

열 모델을 이용한 전동기 보호성능 개선

Improving Motor Protection Using Thermal Model

장 중 구*
 (Choong-koo Chang)

Abstract - Thermal relays are sometimes used instead of long time overcurrent relays for motor protection. But, it is difficult for any relay design engineer to adequately approximate motor heating curves which represent the average of a difficult-to-define thermal zone. Thermal relays frequently may not provide sufficient protection on heavy overloads.

Digital multifunction relays are microprocessor-based devices. These relays offer highly reliable and advanced protection of motors. If a situation can be mathematically described, the microprocessor in a digital relay can be programmed to tackle that problem. Today's motor protection is accomplished with digital protective relays. Digital relays offer additional, highly important features to complement protection. The best way to prevent short in motor is to not overheat and degrade the insulation.

Key Words : Motor Protection, Thermal Model, Digital Multifunction Relay

1. 서 론

우리나라 총 전력부하 중 산업용 부하의 비중은 약 54.1%이다 [1]. 그리고 산업용 전력부하의 대부분은 동력부하이다. 특히나 발전소의 경우에는 약 80% 부하가 전동기 부하이다. 게다가 약 3~5%에서 최대12%의 전동기가 해마다 고장을 일으킨다는 조사 결과가 있다[2]. 그러나 전동기는 동적 기기인데다가 매우 민감한 전기적 특성을 가지고 있는 기기임에도 불구하고 보편적으로 산업현장에서 효과적으로 설계 및 유지관리 되지 못하는 경향이 없지 않다. 특히 다양하고 우수한 보호기능이 탑재된 디지털 계전기가 일반화 되었음에도 불구하고 전동기 보호용 계전기의 정정방식은 종전의 방법을 답습하고 있다. 이에 고압전동기 보호 원리와 디지털 전동기 보호계전기 정정에 필요한 특성 데이터 그리고 정정 방법 등을 제시함으로써 전동기 구매부터 운전에는 이르는 과정에 실용적으로 이용토록 하고자 한다. 단, 본 논문은 전원 공급측면이 아닌 과부하로 인한 온도상승과 보호방식에 초점을 맞추었다. 마이크로프로세서를 이용하면 전류, 전압 및 전동기 데이터 그리고 RTD 등의 입력정보를 이용하여 전동기의 전기적, 열적, 기계적 모델을 만들 수 있다. 이들 모델은 시간경과에 따라 다른 보호특성을 갖는 디지털계전기의 보호 알고리즘에 이용되므로 전동기 보호성능을 개선시켜준다.

2. 본 론

2.1 유도전동기 주요 고장원인

3상 유도전동기의 고장은 여러 가지 요인으로 초래되며, 이들은 크게 운전조건 또는 내부 및 외부 요인으로 구분할 수 있다. 외부 고장 및 운전 조건에는 부족전압, 비대칭 부하, 전원공급 회로의 상 및 지락 고장 그리고 기동 또는 운전 중 과부하 등이 있다. 내부적 요인에는 지락고장, 권선간 단락, 권선내부 고장 등을 들 수 있다. 따라서 전동기 보호계전기는 이상의 모든 고장에 대한 보호기능이 있어야 한다.

3상 유도전동기의 제반 고장원인과 그로인한 증상을 간단히 요약하면 표 1과 같으며, 특히 그중에서 전동기 과열보호 성능을 개선하는 것이 본 논문의 목적이다.

표 1 전동기 고장 원인

Table 1 Causes of motor fault

고장원인	계전기 번호	고장 증상
과전압	59	슬립 감소, 역률저하, 코어손실 증가
부족전압	27	슬립, 역률증가, 효율저하, 과열
상불평형	46	역상전류 발생, 전동기 과열
과부하	49	과열
지락	50/51G	전선과열, 화재발생
내부고장	87M	차동전류 (내부 단락 혹은 지락)
선간단락	50	과전류 (기동전류의 약 1.7배 이상)

* Department of Nuclear Power Plant Engineering, KEPCO International Nuclear Graduate School, Korea

E-mail: ckchang@kings.ac.kr

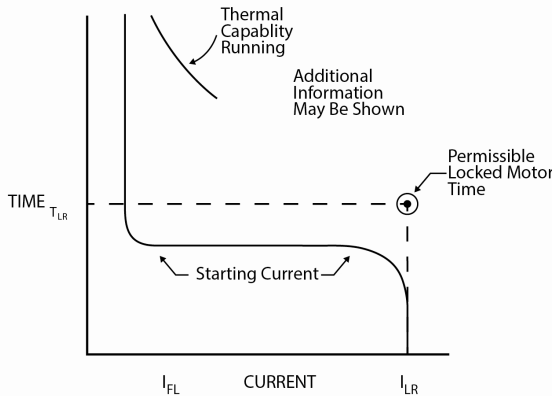
Received : January 09, 2015; Accepted : February 25, 2015

2.2 전동기 과열 보호방식

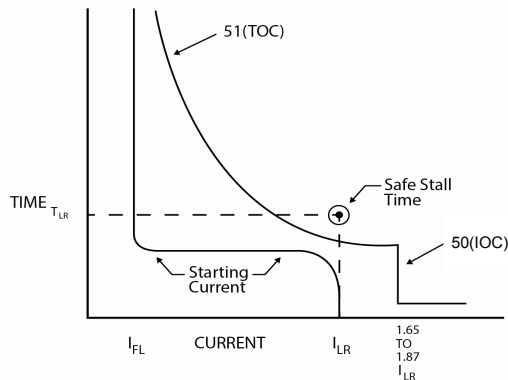
전동기 고장원인 가운데 기계적인 요인과 전기적인 요인이 비슷한 것으로 조사되었으며, 대 다수의 고장은 직 간접적으로 전동기의 과열과 관련이 있다[2]. 전동기는 온도상승 한도를 초과하지 않는 범위 내에서 단시간 과부하 운전을 할 수 있다. 그럼에도 과부하 운전이 전동기의 절연을 저하시키고 고정자 철심의 변형을 일으킬 뿐만 아니라, 열적한도를 10℃ 초과할 때마다 절연수명이 반감된다[2,3]. 종전에는 전동기의 온도상승을 간략 식으로 계산하였으나, 정밀한 보호를 위해서는 온도를 직접 측정하거나 예측 모델을 이용할 필요가 있다.

2.1.1 개요

유도전동기의 열적한계와 기동전류 특성은 그림 1(a) 와 같다. 전동기 운전 중 고정자가 온도가 열적 한계를 초과하는 것을 방지하기 위하여 한시 과전류계전기(51)를 사용하고 전동기 내부권선 혹은 전동기 인입케이블에서의 단락사고 보호를 위해서는 순시 과전류계전기(50)을 사용한다.



(a) 전동기 기동전류와 열적 한계



(b) 과전류 계전기 보호특성

그림 1 대표적인 유도전동기 과부하 및 기동보호
Fig. 1 Typical overload and locked rotor protection

전동기 과열보호를 위한 한시 과전류계전기(51) 정정 값(Iset)은 통상적으로 SF(Service Factor)보다 8~10% 높게 정정 값을 설정한다. 즉, 1.15 SF 인 경우에는 과부하계전기를 전부하전류(FLC)의 1.25 배, 1.0 SF일 경우에는 FLC의 1.15 배에 설정 값에 정정한다. 단, 전동기 고정자 온도가 RTD에 의해 감시되는 경우에는 전동기가 허용하는 최대값 까지 안전하게 설정 값을 증가시킬 수 있다. 하지만, 일반적으로 케이블 규격을 전동기 FLC의 1.25배 맞춰서 선정하는 점 또한 감안하여야 한다[7].

단락 및 구속보호를 위한 순시 과전류 계전기(50)는 구속전류(Locked Rotor Current)의 1.6~2.0 배에 설정한다[8]. 전동기 기동시 회전자에서 발생한 열 가운데 기중으로 발산되는 열을 무시하고 회전자 온도를 I^2t 에 비례하는 것으로 간주하면, 전동기 단자전압 변동에 따른 열 손상 한계시간을 간단히 구할 수 있다. 정격전압에서의 최대 기동전류(LRC)는 전압을 차 과도리액턴스(X_d)로 나눈 값과 같다. 그리고 일반적으로 적용되는 구속전류(LRC)는 대략 $6 \times FLC$ 이다. 만약 기동전압이 80% 라고 한다면, LRC는 전압에 비례하므로 $4.8 \times FLC$ 가 된다. 이를 이용해 정격전압 대비 저전압시의 기동전류 허용시간의 비는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$(4.8 \times FLC)^2 t_2 = (6 \times FLC)^2 t_1 \quad (1)$$

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{(6 \times FLC)^2}{(4.8 \times FLC)^2} = 1.56 \quad (2)$$

따라서 만약 정격전압에서 열적 한계시간이 13 초(t_1)라고 하면, 80% 전압에서는 1.56 배인 20 초(t_2)가 열적 한계시간이 된다.

2.1.2 전동기 과열 보호 방식의 특징

고압전동기의 과열보호에는 한시 과전류계전기(51)와 열동 과부하계전기(49) 두 가지 종류의 계전기가 사용되고 있다. 열동 과부하계전기는 경 과부하(light overload) 보호특성이 양호한 반면에 중 과부하(heavy overload) 보호특성은 미흡하다. 이에 반해, 한시 과전류 계전기는 중 과부하 보호 특성이 우수한 반면에 경 과부하시에는 과도한 보호(over protection)를 하는 특성이 있다(그림 2 참조).

전동기 과열보호에 있어서 한시 과전류계전기(51)가 지닌 한계를 보완하기 위해 종종 열동 과부하계전기(49)를 조합하여 사용하기도 한다. 두 가지 계전기를 함께 사용하면 보다 개선된 보호가 이루어진다. 하지만 두 가지 계전기를 조합해서 사용할 경우 계전기 정정 및 시험이 복잡해지기 때문에 실제로는 드물게 사용된다. 오늘날에는 디지털계전기가 널리 보급되어, 전류만을 온도상승의 지수(index)로 사용하거나 전동기의 열적 관성이 고려되지 않은 열 모델 회로를 사용하는 전기기계식(electromechanical) 계전기와 정지형(static) 계전기가 갖는 단점의 개선이 가능해졌다. 디지털계전기는 전동기의 회전자와 고정자의 수학적 모델을 이용하고 운전 전류에 의한 도체온도 상승 값 계산과 함께 주위온도의 영향과 열전달 및 열 감쇠를 계산하는 알고리즘도 사용한다[9].

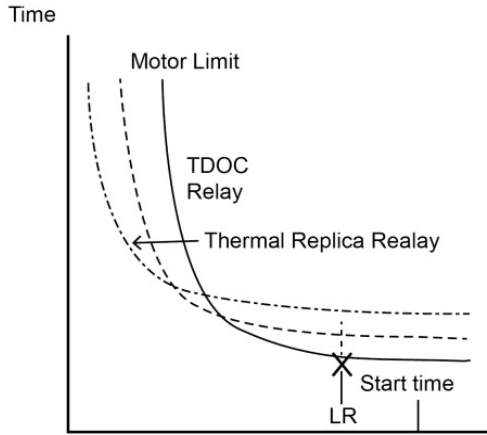


그림 2 열동 과부하 계전기와 한시 과전류 계전기의 전동기 과열보호 특성

Fig. 2 Thermal overload protection characteristics of thermal overload and overcurrent relays

종전에 사용하던 한시 과전류계전기(51)는 축적된 열량과 감시 열량을 계산하는 기능이 없었다. 그러나 마이크로프로세서 기반 디지털계전기는 열 축적 및 냉각 효과를 고려하여 전동기가 열 손상을 입을 우려가 있는 경우 재 기동을 방지할 수 있다. 이전에는 그러한 판단이 운전자의 재량에 맡겨졌었다.

2.2.3 열 모델(Thermal Model)을 이용한 전동기 보호

열동 과부하계전기(49)의 보호기능은 열 모델 기반이다. 보호 요소는 정상전류와 역상전류의 발열효과 I^2R 를 반영한다. 전통적인 열동 과부하계전기는 온도변화를 기록하거나 궤적을 추적하는 기능이 없다. 그러나 디지털계전기에는 사용된 전동기 열용량 (TC_{used} : Thermal Capacity Used)을 누적 계산하여 백분율로 기록하는 레지스터가 있다. 이 값은 전동기에 흐르는 전류의 크기와 기간을 측정하고 전동기의 부하전류가 높은 전류에서 낮은 전류로 변화될 때 발생하는 냉각효과 까지 고려하여 계산한다. TC_{used} 가 100%에 달하면 트립장치가 작동됨과 동시에 전동기가 재 기동에 필요한 만큼 충분히 냉각될 때까지 재 기동을 방지한다. TC_{used} 레지스터는 계전기 라이브러리에서 선택된 과부하 트립커브(overload trip curve)를 기준으로 사용된 열용량을 계산한다. 열동 과부하계전기는 전동기의 실제 시간-전류 내열특성 (thermal limit)을 프로그래밍에 사용하지 않으며 과부하 트립커브에 따라 작동된다. 그러므로 계전기는 과부하 트립커브를 전동기의 내열특성으로 간주하고 TC_{used} 계산에 이용한다. 전통적인 방식대로 계전기의 과부하 트립커브를 전동기의 내열특성 커브보다 낮게 설정하면 보수적인 보호가 이루어진다. 이와 함께 전동기의 잔여 열용량이 재 기동에 충분치 못할 경우 재 기동을 막기 위하여 열용량 레지스터가 사용된다. 앞서 언급한 보수적인 보호가 문제가 되는 경우가 있는데, 계전기가 재 기동을 허용할 때까지의 냉각 시간을 과도하게 요구하는 경우이다.

게다가, TC_{used} 여유를 추가하게 되면 문제는 더 심각해질 수 있다. 과부하 트립커브를 전동기의 내열특성 커브와 근접하도록 설정하면 이 같은 문제가 해결된다. 과부하 트립커브에는 다양한 종류가 있으며, 만약 표준 과부하 트립커브가 전동기의 내열특성 혹은 열 모델(thermal model)에 적합하지 않을 경우에는 주문형 과부하 트립커브를 만들 수도 있다. 따라서 전동기의 정확한 열 모델 파악이 필요하다.

전동기의 특성을 수학적으로 표현 할 수 있다면 기능성과 신뢰성이 우수한 디지털 계전기를 이용하여 전동기를 보다 정확·정밀하게 보호 할 수 있다. 특히 전동기 설계에 적용되는 열 모델은 전동기 기동 및 과부하 보호에 매우 유용하게 이용 가능하다 [5]. 전동기 열 모델은 1차 열 모델과 2차 열 모델이 있으며, 다음은 1차 열 모델에 대한 설명이다. 전동기에서 발생된 총열량은 전동기에 축적된 열량과 공기 중으로 발산된 열량의 합계이며, 수학적으로는 다음과 같이 표현된다[2~6].

$$I^2R = C \frac{dT'(t)}{dt} + HT'(t) \tag{3}$$

여기서, C = 전동기의 열용량, $T'(t)$ = 주위온도를 초과하는 온도상승, $I(t)$ = 전동기 전류, R = 전기저항, H = 열 소모계수이다. 계산상의 편의를 위해 전류와 온도를 각각 단위 값(per unit)으로 표기하면 식 (3)은 아래와 같이 변환된다.

$$\tau \frac{dT(t)}{dt} = I^2(t) \frac{I_{rated}^2 R}{HT_{max}} - T(t) \tag{4}$$

단, $\tau = \frac{C}{H}$

$T(t) = T'(t)/T_{max}$ = per unit temperature

$I(t) = I'(t)/I_{rated}$ = per unit current

I_{rated} = rated current

T_{max} = motor temperature at thermal limit trip condition

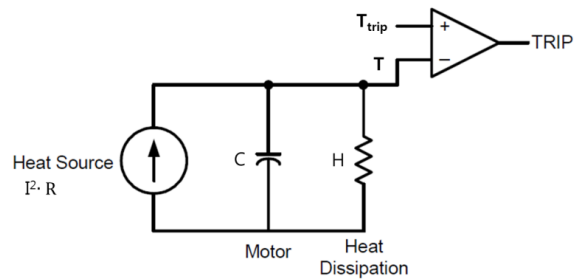


그림 3 유도전동기 1차 열 모델

Fig. 3 First order thermal model of induction motors

최고온도와 정격전류와의 관계는 $I_{rated}^2 R = HT_{max}$ 이다. 따라서 식 (4)는 식 (5)와 같이 다시 쓸 수 있으며, 식 (5)는 단일 시

정수를 이용한 정상 상태 과부하 열 응답특성 해석에 이용 된다.

$$\frac{dT(t)}{\tau} = I^2(t) - T(t) \quad (5)$$

식 (5)는 전동기 정상(steady) 과부하 단일 시간 상수 (single time-constant) 모델의 열 응답을 해석하는데 사용된다. 식 (5)는 1계 선형 미분방정식으로서 해는 아래와 같다.

$$T(t) = I_0^2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + I^2 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \text{ [pu}^\circ\text{C]} \quad (6)$$

여기서,

I_0 = Per unit initial current

I = per unit motor current(a constant)

$T(t)$ = per unit motor temperature rise

τ = motor thermal running time constant

전류가 I 일 때 열 모델이 열적한계에 이르기까지 걸리는 시간을 계산하기 위해 식 (6)을 변형하면 식 (7)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} T(t) &= I_0^2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + I^2 - I^2 e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &= e^{-\frac{t}{\tau}} (I_0^2 - I^2) + I^2 \\ e^{-\frac{t}{\tau}} &= \frac{T(t) - I^2}{I_0^2 - I^2} \\ -\frac{t}{\tau} &= \ln\left[\frac{T(t) - I^2}{I_0^2 - I^2}\right] \\ \frac{t}{\tau} &= \ln\left[\frac{I_0^2 - I^2}{T(t) - I^2}\right] \\ \frac{t}{\tau} &= \ln\left[\frac{-(I_0^2 - I^2)}{-(T(t) - I^2)}\right] \\ t &= \tau \ln\left[\frac{I_0^2 - I^2}{I^2 - T(t)}\right] \end{aligned} \quad (7)$$

다시 말하면, 식 (7)은 단위(pu) 온도상승 $T(t)$ 에 걸리는 시간 t 는 전동기의 초기전류(I_0) 최종전류(I) 그리고 열 운전 시간 상수(τ)의 함수임을 나타내 준다.

전동기의 SF(Service Factor)를 이용하면 전동기 보호에 쉽게 적용할 수 있도록 식 (7)을 보다 간략화 시킬 수 있다. SF의 정의에 따르면, $SF \times FLA$ (Full Load Ampere) 보다 큰 전류는 과부하 전류로 간주된다. 이를 임의의 시간 t 의 전동기의 최대 pu 온도상승 $T(t)$ 로 변환하면 :

$$T(t) = (SF \cdot I_{FLA})^2 \text{ [pu}^\circ\text{C]} \quad (8)$$

한편, $I_{FLA} = 1$ pu 이므로 상기 식은 다음과 같이 간략화 된다.

$$T(t) = SF^2 \text{ [pu}^\circ\text{C]} \quad (9)$$

다시 식 (9)를 식 (7)에 대입하면 ;

$$t(I) = \tau \cdot \ln\left(\frac{I^2 - I_0^2}{I^2 - SF^2}\right) \quad (10)$$

이 되고 전동기의 초기전류 $I_0 = 0$ 이고 $SF = 1$ 이라고 하면 식 (11)이 된다.

$$t(I) = \tau \cdot \ln\left(\frac{I^2}{I^2 - 1}\right) \text{ [s]} \quad (11)$$

$t(I)$ = times required for the motor temperature to reach thermal limit at current I

I 값이 큰 경우 Taylor Series 근사치 구하는 방식을 적용하면 식 (11)은 아래와 같이 더욱 간략화 된다.

$$t(I) = \frac{\tau}{I^2 - 1} \quad (12)$$

IEEE C37.112-1996[10] 규격에서는 식 (12)를 응용하여 표준 과부하 트립커브를 아래와 같이 정의 하였다.

$$T = TDM \times \left[\frac{A}{\left(\frac{I}{I_{pk}}\right)^p - 1} + B \right] \quad (13)$$

여기서, T = operate time (in seconds), TDM = multiplier setting, I = input current, I_{pk} = pickup current setting, A, B, p = constants

표 2 IEEE 반한시 과전류계전기 트립커브 상수

Table 2 IEEE Inverse Overcurrent Trip Curve Constants

IEEE CURVE SHAPE	A	B	p	t_r
IEEE Extremely Inverse	28.2	0.1217	2.0000	29.1
IEEE Very Inverse	19.61	0.491	2.0000	21.6
IEEE Moderately Inverse	0.0515	0.1140	0.0200	4.85

한편, 식 (10)을 좀 더 간략화 하면 ;

$$\begin{aligned} t(I) &= \tau \cdot \ln\left(\frac{I^2}{I^2 - 1}\right) \text{ [s]} \\ &= \tau \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - 1/I^2}\right) = -\tau \cdot \ln(1 - 1/I^2) \\ &= -\tau \cdot \ln(1 - x) \end{aligned}$$

여기서, $x = 1/I^2$ 이고, $\ln(1-x)$ 을 $x=0$ 근처에서 x 에 대하여 Taylor 전개하고 처음 2개 항을 취하면 ;

$$\ln(1-x) \approx \ln(1) - x = -x, \quad x \ll 1$$

그러므로

$$t(I) \approx \frac{\tau}{I^2}, \quad I^2 \gg 1 \tag{15}$$

이 되어 아래의 I^2t 과부하 트립커브 형식이 된다[11].

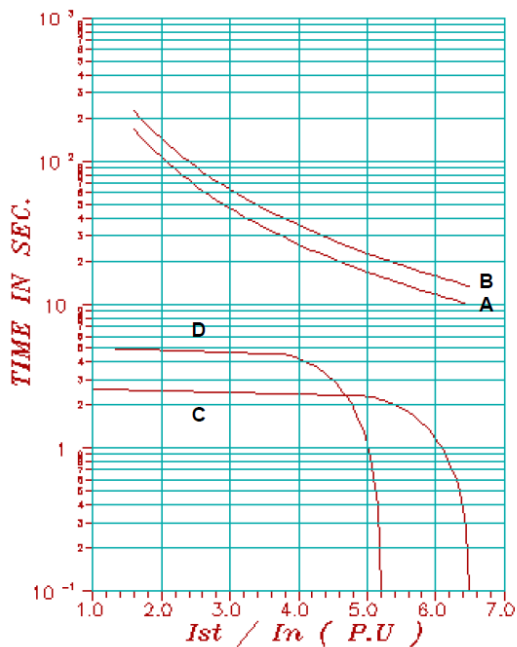
$$T = TDM \times \left[\frac{100}{\left(\frac{I}{I_{pk}}\right)^2} \right] \tag{16}$$

여기서, T = operate time (sec.); TDM = multiplier setting; I = input current; I_{pk} = pickup current 이며, TDM 값은 0.01, 0.10, 1.00, 10.00, 100.00, 600.00 등이다.

회전자 내열 특성커브(thermal limit curve)는 외부로 발산되는 열이 무시 가능하므로 I^2t 커브가 된다(그림 5 참조).

2.3 전동기 과열 보호 사례와 개선방안

2.3.1 기존 과열보호 방식과 문제점



A: Hot Condition B: Cold Condition
C: Rated Voltage D: 80% Rated Voltage

그림 4 유도전동 시간-전류 및 내열특성 커브
Fig. 4 Time-current and thermal limit curves of Induction motor

아날로그 계전기에서는 과부하 트립커브(overload trip curve)의 형식이 고정되어 있으며(EI, VI, NI) 지연시간(TD) 만 조정할 수 있을 뿐이었다. 반면에, 디지털 계전기는 IEEE 및 IEC 커브 외에도 계전기 제작자가 제공하는 고유의 과부하 트립커브의 적용이 가능하고, 전동기의 열 모델(thermal model)에 적합하게 조정이 가능하다. 하지만, 전동기의 열 모델을 알지 못하면 이와 같은 기능을 활용할 수 없다. 그림 4는 6.6 kV, 3000 kW 유도전동기의 시간-전류 특성커브의 예이다.

그림 5는 S사 디지털계전기의 보호협조 커브이며, 전동기의 과열보호를 위해 한시 과전류계전기(51)와 열동 과부하계전기(49)를 조합하여 사용하였다(2.2.2 참조). 하지만, 계전기 보호협조 커브에 전동기의 시간-전류 커브와 회전자 Safe Stall Time(hot and cold)은 표시되어 있으나, 고정자(stator)의 내열특성 커브는 표시되어 있지 않다. 즉, 보호협조 커브 상으로 전동기 과열보호 계전기가 최적상태로 정정되었는지 알 수 없는 문제점이 있다.

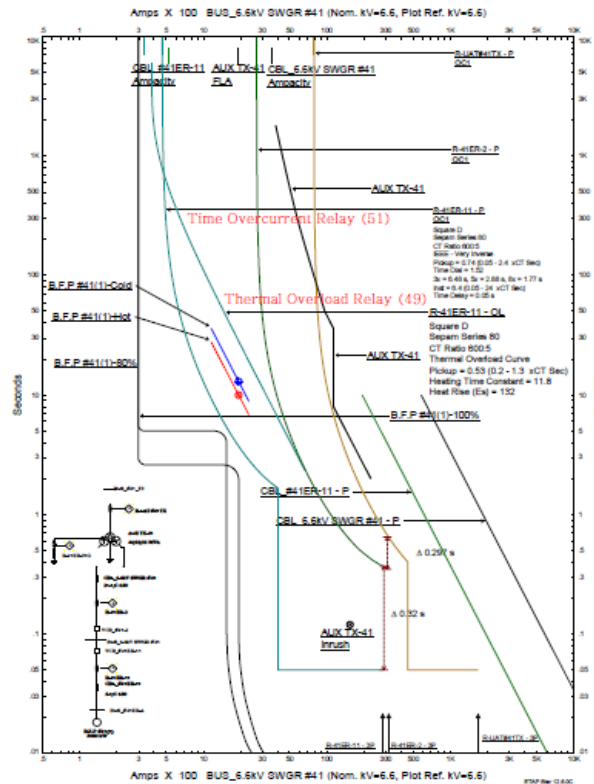


그림 5 전동기용 디지털 보호계전기 보호협조 커브
Fig. 5 Digital motor protection relay coordination curve

2.3.2 열 모델을 이용한 보호성능 개선

다음은 상기 사례와 동일한 고압 유도전동기에 다른 제작사 G사의 디지털계전기를 설치하고 열 모델을 적용하여 과열보호 성능을 개선한 사례이다. 우선 전동기의 열 모델을 보호협조 커브에 적용하기 위하여 다음과 같은 선행 작업이 필요하다.

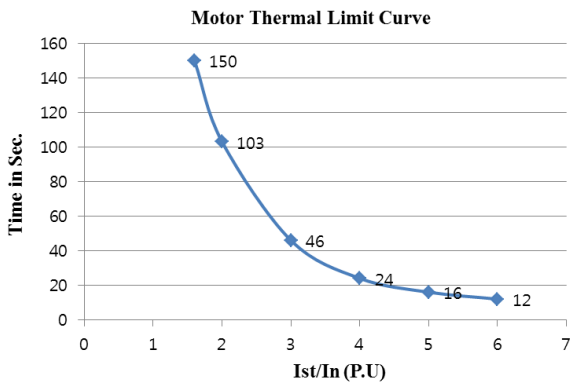


그림 6 전동기 고정자 내열특성 커브
Fig. 6 Thermal limit curve of the motor stator

그림 4 그래프에서 X축과 Y축이 만나는 점을 표로 만든 다음 Excel sheet를 이용하여 분포형 그래프를 생성시킨다(그림 6). 그런 다음에 거듭제곱 추세선을 겹치기로 삽입하면 그림 7과 같은 고정자 내열특성 커브와 거의 일치하는 거듭제곱 커브와 커브 공식(thermal model)을 구할 수 있다.

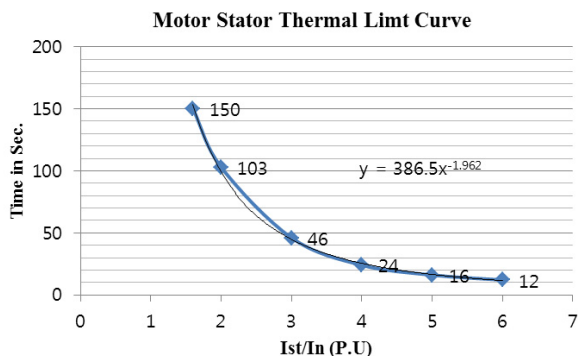


그림 7 내열특성 커브를 이용한 열 모델 생성
Fig. 7 Deriving thermal model by using thermal limit

즉, 예로든 6.6kV, 3000kW 유도전동기의 고정자 열 모델은 $t(I) = \frac{386.5}{I^{1.962}}$ 임을 알 수 있으며, 이는 I^2t 과부하 트립커브, 식 (16)와 유사한 형식임을 알 수 있다. 이 같은 방법으로 구한 열 모델을 ETAP 프로그램에서 계전기 보호협조 커브에 입력하고 과부하 트립커브와 고정자 열 모델의 보호협조가 잘 이루어지도록 TD 값(1~15)을 설정한다.

또한 과부하 트립커브가 회전자 Safe Stall Time 커브 보다 아래 위치하도록 하여 전동기 기동 시 구속보호를 하며, 구속보호에는 앞서 언급한 TC_{used} 연산을 통하여 전동기 과열 시 재 기동을 방지하는 기능도 포함된다.

G사 디지털 전동기 보호계전기의 표준 전동기 과부하 트립커브(Standard Motor Curve) 공식은 (17)과 같으며, 열동 과부하계전기(49) 만으로도 전동기의 고정자 내열 특성커브 및 회전자

Safe Stall Time과 보호협조가 잘 이루어지도록 개발된 열 모델이다[12].

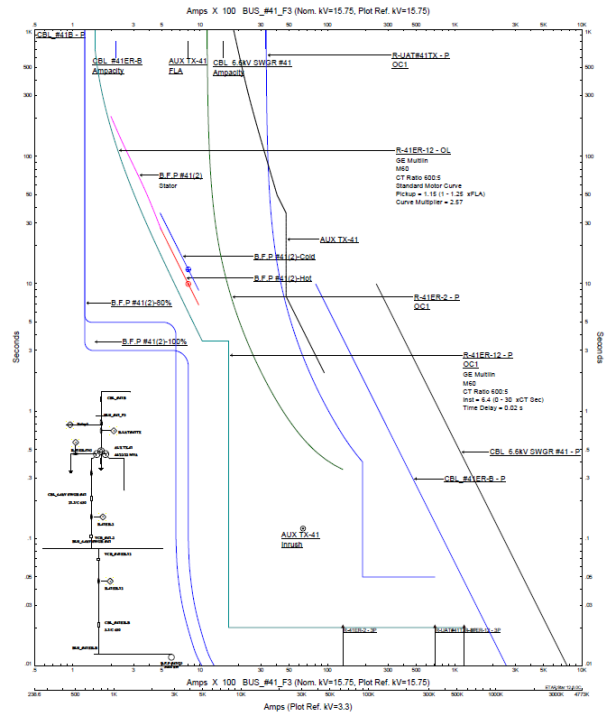


그림 8 고정자 열 모델을 이용한 전동기 과열 보호 협조
Fig. 8 Motor thermal overload protection coordination by thermal model

$$t(I) = \frac{TD \times 2.2116623}{0.02530337 \times \left(\frac{I}{FLA} - 1\right)^2 + 0.05054758 \times \left(\frac{I}{FLA} - 1\right)} \quad (17)$$

여기서 t = trip time, I = motor current, FLA = motor rated current, TD = time delay multiplier 이다.

3. 결 론

이상과 같이, 디지털 계전기는 전동기의 열적 특성을 고려하여 정확·정밀하게 보호할 수 있는 기능을 가지고 있다. 그러나 현재까지 산업현장에서는 그와 같은 기능이 잘 활용되지 않고 있다. 전동기 제작사에서는 정확한 열 모델을 제공하지 않고 종전의 방식대로 시간-전류 및 내열 특성커브(time-current and thermal limit characteristic curve)만을 제공하고 있다. 그리고 디지털 계전기의 정정방식이 계전기 제작사마다 다르고 복잡하며, 정정 시 요구되는 데이터 종류와 형식이 다르기 때문에 계전기의 기능과 성능이 크게 향상되었음에도 보호성능의 개선으로 이어지지 않고 있다. 대표적으로 디지털 계전기는 아날로그 계전기에 비해 다양한 종류의 과부하 트립커브(IEEE, IEC, I^2t , standard motor, user defined curve 등)를 제공하고 있으나 전동기의 열 모델을 알 수 없으므로 보호협조 커브 상에 표현하기

가 어렵고, 결과적으로 정확한 보호협조가 이루어지는지 확인 할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 유도전동기 고정자 열 모델(stator thermal model) 일반식 유도하여 제시하므로써 보호계전기 설계 및 정정 기술자가 유도전동기의 열 모델의 특성을 쉽게 이해할 수 있도록 하였으며, 전동기 보호에 적합한 과부하 트립커브(overload trip curve)를 선정할 수 있도록 도움을 주고자 하였다.

아울러, 전동기 시간-전류 및 내열 특성커브를 이용하여 전동기 열 모델을 유도하는 방법과 이를 전동기 보호협조 커브 작성에 이용함으로써 전동기의 보호성능을 개선하는 방법을 제시하였다.

그밖에도 다양한 디지털 계전기의 기능을 효과적으로 활용하기 위해서는 무엇보다도 전동기 구매 시 열 모델을 포함하여 전동기 보호계전기 정정에 필요한 각종 데이터를 명시적으로 요구할 필요가 있다. 특히 산업현장에서 전동기 구매부와 보호계전기 설계 및 정정 부서가 다름으로 해서 이 부분이 종종 간과되고 있음에 유의할 필요가 있다. 그리고 전동기의 효과적인 보호를 위해서는 초기 정정 이후에 운전경험을 반영하여 추후에 계전기 정정을 최적화 할 필요도 있다.

아울러, 디지털 계전기의 기능이 다양해지고 성능이 고도화 되어가는 과정에서 제작사별 계전기간의 호환이 점점 어려워지고 있는 점을 감안할 때 전동기 제작사, 보호계전기 제작사, 보호계전기 설계 및 정정 기술자간에 기술적 교류와 협력이 필수적임을 강조하지 않을 수 없다. 이를 뒷받침 하는 대표적인 예로, 정확한 전동기 열 모델이 제공되지 않고서는 아무리 성능이 우수한 계전기를 사용한다고 하더라도 효과적인 전동기 보호가 이루어질 수 없기 때문이다. 본 연구가 이와 같은 문제점들을 해소해 나가기 위한 기초가 되기를 바라며 향후에도 이와 같은 노력과 연구를 계속해서 이어나갈 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2014년 KINGS 연구비 2014-3에 의하여 연구되었으므로 이에 감사드립니다.

References

[1] KEPCO, "Statistics of Electric Power in Korea", No.83(2013), P.122 ~123, 2014.5
 [2] Venkataraman, B. ; Godsey B ; Premerlani, W. ; Shulman, E. ; Thakur, M. ; Midence, R. "Fundamentals of a motor thermal model and its applications in motor protection" Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp.41~55, 2005.
 [3] Vico, J. ; Hunt, R., "Principles in Moptpr Protection", Industry Applications Magazine, IEEE Volume: 17 ,

Issue: 6, pp.52~6, 2011.

[4] Zocholl, Stanley E. ; Schweitzer, E.O. ; Aliaga-Zegarra, Antenor, "Thermal Protection of Induction Motors Enhanced by Interactive Electrical and Thermal Models",Power Engineering Review, IEEE Volume: PER-4 , Issue: 7, pp.1749~1755, 1984.
 [5] Yi Du ; Habetler, T.G. ; Harley, R.G., Methods for Thermal Protection of Medium Voltage Induction Motors - A review", Condition Monitoring and Diagnosis, pp. 229~233, 2008.
 [6] Bill Dull, Ajay Sitaula, Jeff Butler, and Todd Beninghaus, "Advanced Electric Motor Protection to Reduce Maintenance Cost and Improve Automation", Naval Engineers.org, 2010.
 [7] IEEE Stnd C37.96-2000, IEEE Guide for AC Motor Protection, Sect. 7.2.10.7
 [8] IEEE Stnd C37.96-2000, Ibid, Sect.7.2.9.1
 [9] Stanley H.Horowitz, Arun G. Phadke, Power System Relaying, Third Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2008. p.176
 [10] IEEE Stnd C37.112-1996, Standard Inverse-Time Characteristic Equation for Overcurrent Relay
 [11] GE Energy, M60 Motor Protection System UR Series Industrial Manual, Rev. 6.0x, p.5-165
 [12] GE Energy, libd, p.5-117

저 자 소 개



장 중 구(Choong-koo Chang)

1959년 3월 10일생. 1985년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학교 공학대학원 정보공학과 졸업(석사). 2001년 명지대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1985~1992 한국전력기술(주) 책임기술원. 1993~1998 삼성전자 생산기술센터 과장. 2001~2012 상진기술엔지니어링 전무. 2013~현재 한국전력국제원자력대학원대학교 원자력산업학과 부교수.