

## 과부하 운전 압연용 전동기의 과열 정지 시뮬레이션

\*이성희, \*한무호, \*이왕하 \*\*이치환  
\*포항산업과학연구원, \*\*위덕대학교

### Simulation of Thermal Trip in Mill Driver

\*SeungHee Lee, \*Muho Han, \*Wangha Lee, \*\*Chiwan Lee,  
\*Research Institute of Industrial Science and Technology, \*\*Uiduk University

**Abstract**- In steel plant, load torque of mill driver motor is changed periodically because working state and idle state are repeated and load current of working state is necessarily higher than rated motor current. The over current limiter is one of the basic thermal protection method from over heating.

In this paper, we analyzed the structure of over current limiter for motor and motor driver systems, developed over current limiter with same operation and structured warning system of action of over current limiter. As using this warning system, we can avoid abrupt plant stop by over current limiter in mill driver and lessen producing loss by plant stop. The developed warning system of action of over current limiter is exactly inspected by computer simulation and analysis of acquired data.

### 1. 서 론

전동기는 산업현장에서 가장 많이 사용되는 구성품 중의 하나인데, 기본 기능은 전기에너지를 입력받아 동력에너지를 생성시키는 것이다. 전동기의 출력 토크는 입력 전류에 비례하고, 전동기의 회전속도는 직류 전동기의 경우 입력 전압에 비례하고, 교류 전동기의 경우 입력 전원의 주파수에 관계한다. 그런데, 전동기에 입력되는 전압, 전류 및 주파수는 일정범위로 제한된다.

압연기에 사용되는 전동기의 경우, 압연중인 경우와 휴지중인 경우가 반복, 연속되는 특성을 가지는데, 압연중일 경우의 부하를 기준으로 전동기를 선정한다면 상당히 큰 용량의 전동기가 필요하므로, 휴지 시간을 감안하여 평균 부하는 정격이하이면서 압연중 과부하 운전을 허용하도록 설계한다. 전류 정격의 경우, 온도 상승 문제만 해결된다면 일정 시간 동안의 과부하 운전은 허용된다. 이 때, 과부하 허용량은 압연 주기(pitch)와 압연 지속 시간으로 결정되는데, 전동기의 전류 정격, 과부하 내

량 및 실 운전 전류를 바탕으로 과부하 허용 범위를 초과하는지를 감시하는 장치가 있다. 이 장치를 과열 보호 장치라 한다.

본 논문에서는, 부하 특성상 과부하 운전이 불가피한 대용량 압연용 직류 전동기의 과열 보호 정지 과정을 시뮬레이션하고, 결과 분석을 통해 과열 정지를 방지할 수 있는 안전한 부하율 및 운전 패턴을 찾아낸다. 이에 작업 전류의 실시간 분석을 통해 전동기의 과열 보호 정지 가능성을 추정 경보하여 안정된 압연 작업을 보장할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션 및 구현 장치의 결과를 통하여 타당성이 입증된다.

### 2. 이론적 배경 및 시뮬레이션

과열 보호장치는 전동기의 연속(장시) 전류 정격, 순시 전류 정격 및 한시 전류 정격을 가지고, 운전 전류를 입력받아 전동기의 과열 상태를 계산하는 구조로 구성되어 있다. 과열 판단 계산식은 전동기의 발열량 및 방열량과 관련된다. 전동기나 전동기 구동장치의 경우 순시 전류 정격, 한시 전류 정격 및 설정 시간, 장시 전류 정격을 가지며 그림 1의 그래프와 같은 시간-부하율 특성을 가진다. 과열 보호장치의 구조는 그림 2의 블록도와 같다. 그림 1의 시간-부하율 특성 그래프는 특정 부하율에 대한 허용 시간을 한정시키는 값을 표시한다. 장시 허용 부하율 설정 값은 일정 값으로 제한되고, 한시 부하율 설정 값과 한시 시간 설정 값은 임의의 한 포인트가 지정되고 동일 열용량으로 연결되는 부하율-시간 그래프가 생성된다. 통상적으로 60초 기준 허용 한시 부하율로 표현되는데, 동일시간 기준으로 허용 한시 부하율이 높을수록 더 높은 과부하 운전을 허용하는 것이고, 동일 한시 부하율에 대해서 설정 시간이 길수록 더 높은 과부하 운전을 허용하는 것이다. 한시 설정 시간이 길수록, 한시 설정 부하율이 높을수록 한시 부하율-시간 그래프가 우측 상단으로 이동하는 결과를 가져오는데, 그래프의 안쪽 면적이 전동기 및 전동기 구동장치의 한시

과부하 허용 범위가 커진다. 이러한 허용 부하를 및 시간은 전동기 시스템 제작자가 제공하는 값이다.

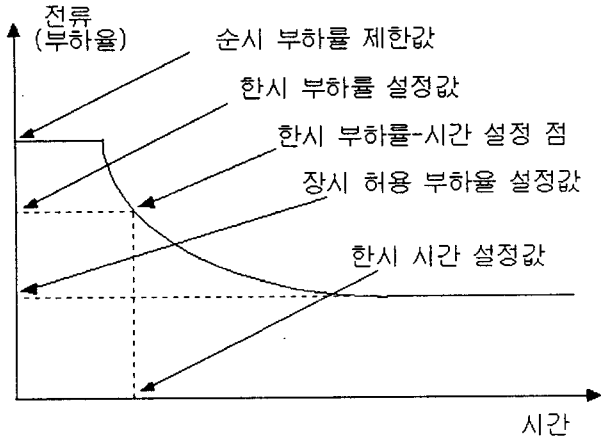


그림 1 시간-부하를 특성 그래프

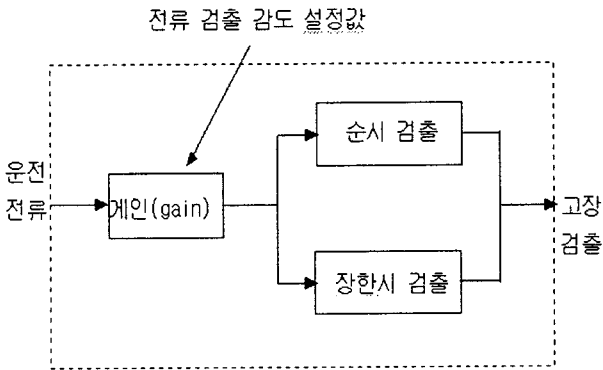


그림 2 과열 보호 장치의 구조

그림 2에 나타낸 과열 보호장치의 구조를 보면 장시 검출과 한시 검출은 하나의 과열 검출 블록으로 되어있고 순시 제한은 분리되어 있는데, 두 블록 중에서 하나만 동작하더라도 고장 검출 신호가 동작한다. 이는 부하율-시간 특성 그래프에서 짧은 시간 영역에서 순시 제한이 동작하는 원리이다. 과열 보호장치의 구조에는 전류 감도라는 블록이 있는데, 이는 전동기 구동장치에서 출력되는 전류 값을 입력받을 때, 가중치를 가미시켜, 고장 검출 신호를 조정하기 위한 것이다. 전류 감도가 1.0 이하로 낮으면 과열 보호장치의 고장 검출 감도가 낮아진다.

부하율-시간 특성 그래프는 열 함수(thermal equation)에 기초하는데, 수식 1과 수식 2로서 표현된다.

$$\theta = I_{run}^2 \left[ 1 - \text{Exp} \left( -\frac{t}{\tau} \right) \right] \quad (\text{식 1})$$

$$\tau = - \left[ \frac{t_{ins}}{\ln \left( 1 - \left( \frac{I_{con}}{I_{ins}} \right)^2 \right) \right]} \quad (\text{식 2})$$

여기서,  $I_{run}$ 는 운전 전류,  $\tau$ 는 열 시정수,  $t_{ins}$ 는 한시 설정 시간,  $I_{ins}$ 는 한시 설정 부하율,  $I_{con}$ 는 장시 허용 부하율이다. 열 시정수는 한시 허용 부하율이 높을수록, 한시 설정 시간이 길수록 큰 값을 가진다. 열 시정수가 큰 값을 가진다는 것은 시스템의 열 용량이 크다는 말이고, 동일 운전 전류에 대한 온도 상승이 늦게 일어난다. 이 방정식은 일정한 부하율이 연속되는 경우의 온도상승을 계산해내는데 유용하나 부하율에 계속적으로 변화하는 경우에는 적절하지 못하다. 그러므로, 실제 사용되는 전동기 시스템의 경우에는 계속적으로 변화되는 운전 전류에 대한 발열량이 계산되고, 자체 발열량과 연계된 축열에 의한 온도 값을 계산해야 한다. 수식 3과 수식 4는 실시간으로 운전 전류를 계측하여 전동기 또는 전동기 구동장치가 허용 범위 내에서 운전되고 있는가를 계산하는 수식이다. 수식 1과 수식 2는 정적 함수(static function)이라면 수식 3과 수식 4는 동적 함수(dynamic equation)이라 할 수 있다.

$$\Delta\alpha = \frac{\text{Exp} \left( -\frac{0.15}{\tau} \right)}{2 \times \tau} \quad (\text{식 3})$$

$$\theta_{(n)} = \theta_{(n-1)} + (I_{run(n)}^2 - \theta_{(n-1)}) \times \Delta\alpha \quad (\text{식 4})$$

수식 3은 수식 2에서 계산되는 열 시정수를 가지고, 0.5초 주기로 반복 수행되는 수식 4의 적분자  $\Delta\alpha$ 를 계산하는 수식이다.  $\theta_{(n-1)}$ 는 0.5초 전에 계산된 온도 값이고,  $\theta_{(n)}$  새롭게 갱신되는 온도 값이다. 계산 주기가 0.5초가 아닌 경우에는 수식 3의 상수 0.15가 변화되어야 한다.

그림 3은 동일한 설정 파라미터에 동일한 운전 전류를 가지는 경우의 온도 상승을 시뮬레이션 한 결과이다. 그림의 위 부분이 수식 1에 의한 결과이고 그림의 아래 부분이 수식 4에 의한 결과이다.

그림 4는 허용 부하율-시간 설정 값을 근거로, 실제 고장검출 신호가 생성되는 과정을 시뮬레이션 결과이다. 한시 설정 값을 175%-60초로 설정하고 운전전류를 정격의 175%로 입력하였는데, 정확하게 60초 경과 후 제한 값에 도달되었다.

여기서, 한계 값 설정은 장시 허용 부하율의 자승 값으로 한다.

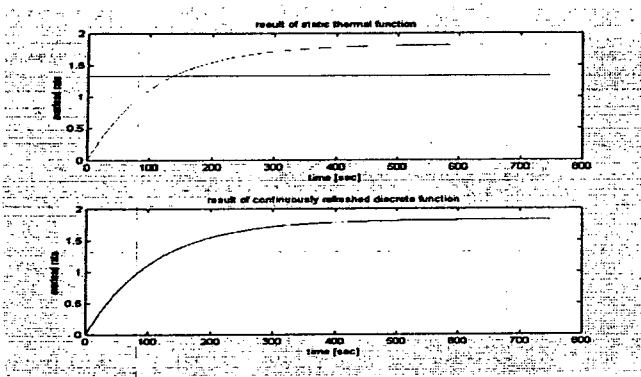


그림 3 동일 부하에 대한 static function과 dynamic function의 동작 시뮬레이션 결과

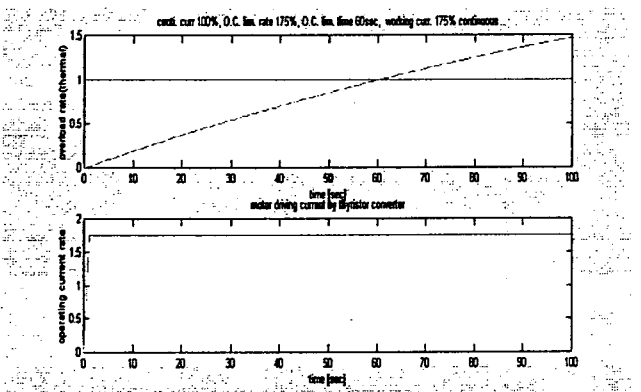


그림 4 175% 60sec 설정 과열보호장치의 동작 결과

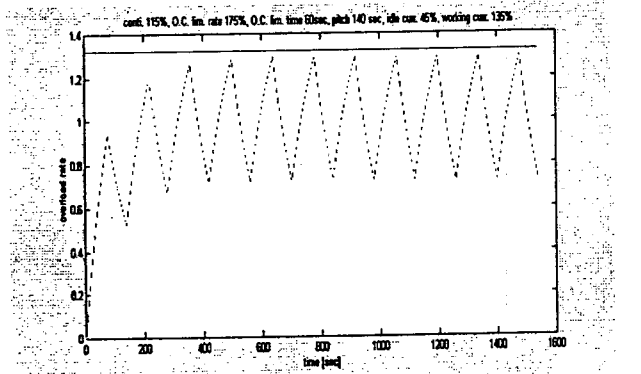


그림 5 과열보호장치의 동작 시뮬레이션(1)

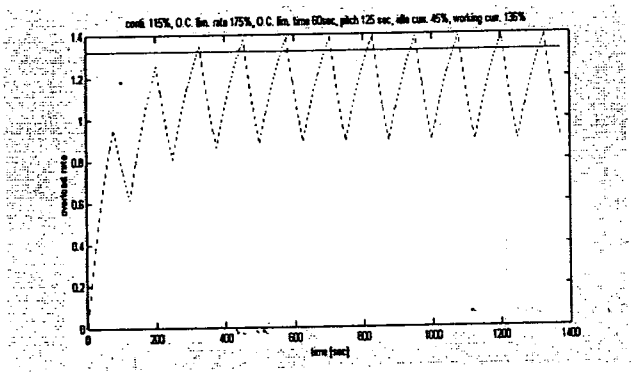


그림 6 과열보호장치의 동작 시뮬레이션(2)

그림 3과 그림 4는 일정한 전류가 지속되는 경우인데, 그림 5와 그림 6은 일정 주기로 변동하는 전류에 대한 시뮬레이션 결과이다.

그림 5의 경우 연속 운전 제한 전류 값이 정격 전류의 115%, 한시 제한 값이 정격 전류의 175%에서 60초 동안, 휴지상태 전류 값은 정격 전류의 45%, 압연상태의 전류 값은 정격 전류의 135%, 압연 반복 주기는 140초인 경우이다. 그림 6의 경우에는 연속 운전 제한 전류 값, 한시 제한 값 및 유지 상태와 압연 상태의 부하율이 같은 조건이나 압연 반복 주기가 125초인 경우이다. 두 경우의 압연 시간은 80초로 설정되었다.

결과를 보면 압연 주기가 140초인 경우에는 한계 설정 값에 도달하지 않았고, 압연 주기가 125초인 경우에는 3번째 작업에서 한계 설정 값에 도달하였다. 동일한 압연 시간을 가지고 압연 주기가 짧아지면 휴지 시간이 짧아지는 것을 의미한다. 압연 시간에는 과부하 운전이 행해지므로 방열량보다 발열량이 많고, 휴지 시간에는 공회전 운전이 행해지므로 방열량보다 방열량이 많다. 전동기 및 전동기 구동장치는 압연 상태와 휴지 상태 사이의 관계에서 열 평형을 이루어 균형을 잡는데, 압연 주기가 짧아지면 그림 6과 같이 한계 값에 도달하게 된다. 같은 작업 주기를 가지고 압연 부하율을 변화시키면, 부하율이 높을수록 빨리 한계 값에 도달한다.

### 3. 실험 결과

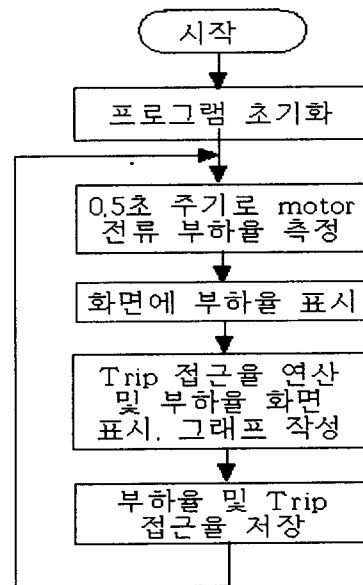


그림 7 과열 보호장치의 동작

시뮬레이션을 통해 신뢰성이 확인된 과열 보호장치는 전류 획득 장치와 PC를 이용해 구현되었다. PC에는 그림 7과 같은 흐름도로 수행되는 S/W가 장착되었다.

그림 8과 그림 9는 구현된 장치에서 얻어진 결과 그래프이다. 대상 전동기는 1200V, 3850A, 4250kW 용량의 압연기에 사용되는 것인데, 두 전동기는 각각 다른 위치에서 동작한다.

두 전동기의 허용 부하율은 정격의 115%로 설정되었다. 그래프의 가로축은 24시간을 나타내고, 세로축은 제한값 도달률을 나타낸다. 그림 8의 그래프에서 잠깐씩 온도값이 0으로 떨어진 구간은 압연 롤 교체로 비교적 긴 휴지 시간을 가지기 때문이다. 그래프에 의한면 과열 보호 기능에 의하여 동작이 멈춰야 하는 상황이 여러 번 발생하였다. 하지만 과전류 경보만 내주고 실제 조업 정지 상황은 발생하지 않았는데, 그 이유는 실제 동작하는 과열 보호장치의 입력 전류 감도가 0.91로 낮게 설정되어 있었기 때문이다.

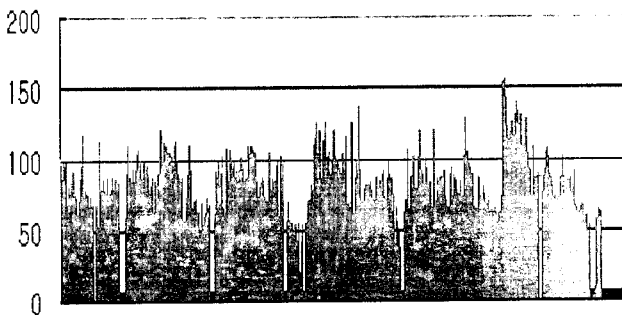


그림 8 과열 보호장치의 출력 그래프 1

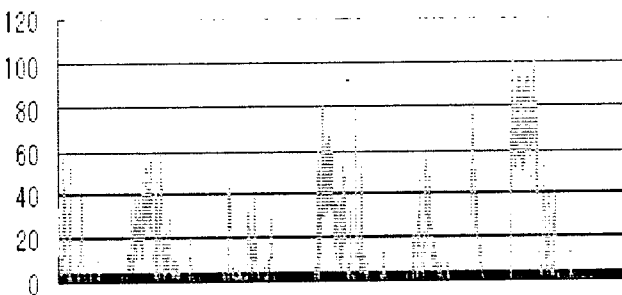


그림 9 과열 보호장치의 출력 그래프 2

#### 4. 결 론

전동기와 전동기 구동장치는 산업현장에서 아주 중요한 설비중의 하나이다. 압연용 전동기의 경우, 생산량 증대를 위해서는 압연시 과부하율을 높이고 휴지 시간을 줄여야 하는데, 과부하율이 높을수록 설비의 열화진행이 빨라진다. 여기서, 설비의 열화진행은 정량화가 어려우며 전동기 및 전동기 구동장치의 전기적 물리적 정격에 의존한 보호체계를 통해 과부하 운전을 제한해야 한다. 과열 보호장치는 전동기 및 전동기 구동장치의 보호체계

중 가장 기본적인 장치의 일부분이다.

본 논문에서는 운전 전류 측정을 통해 전동기 및 전동기 구동장치가 과열되는 것을 막을 수 있는 방안을 제시하고, 컴퓨터 시뮬레이션 및 제작된 장치 동작 결과를 통해 신뢰성이 검증되었다. 본 제안 장치를 통해, 압연 공정에 사용되는 전동기 보호체계를 유지하면서 보다 안정적인 설비운용이 가능해졌다. 향후, 보다 안정적이고 효율적인 설비 운용을 위해서는 전동기 및 전동기 구동 장치의 운전 패턴에 따른 열화도가 정량화 기법 확보 및 최적의 과열 보호장치의 설정 파라미터 획득 기법이 요구된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] "SCR MANUAL Sixth Edition", General Electric, 1979
- [2] Rajendra Kumar Sugandhi and Krishna Kumar Sagandhi, "THYRISTORS Theory and Application", John Wiley & Sons, 1984
- [3] B. R. Pelly, "Thyristor Phase-Controlled Converters and Cyclo-converters", ISBN 0-471-67790-6, John Wiley & Sons, 1976
- [4] Paul D. Taylor, "Thyristor Design and Realization", ISBN 0-471-91178-X, John Wiley & Sons, 1987
- [5] P. C. Sen, "Thyristor DC Drivers", ISBN 0-471-06070-4, John Wiley & Sons, 1981
- [6] David Finney, "The Power Thyristor and its Applications", ISBN 0-07-084533-6, McGraw-Hill Cook Company, 1980
- [7] 대한민국특허 등록번호 10-0221904 "전동기용 보호장치", 독일특허 P4109867.6, Robert Bosch GmbH