importante poder comprender, a través de dicho modelo, la ecuación del tiempo de operación aplicada por la protección, para de esta manera interpretar los diferentes parámetros que en ella aparecen. Estos parámetros se ajustarán tomando en consideración las curvas de límite térmico provistas por el fabricante (curvas límites a rotor bloqueado en frío, a rotor bloqueado en caliente, curvas de sobrecarga), de manera tal de que el ajuste de la protección sea apropiado para los diferentes modos de funcionamiento, sea en sobrecarga, como en el arranque, o ante sucesivos arranques.

A continuación se deducirá la ecuación del tiempo de operación de la protección, suponiendo que la misma se basa en el comportamiento térmico del motor, asumido como un modelo de primer orden.

El incremento de temperatura en el motor a rotor bloqueado, según el modelo considerado de primer orden, sigue una curva exponencial cuya asíntota depende del caudal térmico o potencia, siendo la potencia proporcional al cuadrado de la corriente. Ante un aumento en forma de escalón en la corriente, desde corriente nula, la dinámica de calentamiento del motor sigue la curva exponencial:

$$\Delta T = kI^2(1 - \exp(-t / \tau)) \quad (1)$$

Donde  $\Delta T$  es el incremento de temperatura respecto de la temperatura ambiente;  $k$  es una constante que tiene en cuenta la resistencia óhmica del arrollamiento así como su coeficiente de transferencia de calor con el medio refrigerante;  $I$  es la corriente del motor,  $t$  es el tiempo y  $\tau$  es la constante de tiempo que tiene en cuenta tanto la capacidad calorífica de las masas como el coeficiente de transferencia de calor con el medio refrigerante.

La protección define una corriente de plena carga del motor, FLC. Para una temperatura ambiente de 40°C, se le asigna a FLC el valor de la corriente nominal del motor ( $FLC = I_n$ ). Según el manual de la protección bajo análisis, un incremento de la corriente desde un valor nulo hasta el 105% de FLC, a una temperatura ambiente de 40°C, finalmente causará el disparo de la misma. Es decir, partiendo del motor sin carga, para una temperatura ambiente de 40°C, aplicando una corriente un 5% superior a FLC, en estado estacionario ( $t \rightarrow \infty$ ) se alcanzará la máxima temperatura admisible. De esta manera se puede obtener el máximo incremento de temperatura por sobre la temperatura ambiente de 40°C,  $\Delta T_{\max}$  que admite esta protección:

$$\Delta T_{\max} = k(1.05 FLC)^2 \quad (2)$$

Una vez determinado el  $\Delta T_{\max}$  se puede obtener la curva equivalente de tiempo-corriente de la protección, despejando  $t$  de (1) para un incremento de temperatura igual al máximo. Es decir se puede obtener para cada valor de corriente cuál es el tiempo en que el motor tarda en alcanzar la máxima temperatura admisible cuando la temperatura ambiente es 40°C y partiendo del motor en frío. A este tiempo se lo llama tiempo de operación ( $t_{op}$ ), para el cual a la corriente de sobrecarga  $I$  ( $I > FLC$ ) se alcanza la máxima temperatura admisible cuando la temperatura ambiente es 40°C:

$$\Delta T_{\max} = kI^2(1 - \exp(-t_{op} / \tau)) \quad (3)$$

De donde se obtendrá el tiempo de operación ( $t_{op}$ ), para el motor en frío, en que se alcanza el máximo incremento de temperatura  $\Delta T_{\max}$ :

$$t_{op} = \tau \ln \left( \frac{I_{pu}^2}{I_{pu}^2 - (1.05)^2} \right) \quad (4)$$

Donde la corriente se expresa en por unidad de FLC. La ecuación (4) expresa el tiempo de operación de la protección, en función de la corriente en por unidad, considerando que se ha alcanzado la máxima temperatura, y suponiendo una temperatura ambiente igual a 40°C y el motor previamente sin carga.

Uno de los parámetros a ajustar en la protección es el definido como  $t_{6x}$ , el cual determina el tiempo de operación para una corriente de carga de 6 veces la corriente de plena carga (6xFLC), sin carga previa. Reemplazando en (4) resulta:

$$t_{6x} = \tau \ln \left( \frac{6^2}{6^2 - 1.05^2} \right) = \frac{\tau}{32.15} \quad (5)$$

Extrayendo  $\tau$  de (5) y reemplazándolo en (4) obtenemos:

$$t_{op}(I_{pu}) = 32.15 t_{6x} \ln \left( \frac{I_{pu}^2}{I_{pu}^2 - (1.05)^2} \right) \quad (6)$$

La ecuación (6) da la **curva de tiempo-corriente de operación en frío**, es decir suponiendo al motor sin carga previa, con la que actuaría la protección para proveer protección térmica ante sobrecargas (válido para  $I_{pu} > 1.05$ ).

Sin embargo en el manual técnico de la protección [1], aparece esta otra expresión:

$$t_{op} = 32.15 t_{6x} \ln \left( \frac{\left( \frac{I}{FLC_{int}} \right)^2 - \frac{p}{100} \left( \frac{I_{prior}}{FLC_{int}} \right)^2}{\left( \frac{I}{FLC_{int}} \right)^2 - 1.05^2} \right) \quad (7)$$

Evidentemente esta expresión tiene en cuenta, a través del segundo término del numerador del argumento del logaritmo, el estado de carga previo del motor, asumiendo que el mismo tendrá una temperatura superior a la temperatura ambiente. A continuación interpretaremos la expresión (7).

Por una parte cuando el motor está en régimen de carga, la temperatura del motor será superior a la temperatura ambiente. Por otra parte cuando el motor está operando con carga el valor de temperatura de estado estacionario es algo menor que el que se obtendría con (1) ya que (1) no tiene en cuenta el efecto de la ventilación que existe cuando el motor está en marcha. Una forma de tener en cuenta este efecto es utilizando la misma expresión (1) pero afectando a la constante  $k$  con un factor  $p$ , variable de 0 al 100%. El factor  $p$ , es uno de los parámetros a ajustar de la protección. El incremento de temperatura alcanzado por el motor en régimen, es decir para tiempo infinito, resultará entonces:

$$\Delta T_r = \frac{pk}{100} I_{prior}^2 \quad (8)$$



De esta manera, si estando el motor con carga ( $I_{\text{prior}}$ ), se produce un incremento de la corriente en forma de escalón desde el valor  $I_{\text{prior}}$  hasta un valor  $I$ , la evolución de la temperatura responderá a la siguiente ecuación:

$$\Delta T = kI^2 (1 - \exp(-t/\tau)) + \frac{pk}{100} I_{\text{prior}}^2 \exp(-t/\tau) \quad (9)$$

El primer término de (9) representa la evolución de la temperatura debido a la circulación de una corriente  $I$ , mientras que el segundo término representa la disminución de la temperatura previamente alcanzada en régimen con  $I_{\text{prior}}$ . Suponiendo que el máximo incremento de temperatura admisible se alcanza en un tiempo  $t_{\text{op}}$ :

$$\Delta T_{\text{max}} = kI^2 - (kI^2 - \frac{pk}{100} I_{\text{prior}}^2) \exp(-t_{\text{op}}/\tau) \quad (10)$$

Despejando  $t_{\text{op}}$  y reemplazando  $\Delta T_{\text{max}}$  de (2) y  $\tau$  de (5), se obtiene:

$$t_{\text{op}} = 32.15 t_{6x} \ln \left( \frac{\left( \frac{I}{FLC} \right)^2 - \frac{p}{100} \left( \frac{I_{\text{prior}}}{FLC} \right)^2}{\left( \frac{I}{FLC} \right)^2 - 1.05^2} \right) \quad (11)$$

El factor de peso  $p$  determina la incidencia de la corriente previa ( $I_{\text{prior}}$ ) de manera tal que debería elegirse el valor apropiado para que la curva de tiempo de operación en caliente se ajuste adecuadamente a la curva límite térmico en caliente dada por el fabricante.

A su vez, para tener en cuenta una temperatura ambiente ( $T_a$ ) diferente a  $40^\circ\text{C}$ , en lugar del valor de corriente de plena carga FLC la protección utiliza un valor interno FLCint el cual depende de la temperatura ambiente de acuerdo a:

$T_a < 20^\circ\text{C}$	$FLC_{\text{int}} = FLC * 1,09$
$20^\circ\text{C} < T_a < 40^\circ\text{C}$	$FLC_{\text{int}} = FLC(1,18 - T_a * 0,09/20)$
$T_a = 40^\circ\text{C}$	$FLC_{\text{int}} = FLC$
$40^\circ\text{C} < T_a < 65^\circ\text{C}$	$FLC_{\text{int}} = FLC(1 - (T_a - 40)/100)$
$T_a > 65^\circ\text{C}$	$FLC_{\text{int}} = FLC * 0,75$

Por lo tanto el tiempo de operación ( $t_{\text{op}}$ ) en caliente, para una corriente de sobrecarga  $I$  ( $I > FLC_{\text{int}}$ ) será:

$$t_{\text{op}} = 32.15 t_{6x} \ln \left( \frac{\left( \frac{I}{FLC_{\text{int}}} \right)^2 - \frac{p}{100} \left( \frac{I_{\text{prior}}}{FLC_{\text{int}}} \right)^2}{\left( \frac{I}{FLC_{\text{int}}} \right)^2 - 1.05^2} \right) \quad (12)$$

La expresión (12) así deducida coincide con la ecuación planteada por la protección da la **curva de tiempo-corriente de operación en caliente**.

El funcionamiento de este módulo de sobrecarga puede resumirse así: cuando una o varias corrientes de fase exceden el valor interno FLC<sub>int</sub> por más del 5 %, la protección comenzará a evaluar el estado térmico del motor. Determinará un tiempo de operación  $t_{op}$ , según (12), utilizando el valor de FLC<sub>int</sub>, el valor ajustado para el parámetro  $t_{6x}$ , el valor ajustado para el parámetro p, y para el valor leído de carga previa del motor ( $I_{prior}$ ).

## 2.2 Ajuste de los parámetros del módulo de sobrecarga

En la Fig. 1 se muestran las curvas del límite térmico a rotor bloqueado del motor, correspondiente al  $I^2t$ , en frío y en caliente y la curva de sobrecarga permitida del motor, según la información entregada por el fabricante. Estas curvas son usadas para ajustar los parámetros de este módulo.

### 2.2.1 Cálculos para el ajuste de $t_{6x}$ y p

Si bien la protección permite obtener el valor de la temperatura ambiente a través de sensores de temperatura (RTD), al no haber sido instalados los mismos, se consideró un valor fijo,  $T_a = 40^\circ\text{C}$ , por lo tanto  $\text{FLC}_{int} = \text{FLC}$ .

Según la protección bajo análisis el parámetro  $t_{6x}$  es, por definición, el tiempo de operación para una corriente de carga de 6 veces la corriente de plena carga ( $6 \times \text{FLC}$ ), sin carga previa. Del relevamiento de la curva de límite térmico a rotor bloqueado en frío del motor a proteger (Fig. 1), se obtiene para  $I = 6 \text{ pu}$ , un valor de 15.3 s. Para tener un margen entre la curva de operación de la protección y la curva de límite térmico del motor, se propone ajustar el parámetro  $t_{6x}$  en 14 s.

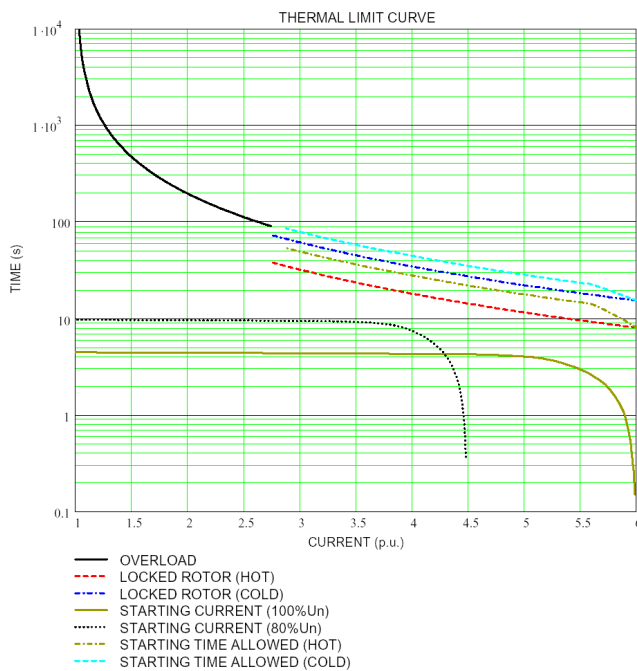


Fig. 1. Curvas de límite térmico del motor, y curvas de arranque.

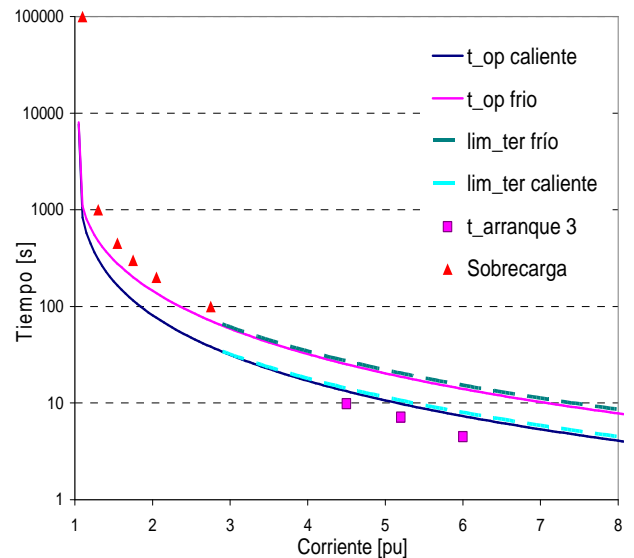


Fig. 2. Curvas de protección: tiempo de operación-corriente en frío y en caliente. Curvas de límite térmico del motor en frío, en caliente. Curva de sobrecarga del motor. Puntos de arranque del motor, para diferentes tensiones.

De esta manera se obtiene una curva de operación en frío:

$$t_{-op \text{ frío}} = 32.15 * 14 * \ln \left( \frac{I_{pu}^2}{I_{pu}^2 - (1.05)^2} \right) \quad (13)$$



En la Fig.2. se observa el correcto ajuste de la curva de operación en frío respecto de la curva límite térmico en frío del motor.

Para determinar la curva de operación en caliente, debe calcularse el ajuste del parámetro  $p$  que permita adaptarse a la curva límite térmico en caliente del motor.

De la curva límite térmico en caliente del motor se obtiene un tiempo de 8 s para  $I = 6$  pu. Para que quede protegido el motor y no se supere su curva límite en caliente, el tiempo de actuación del módulo de sobrecarga de la protección deberá ser ajustado en un valor menor a los 8 s. Tomando un tiempo de operación  $t_{op} = 7.3$  s para  $I = 6$  pu,  $p$  puede ser despejado de (14) considerando  $t_{6x} = 14$  s e  $I_{prior} = 1$  pu:

$$7.3 = 32.15 * 14 * \ln \left( \frac{6^2 - \frac{p}{100} 1^2}{6^2 - 1.05^2} \right) \quad (14)$$

De donde se obtiene  $p = 53$  %.

Con estos valores de ajuste la curva tiempo de operación-corriente en frío (13) protege a la curva límite térmico en frío ( $I_{prior} = 0$ ) y la curva tiempo de operación-corriente (15) protege a la curva límite térmico en caliente ( $I_{prior} = 1$  pu), tal como se observa en la Fig. 2. Ambas curvas de operación protegen al motor frente a sobrecargas.

$$t_{-op \text{ caliente}} = 32.15 * 14 * \ln \left( \frac{I_{pu}^2 - 0.53}{I_{pu}^2 - (1.05)^2} \right) \quad (15)$$

A partir del valor de ajuste de  $t_{6x} = 14$  s y despejando  $\tau$  de (5) resulta  $\tau = 450$  s. Esta constante de tiempo corresponde a condiciones de rotor bloqueado, siendo mucho menor a la constante de calentamiento dada como dato por el fabricante,  $\tau_{hot} = 177$  minutos. Esta última constante de tiempo considera el calentamiento uniforme de la masa del motor como un todo, mientras que las curvas límites a rotor bloqueado tienen en cuenta el calentamiento que sufren algunas partes del motor, es decir tiene en cuenta la presencia de “puntos calientes”.

### 2.2.2 Verificación del número de arranques en calientes

Según los datos del fabricante con una tensión del 100 %  $U_n$ , la corriente de arranque del motor ( $I_{start}$ ) resulta 6 pu y el tiempo de arranque 4.5 s. Con el ajuste propuesto para el módulo de sobrecarga, el tiempo de operación en caliente a partir de (15) resulta de 7.3 s, permitiendo sólo un arranque en caliente.

Con una tensión del 80 %  $U_n$ , la corriente de arranque del motor resulta 4.5 pu y el tiempo de arranque 9.8 s. Con el ajuste propuesto para el módulo de sobrecarga, el tiempo de operación en caliente a partir de (15) resulta de 13.2 s, permitiendo también sólo un arranque en caliente.

### 2.2.3 Verificación del número de arranques en frío

Considerando el arranque del motor a tensión plena (100 %  $U_n$ ), del ajuste propuesto para el módulo de sobrecarga, el tiempo de operación en frío a partir de (13) resulta de 14 s, permitiendo hasta tres arranques en frío con un escaso margen de seguridad.

Considerando el arranque del motor al 80 %  $U_n$ , del ajuste propuesto para el módulo de sobrecarga, el tiempo de operación en frío a partir de (13) resulta de 27.2 s, permitiendo sólo dos arranques en frío, pero con un amplio margen.



En consecuencia puede asegurarse que el ajuste propuesto para el módulo de sobrecarga permite un solo arranque en caliente, o hasta dos arranques en frío, para una tensión del 80%  $U_n$ , que corresponde a la peor condición de arranque.

### **3. RESUMEN Y CONCLUSIONES**

El presente trabajo describe la experiencia en el ajuste del módulo de sobrecarga de un relé multifunción de protección de motores de inducción, para lo cual fue necesario deducir el algoritmo empleado implícitamente por la protección. El algoritmo descrito muestra cómo puede ser ajustada apropiadamente la función de sobrecarga de manera de evitar que se alcancen las curvas de límite térmico del motor.

Se observa que el ajuste propuesto para el módulo de sobrecarga, al permitir sólo dos arranques en frío consecutivos ó uno en caliente resulta más restrictivo que las indicaciones del fabricante (ver punto I.2), que permiten tres tentativas consecutivas de arranques en frío y un arranque adicional después de estar 20 minutos en marcha o bien después de 45 minutos parado, habiendo llegado anteriormente a su temperatura nominal. Esto se debe al hecho de que al no contar con llave de velocidad que detecte la aceleración del motor, el mismo debe ser protegido para la peor condición que es a rotor bloqueado.

Durante un arranque normal, el motor recibirá una ventilación adicional que no ha sido tomada en cuenta en la presente propuesta de ajuste de la protección, ya que el modelo implícitamente utilizado por la protección sólo contempla en la ecuación diferencial un único valor para la constante de tiempo  $\tau$  y un único valor para la constante térmica  $k$ , asociados a la condición de rotor bloqueado, sin ventilación. Sin embargo la presencia del factor de peso  $p$  en el algoritmo de la protección se interpreta como una forma de tener en cuenta el efecto de la ventilación en el estado térmico previo.

### **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] ABB, "REM 610 Motor Protection Relay," Distribution Automation, Vaasa, Finland, Technical Reference Manual, 1MRS 752263-MUM Version B/02.03.2005.
- [2] B. Venkataraman, B. Godsey, E. Shulman, M. Thakur, R. Midence, "Fundamentals of a motor thermal model and its applications in motor protection," in Conference Record of 2005 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp. 11-28.
- [3] M.S. Abou-El-Ela, A.I. Megahed, O.P. Malik, "Thermal model based digital relaying algorithm for induction motor protection," 1996 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1016-1019 vol. 2.
- [4] S. E. Zocholl and G. Benmouyal, "Using Thermal Limit Curves to Define Thermal Models of Induction Motors," in Proc. of the 28th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 23-25, 2001.
- [5] IEEE Guide for AC Motor Protection, IEEE Standard C37.96-2000, Sep. 2000.
- [6] IEEE Guide for the Presentation of Thermal Limit Curves for Squirrel Cage Induction Machines, IEEE Standard 620-1996.