

현장 기술자를 위한 유도전동기의 해석 및 고장보호기술 ①

글/유 상 봉 용인송담대학 교수/기술사
전 명 수 (주)한신컨설턴트 전무/기술사
김 정 철 태정시스템 대표/기술사

1. 개요

전동기는 크게 교류 전동기와 직류 전동기로 대별되며, 현장에서 가장 널리 쓰이는 것이 교류 전동기 중에서도 유도전동기이다.

이러한 유도전동기의 사고원인을 분석해 보면 표 1과 같이 기계적인 원인과 전기적인 원인으로 나눌 수 있으며, 현장실무자들의 예방정비(PM) 및 주기적인 정밀검사에 의하여 사고를 예방하고, 또한 전동기 회로 및 특성 해석을 통하여 고장보호 대책을 수립 실시 하여야 한다.

따라서, 실제 현장실무에 종사하는 전기기술자들에게 많은 도움을 줄 수 있도록 유도전동기의 역상회로 해석과 온도상승곡선(Thermal Limit Curve), 불평형 전압의 영향, 고장시 보호방법 등 현장 기술자에게 필요한 기술적인 사항에 대하여 상세히 기술하고자 한다.

표 1 유도전동기의 사고원인 분석

사고 원인	비율(%)
축베어링 마모	22
절연열화	20
과부하	18
결상, 단상운전	21
기 타	19
계	100

(자료 : 일본전기협회 PM연구회)

2. 유도전동기의 특성 해석

유도전동기는 전동기의 1차(Stator) 권선이 전원

에 연결되고, 2차(Rotor) 권선은 1차 권선에 흐르는 전류에 의하여 자기 유도로 전력을 공급받는 구조로 되어 있으며, 회전자 도체는 권선형과 농형으로 대별된다. 권선형의 회전자 권선은 회전자의 철심과 절연되어 있고, 슬립 링을 통하여 외부의 기동장치 또는 제어장치와 연결되도록 되어 있으며, 농형 전동기의 회전자의 도체는 절연이 되어 있지 않고 바(Bar-회전자 도선)로 구성되어 회전자의 양 끝에 있는 링(단락환)으로 단락되어 있으며, 회전자의 슬롯 속에 넣어 있다.

유도전동기의 등가회로는 무부하 손실을 무시하고 s를 슬립이라 할 때 그림 1과 같다. 이 등가회로에서 유도전동기의 정상 임피던스는 다음과 같이 계산된다.

$$Z_{M1} = r_1 + jx_1 + \frac{\left(\frac{r_2}{s} + jx_2\right) \times jx_m}{\frac{r_2}{s} + j(x_2 + x_m)}$$

여기서 $\frac{r_2}{s} = r_2 + \frac{1-s}{s} \times r_2$ 이고, 유도전동기

의 기계적 출력은 $\frac{1-s}{s} \times r_2$ 에 비례한다. 이는 곧

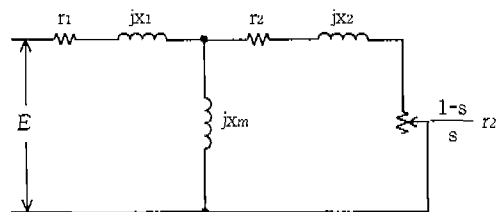


그림 1 유도전동기의 정상 등가회로

s=0(동기 속도)에서 유도전동기의 기계적 출력이 0이 된다는 것을 의미한다. 위 식에서 x_m 을 무한대라고 가정하면 다음과 같이 간단하게 표시된다.

$$Z_{M1} = r_1 + jx_1 + \frac{r_2}{s} + jx_2 = (n + \frac{r_2}{s}) + j(x_1 + x_2)$$

역상전류에 대한 유도전동기의 슬립은 역상 전류가 회전자의 회전 방향과 반대되는 회전 자계를 형성함으로 전동기 회전자에 대하여 역상전류의 슬립은 (2-s)가 되며, 그 등가회로는 그림 2와 같다. 이때, 역상 임피던스 Z_{M2} 는

$$Z_{M2} = r_1 + jx_1 + \frac{(\frac{r_2}{2-s} + jx_2) \times jx_m}{\frac{r_2}{2-s} + j(x_2 + x_m)}$$

가 되고 이식을 간략하게 표시하면

$$Z_{M2} = r_1 + jx_1 + \frac{r_2}{2-s} + jx_2 = (n + \frac{r_2}{2-s}) + j(x_1 + x_2)$$

가 된다

여기서 $r_{1,2}$: 전동기 1차 및 2차 저항

$x_{1,2}$: 전동기 1차 및 2차 리액턴스

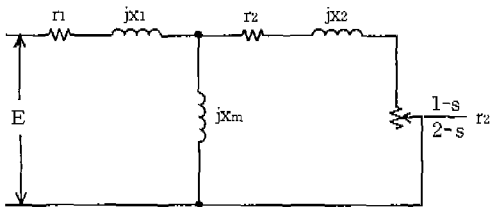


그림 1 유도전동기의 역상 등가회로

전동기의 2차 저항은 슬립 s의 함수로 전동기가 기동이 끝나 운전상태가 되어 s가 적어지면 정상 임피던스 Z_1 는 매우 커지나 역상 임피던스 Z_2 는 전동기 1차 및 2차 저항이 리액턴스에 비하여 상당히 작음으로 $\frac{r_2}{2-s}$ 가 s=0 때나 s=1 때에도 큰 변화가 없으므로 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. 전동기의 정상 및 역상 임피던스와 슬립 s의 관계는 그림 3과 같이 된다.

또 s=1일 때(구속시)의 정상 및 역상 임피던스는

$$Z_{M1} = r_1 + jx_1 + \frac{(r_2 + jx_2) \times jx_m}{r_2 + j(x_2 + x_m)}$$

$$Z_{M2} = r_1 + jx_1 + \frac{(r_2 + jx_2) \times jx_m}{r_2 + j(x_2 + x_m)}$$

가 되어 $Z_{M1} = Z_{M2}$ 임을 알 수 있다. 이제 전동기에 평형 3상 전압이 인가되어 기동전류가 정격 전류의 6배가 흘렀다고 하면, 이 전동기의 s=1에서의 정상 임피던스는 $\frac{1}{6} \times 100 = 16.7\%$ 임으로 역상 임피던스는 167%이 된다. 운전 중에는 정상 임피던스와 역상 임피던스의 비는 약 6:1 임을 알 수 있다.

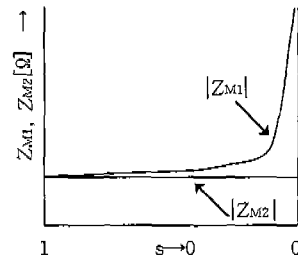


그림 3 s와 Z_{M1} 및 Z_{M2} 의 관계

3. 유도전동기의 기동

3-1. 기동시간

전동기의 기동시간은 기계의 관성 모멘트에 비례하고 전동기의 가속 토크에 반비례한다. 기동시간 t_s 는

$$t_s = k \frac{GD^2}{T}$$

여기서 GD^2 : 기계의 관성 모멘트

T : 전동기의 가속 토크

k : 계수

가속 토크는 전동기의 토크와 부하 토크의 차이이며 그림 4의 사선부분에 해당된다. 따라서 전동기의 기동시간은 전동기 제작자로부터 제출 받아야 한다. 여기서 M_T 는 전동기 토크 L_T 는 부하 토크이다.

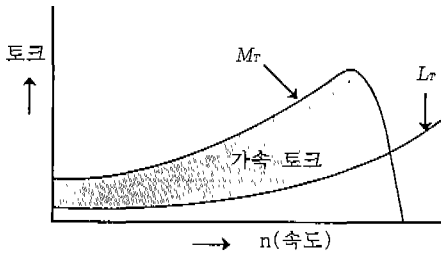


그림 4 전동기의 가속 토크

3-2. 연속기동 회수

NEMA에서 전동기 기동에 대하여 다음과 같이 규정되어 있으며, 전동기 제작자는 특별한 요청이 없는 경우에는 이에 따라 제작한다.

- ① 전동기의 온도가 주위온도와 같은 상태에서는 2회 연속기동(2 Cold Starts)
- ② 정격 온도에서는 1회 기동(1 Hot Start)

농형 전동기에서는 이 규정에 의하나 권선형 전동기에서는 기동전류가 정격전류의 150~200%이내 임으로 기동회수는 전동기 권선 온도보다는 2차 저항기의 온도상승에 제약을 받는다. 2차 저항기의 온도상승은 저항기의 부하시간을 즉, % ED (Einschalt Dauer)에 의하여 결정된다.

부하시간율은 다음과 같이 계산한다.

$$\% ED = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \times 100$$

여기서 t_1 : 운전시간

t_2 : 정지시간

만일 운전시간이 1분이고 1분 후 다시 기동한다면 % ED가 50%이어야 한다. 저항기 제작자는 특별히 % ED에 대하여 언급하지 않았을 때에는 20%로 제작하는 것이 일반적인 관례이다.

3-3. 기동전류 - 시간특성

전동기 기동전류는 대체로 정격 전류의 3~8배로 이 전류가 전동기가 그림 5와 같이 운전속도의 85% 전후에 도달할 때까지 거의 변함이 없이 흐르다가 그 후에야 급격히 감소하여 정격전류에 도

달하게 된다.

전동기의 기동시간은 부하의 토크 특성에 따라 다소 차이가 있으나 길어야 10초 전후임으로 이와 같이 짧은 시간 동안 큰 기동전류에 의하여 발생한 열량은 전동기 철심과 프레임에 통하여 방산될 수 없으므로 권선에 축적된다.

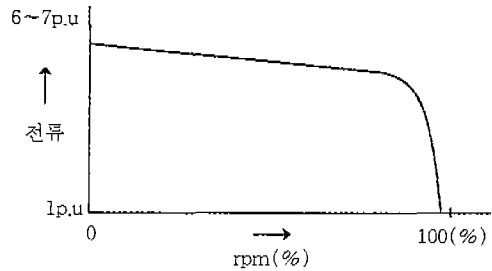


그림 5 기동 회전수와 기동전류

또 전동기의 기동시간은 전동기의 단자에 인가 되는 전압에 관계가 있으며 전압이 낮아지면 기동시간은 길어진다. 따라서 보호계전기의 정정에 있어서 기동시간을 트립 조건으로 할 때에는 기동시의 전압 강하에 각별히 유의하여야 한다.

4. Stall, 회전자 구속

전동기 부하의 토크가 증가하여 부하 토크가 전동기의 최대 토크점을 초과하면 전동기는 그 속도가 급격히 감소한다. 속도가 감소하여 거의 정지상태에 이르게 되는데 이런 현상을 Stall이라고 한다.

부하 토크의 과다 또는 다른 어떤 원인으로 전동기에 Stall 현상이 발생하면 전동기에는 정격전류의 수배가 되는 전류가 흐르므로 전동기가 과열하는 것은 당연하다. Stall은 운전중 회전자 속도의 급격한 저하임으로 되도록 빨리 차단하여야 한다. 다만 Stall 전류는 구속 전류보다 다소 작으며 기동 실패와는 다름으로 Stall 보호는 전동기 전용 보호계전기로만 가능하다.

전동기의 기동 실패는 여러 가지 원인이 있을 수 있다. 전기적으로 지나친 저 전압에 기인할 수도 있고, 기계적인 문제에 기인할 수도 있다. 전동기 기동시간은 부하특성과 인가 전압에 따라 변함

으로 기동시간이 길어졌다는 것이 곧 기동 실패라고 할 수 없는 경우가 있으므로 기동중 계전기가 동작하는 일이 없도록 주의하여야 한다.

회전자 구속시간은 스테이터 또는 회전자 온도 상승에 의하여 정하여 지는데 대형 전동기에서는 회전자 온도상승이 제한 요인이 되는 경우가 종종 있다. 전동기의 구속시간은 전동기 제작자가 제출하는 온도상승곡선(Thermal Limit Curve)에 표시되어있다.

기동전류는 구속전류와 그 크기가 같고 기동시간 또한, 수초에 불과함으로 권선의 온도만을 상승시킨다. 이 상승된 권선 온도는 시간의 경과에 따라 전동기 자체의 온도와 평균화되어 포화온도에 이른다. 기동시간을 t_s , 구속허용시간을 t_c , 전동

기 권선의 포화온도를 θ_f 이라 할 때 기동시의 권선 온도상승 θ 는 대체로 보아

$$\theta = \theta_f \times \frac{t_s}{t_c} \text{ 가 된다.}$$

따라서 전동기의 Hot Start 시에는 기동전 운전으로 가지고 있는 열로 인하여 전동기의 권선이 기동시간 동안 허용 최고 온도를 초과하지 않도록 보호할 필요가 있으며 디지털 MPR (Motor Protection Relay)에는 이와 같은 기능이 있다.

5. 온도상승곡선(Thermal Limit Curve)

온도상승곡선(Thermal Limit Curve)은 전동기의 전류와 최고 허용온도까지 상승하는데 소요되는 시간 관계를 나타내는 곡선으로 전동기의 전류-온도 특성곡선이다. 따라서 계전기의 동작곡선은 이 곡선의 밑에 있어야 전동기는 안전하게 보호된다. 이 곡선은 전동기 제작자가 제시하여야 하며, 이 곡선은 전동기가 주위온도와 같을 때의 기동과 운전 중일 때의 2가지 곡선으로 되어 있다. 이 곡선에서 전류 값이 정격전류의 3 배 전후의 전류를 중심으로 그 이하는 전동기의 과부하 영역 그 이상은 전동기의 Stall 상태라고 할 수 있다. 이 곡선은 보호 협조의 기준이 된다.

그림 6은 온도상승곡선(Thermal Limit Curve)의 예이다. 그림에서 C점을 Safe Stall Time at Cold Condition 또는 냉간 허용 구속 시간(Lock Rotor Time), H점을 Safe Stall Time at Hot Condition 또는 열간 허용 구속시간이라 한다. 이 시간은 전동기에 구속전류(=기동전류)가 흐를 수 있는 최대 허용시간이 된다. 따라서 전동기의 과부하 보호 곡선은 이 온도상승곡선(Thermal Limit Curve)과 기동시간 사이의 공간에 들어 가도록 정정하면 된다.

○ 다음호에 계속 됩니다

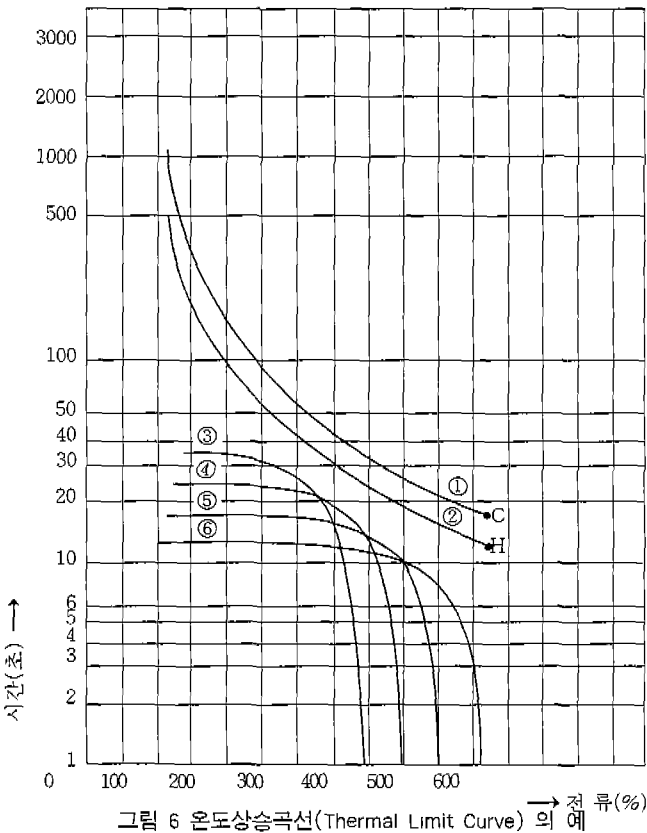


그림 6 온도상승곡선(Thermal Limit Curve)의 예

① Cold Curve ② Hot Curve

기동전류 - 기동시간 특성

③ At 70% Voltage ④ At 80% Voltage ⑤ At 90% Voltage ⑥ At 100% Voltage