

고관성부하용 전동기보호를 위한 속도감지형 과전류계전기 연구

임진옥 조성돈 강인수

한국전력기술주식회사

Study of Speed-biased Overcurrent Relay for High-Inertia Drive Motor

Jin Ok Lim Sung Don Cho In Su Kang
Korea Power Engineering Company

Abstracts

The relay protection engineers are sometimes faced with the difficulties in full protection of high-inertia drive motors during acceleration period. The problem results from lower permitted locked rotor time of the motor compared with motor starting time.

Even though the various types of protection relay and other device (Speed switch, Distance relay) are used, the full protections against abnormal starting conditions may not be available. So, the development of a new speed-biased overcurrent relay is suggested in this paper. This paper also presents that speed-biased overcurrent relay can fully protect the high-inertia motor during abnormal starting condition by computer simulation.

1. 서론

신뢰성 및 유지보수측면에 유리한 대용량 농형 유도전동기가 산업설비의 중요한 동력원으로 많이 사용되고 있다. 따라서 소내전기계통 설계시 이러한 대용량 유도전동기에 대한 적절한 보호체계설계가 중요한 분야로 취급되고 있다. 대용량 편부하와 같이 그 특성상 고관성을 피할 수 없거나, 고관성 에너지가 필요하여 특별히 부하의 관성을 증대시킨 고관성부하(High-Inertia Load)를 구동시키는 유도전동기는 전동기 기동시간이 전동기의 회전자 구속히용시간보다 더 길므로 과전류계전기만에 의한 보호가 어려워 속도스위치(Speed switch) 또는 거리계전기(Distance relay)등과 조합 사용되고 있다.[1]

그러나, 부하의 관성이 아주 커서 전동기 기동시간이 크고 상대적으로 전동기 열적한계시간이 짧은 경우 기준의 보호체계장치로는 전동기의 가속실패 사고에 대한 전동기보호가 불가능한 실정이다.

고관성부하용 전동기의 경우 대부분 대용량일뿐만 아니라 해당 산업설비에서 중요한 역할을 담당하는 설비이므로 보호실패시 산업설비의 정지와 전동기 보수에 소요되는 손해가 막대하다.

따라서, 고관성부하용 전동기의 가속실패 사고에 대하여 완벽한 보호가 가능한 보호체전기가 필요한 실정이다.

2. 전동기 열적한계 곡선과 보호협조

2.1 전동기의 열적한계 곡선

전동기의 열적한계 곡선은 전동기의 각종 운전상태에서의

열적한계를 나타내는 시간-전류 곡선으로써 다음과 같이 구분된다.

- 구속회전자 열적한계곡선(Locked Rotor Thermal Limit Curve, 이하 LRTL)-전동기에 전압이 인가되었으나 전혀 가속을 하지 않은 구속상태에서 전동기 회전자의 열적 한계에 도달하는 시간-전류곡선.
- 과부하 열적한계곡선(Overload Thermal Limit Curve, 이하 OTL)-전동기의 정상운전 상태에서 전동기의 정격을 초과하는 부하가 지속적으로 인가된 상태에서 전동기 고정자의 열적한계에 도달하는 시간-전류곡선.
- 가속중 열적한계곡선(Acceleration Thermal Limit, 이하 ATL)-정격속도보다 낮은 어떤 특정 속도에서 전동기 회전자의 열적한계에 도달하는 시간-전류곡선.

2.2 전동기 보호협조

완전한 전동기 보호를 위해서는 전동기의 기동과 운전시 오동작하지 않으면서 상기 전동기 열적한계에 이르기 전에 적절히 동작하는 보호체장치가 구비되어야 한다. 일반적인 전동기에 대한 보호는 그림 1과 같이 1개의 과전류계전기로 충분하다.

그림 2와 같이 전동기부하의 관성이 키서 LRTL시간보다 전동기 기동시간이 약간 큰 경우 2개의 과전류계전기와 속도스위치 또는 전동기 기동시 구속상태에서는 겹보기 임피던스가 낮고 전동기 속도가 증가할수록 겹보기 임피던스가 높아지는 현상을 이용한 거리계전기를 조합 사용하고 있다. 즉, 전동기 정상기동시 약 50% 속도에서 Relay 1이 동작하므로 40%속도에 정정한 경우 40% 이하의 속도에서는 Relay 1이, 40%이상의 속도에서는 Relay 2가 각각 전동기를 보호하고 있다. 그러나, 그림 3과같이 전동기 부하의 관성이 아주 키서 LRTL 시간 보다 전동기 기동시간이 훨씬 큰 경우 (대략 전동기 기동시간이 LRTL시간의 1.6배 이상) 전동기 정상 기동시 약 30%속도에서 Relay 1이 동작하므로 속도스위치를 20%로 하향 조정할 경우 20%속도의 ATL을 기준으로 정정한 Relay 2가 전동기 정상기동중 동작하므로 보호협조가 불가능한 실정이다. 이러한 고관성부하의 전동기보호 협조 문제점을 개선하기 위해 전동기 전류를 이용하여 회전자 도체의 온도상승을 계산하는 도체온도계산형 과전류계전기가 시판중에 있으며, 전동기 기동전류가 전동기 단자전압에 비례하며 전동기 기동시간과 LRTL시간은 전동기 단자전압에 반비례하는 특성을 이용한 전압감지형 과전류계전기(Voltage-biased overcurrent relay)가 제안되기도 하였다.[2],[3]

그러나, 전동기 보호의 기준이 되는 전동기 열적한계곡선

이 특정속도에서의 시간-전류이므로 속도를 무시한 전류, 전압요소만의 입력에 의한 전류감지형 또는 온도계산형과 전류계전기 역시 보호회로에 그 한계가 있다.

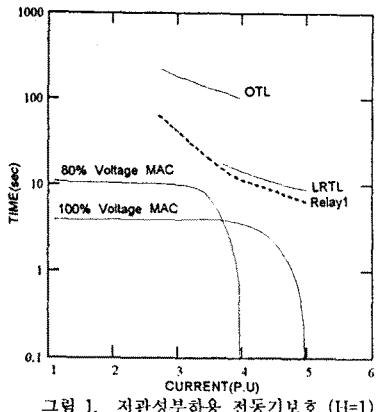


그림 1. 저관성부하용 전동기보호 (H=1)

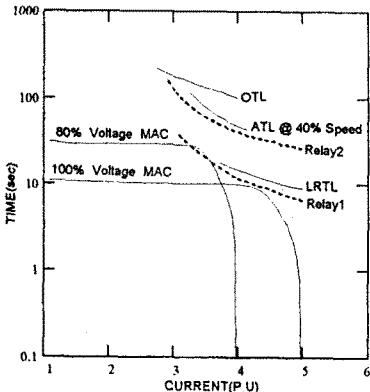
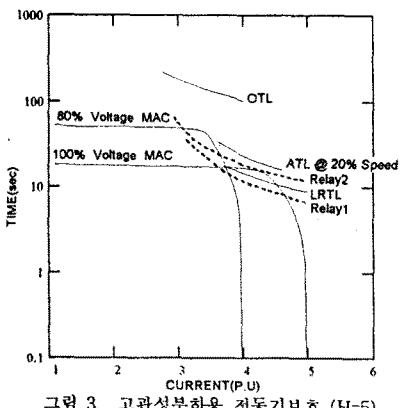


그림 2. 중관성부하용 전동기보호 (H=3)



3. 속도감지형 과전류계전기

고관성부하의 전동기 보호에서 특히 문제가 되고 있는 가속성폐 사고시 회전자 열적한계에 대한 완벽한 보호를 위해서는 회전자 도체의 온도를 직접 감시하는 방법이 있음을 있으나 현재 기술적으로 불가능하다.

따라서, 전동기 특정속도에 따라 각각 제시되는 회전자 열적한계에 따라 전동기는 적절히 보호되어야 한다.

회전자 열적한계가 전동기 특정속도에 따라 제시되는 이유는 기동초기에는 회전자 도체에 흐르는 전류의 주파수가 전원 주파수와 거의 동일하므로 표피효과에 의해 전류 분포가 회전자 도체의 외측으로 집중되어 실효저항이 증가할 뿐만 아니라 국부화열 현상이 발생하기 때문이며, 전동기의 속도가 증가하면 전류분포가 거의 균일해질뿐만 아니라 전동기 회전에 의해 냉각 효과도 고려되기 때문이다.

이러한 전동기 열적특성에 잘 부합되는 보호계전기의 개발을 위해서는 아래와 같이 전동기의 전류와 속도가 각각 입력되어야 한다. 일반적인 과전류계전기는 전류가 즐정우 동작시간이 짧아지는 반면에 (Inverse Time-Current) 특성을 갖고 있으며 그 특성곡선은 식 1과 같은 수식으로 표현할 수 있다. 그리고 식2로 표현되는 계전기 누적연산치 (Accumulation 또는 Travel)가 1이 되면 계전기는 동작하게 된다.

여기서, 전동기의 열적특성에 부합되게 속도가 증가할수록 계전기의 동작시간을 증가하게 하기위해서는 식 1을 식 3과 같이 수정할 수 있다.

$$T = A \cdot D \cdot \frac{1}{(I^N - C)} + B \cdot D + K \quad \dots \text{식 3}$$

$$Q = \sum \left(\frac{1}{T} \cdot \Delta t \right) \quad \dots \text{식 2}$$

$$T = A \cdot D \cdot \frac{(L\omega^2 + 1)}{(I^N - C)} + B \cdot D \cdot (L\omega^2 + 1) + K \quad \dots \text{식 3}$$

I, ω : 전동기 단위 전류, 속도 (입력빈수)

T : 전류 I와 속도 ω 에서의 계전기 동작시간 (초)

C,D,L : 계전기 전류, 시간, 속도 정정치

A,B,K : 계전기 특성곡선 기울기 정정치

Δt : 계전기 연산 Step (초)

Q : 전동기 보호를 위한 계전기 누적 연산치

4. 전선 시뮬레이션에 의한 속도감지형 과전류계전기 특성 분석

4.1 유도전동기 모델링

각종 부하조건에서의 전동기 전류, 속도(식4,5,6)등을 계산하기 위해서는 그림 4와 같은 등가회로에 대한 등가임피던스의 계산이 선행되어야 한다.

대용량 유도전동기의 기동시 나타나는 회전자 도체의 표피효과와 포화에 의한 누설리액턴스증가를 고려하여 이중 회전자 회로로 모델링하였으며, 회로의 등가임피던스는 그림 5의 전동기 속도-전류 및 속도-토오크 곡선(100% 전압)을 이용하여, 그리고 부하의 토오크 방정식 계수는 그림 6(Normal)의 부하 속도-토오크 곡선을 이용하여 각각 계산하였다.[4]

$$T_m = -X_m \cdot I_m \cdot I_s \cdot I_r' \quad \dots \dots \dots \text{식 4}$$

$$T_L = A + B(\omega) + C(\omega)^2 \quad \dots \dots \dots \text{식 5}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_L}{2H} \quad \dots \dots \dots \text{식 6}$$

I_s, I_r : 고정자 및 회전자 전류

T_m, T_L : 전동기 및 부하 토오크

H : 전동기와 부하의 관성정수 합

A,B,C : 부하토오크 방정식 계수

ω : 회전속도

I_m, I_r : 복소수의 헤수분 및 공액

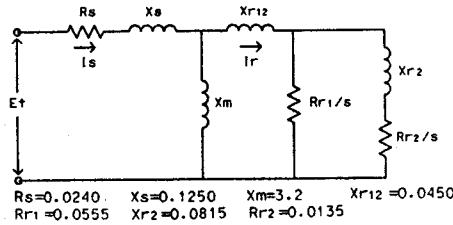


그림 4. 유도전동기 등가회로

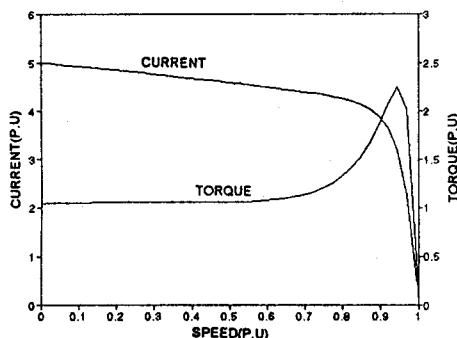


그림 5. 유도전동기의 속도-전류 및 속도-토오크곡선

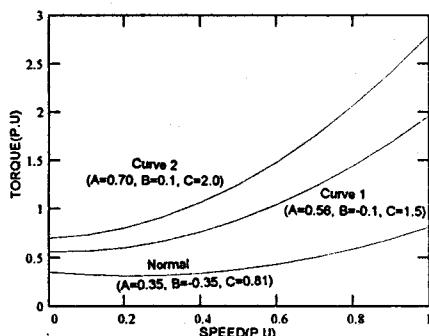


그림 6. 전동기 부하의 속도-토오크곡선

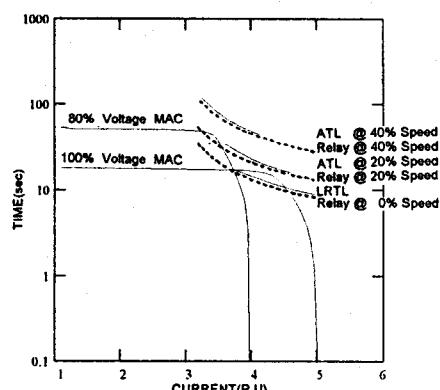


그림 7. 속도감지형 과전류제전기의 의한 전동기보호 (H=5)

4.2 속도감지형 과전류제전기의 정정

상기 전동기 보호를 위한 식 3의 속도감지형 제전기를 아래와 같이 정정하였을 때 계전기 시간-전류곡선은 그림 7과 같이 전동기 속도별 열적한계 곡선과 잘 휘조될 뿐 아니라 전동기 정상기동시 계전기 누적연산치 (식 2의 Q) 역시 0.98이므로 계전기 오동자 현상은 나타나지 않는다.
 $A=11.68, B=1.35, C=2.8, D=1.32, K=1.0, L=15, N=1.02$

4.3 속도감지형 과전류제전기의 보호특성

비정상 기동상태는 전동기의 전기적사고와 전동기 또는 부하의 기계적사고로 크게 나눌수 있으며, 전동기의 전기적 사고는 단락, 지락, 상불명등의 보호계전기에 의해 쉽게 검출될 수 있으므로 검토에서 제외 하였다. 전동기 또는 부하의 기계적사고 양상은 궤극적으로 부하토오크의 증가현상을 초래하므로 비정상기동 상태에 대해서 그림 6의 Curve 1, Curve 2와 같이 변형된 부하속도-토오크곡선을 적용하여 보았다. 전동기의 완전 구속사고에서의 계전기 동작 시간은 8.4초로써 전동기 구속회전자 허용시간 9.5초 이내이 있으며, 그림 6의 Curve 1과 Curve 2의 비정상 부하에서는 각각 기동후 13.8초(전동기속도 38%), 9.6초(전동기속도 16%)에 속도감지형 계전기에 의해 각각 차단됨을 알 수 있었다. 정화한 회전자도체의 온도계산을 위해서는 회전자도체의 열전달과 전동기회전에 의한 냉각효과등 전동기 설계에 바탕가는 복잡한 계산이 소요되므로 도체온도계산은 생략하였다. 그러나 속도감지형 과전류제전기가 전동기 속도별 회전자도체의 열적한계곡선을 충분히 보호하고 있으며 전동기온도 상승효과를 누적연산하고 있으므로 회전자도체의 허용온도이내에 계전기가 충분히 동작한 것으로 사료된다.

5. 결론

부하특성상 고관성을 피할수 없는 경우 전동기보호가 어려워 전동기용량을 증대하거나, 전동기설계를 특수하게 하는등의 대안이 있으나 이 경우 전동기 운전효율은 감소하고 제작비는 증대된다. 따라서, 본 속도감지형 과전류제전기를 사용하면 사실상 불가능했던 고관성부하를 가진 전동기의 완벽한 보호가 가능하므로 전동기 운전비와 제작비를 절감할 수 있다. 마이크로 프로세서 타입 과전류제전기가 이미 실용화 되어있으며, 속도센서(Speed Sensor) 역시 많이 사용되고 있다. 그러므로, 본고에서 제안한 속도감지형 계전기의 실용화는 기술적으로 어렵지 않는것으로 사료된다. 또한 계전기 정정 역시 전동기 제작자가 제시하는 각종 속도별 전동기 열적한계 곡선에 따라 간단하게 Tap 또는 Dial을 조정하면 되므로 간편할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] ANSI/IEEE C37.96-1988, "Guide for AC Motor Protection"
- [2] S.E. Zocholl, "Thermal Protection of Induction Motors Enhanced by Interactive Electrical and Thermal Models", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No.7, July 1984
- [3] A.N. Eliasen, "The Protection of High Inertia Drive Motors During Starting Conditions", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-99 No.4 July/Aug. 1980
- [4] S.S.Waters, "Modelling Induction Motor for System Studies", IEEE Trans. on IA, Vol.IA-19, No.5 Sep./Oct. 1983