

현장기술자를 위한 유도전동기의 해석 및 고장보호기술 ②

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

6. 불평형 전압의 영향

6-1. 전압 불평형률과 역상전류

전동기에 있어서 단자전압의 불평형은 전동기에 역상전류를 흐르게 한다. 전동기의 온도상승에 영향을 주는 것은 이 역상전류이다.

$s=1$ 에서 전동기의 역상 임피던스 Z_{M2} 는 정상 (Positive) 임피던스 Z_{M1} 과 같다는 것은 앞에서 설명한 바와 같다. 전동기가 정상운전중일 때에는 역상 임피던스 Z_{M2} 가 정상 임피던스 Z_{M1} 에 비하여 매우 작아서 정상 임피던스 Z_{M1} 를 1pu로 했을 때 0.2pu 가량 된다.

기동전류가 정격전류의 6배인 전동기에 있어서는 $s=1$ 에서 정상 임피던스 Z_{M1} 가 0.167pu이므로 역상 임피던스 Z_{M2} 가 0.167pu이 되어 불평형 전압에 의한 역상전압이 3%이라면 역상전류 I_2 는 정상전류의 $I_2=3 \times 6=18\%$ 가 되고, 역상 임피던스 Z_{M2} 가 0.2pu인 전동기에 있어서는 15%가 됨을 알 수 있다.

전동기에 있어서는 정상전류는 부하전류와 차이가 별로 없고 역상전압의 비율은 그대로 전압 불평형률이라 보아도 되므로 이 값을 부하전류와 역상전류의 비라고 할 수 있다.

또한, 이제 전동기에 지락사고가 없다고 하면 영상전류(Zero Sequence Current)는 없으므로 전압 불평형률과 역상전류는 표 2와 같다.

표 2 전압 불평형률과 역상전류의 관계

전압 불평형률	역상 임피던스	역상전류
3%	20%	15%
3%	16.7%	18%
5%	16.7%	30%

3상 불평형 전류에서 역상전류는 개략적으로 다음과 같이 비례식으로 구한다.

즉, 결상운전시 전류 불평형률이 100%이고 이때 역상전류는 선전류의 57.74%이므로

$$\text{불평형률} = \frac{100}{57.74} \times \text{NPS}$$

여기서 NPS는 역상전류 (Negative Phase Sequence Current)의 약자이다. 보호 계전기의 종류에 따라 전압 불평형률, 전류의 불평형률, 역상전류 정정 등 다양함으로 주의를 요한다.

6-2. 유도전동기의 결상 운전

전압 불평형의 극단적 예가 결상으로 그림 7과 같다. 결상은 전압, 전류 모두 불평형률이 100%이다. 결상은 전동기 보호용 퓨즈의 용단, 스위치 접점의 이탈 등으로 쉽사리 일어나는 사고이다. 결상회로의 등가회로는 그림 8과 같다.

이 그림은 유도전동기의 여자 임피던스를 무시

하고 그런 것이다. 불평형률은 다음과 같이 계산한다.

$$\text{불평형률} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \times 100[\%]$$

여기서 I_{\max} : 3상 중 최대전류

I_{\min} : 3상 중 최소전류

A상 결상시의 각상 전류를 계산하여 보면 I_0, I_1, I_2 를 각각 영상전류, 정상전류, 역상전류라 할 때

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0$$

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2$$

$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2$$

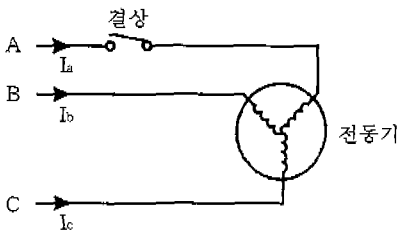


그림 7 결상회로

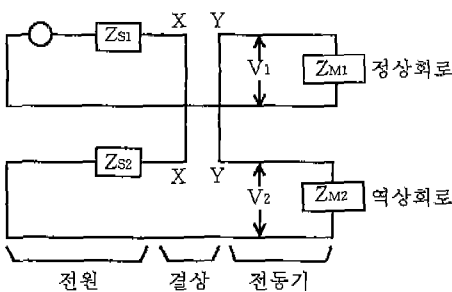


그림 8 등가회로

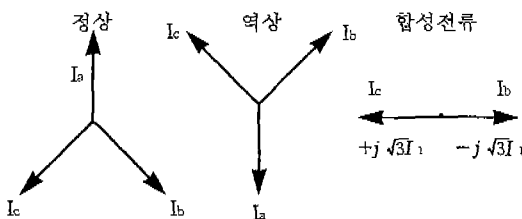


그림 9 결상시의 벡터도

여기서 지락사고가 없으므로 $I_0 = 0$ 이고

또한 $I_a = 0$ 이다.

따라서 $I_b = -I_c$ 이며,

$$I_b + I_c = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 + I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = (a+a^2) I_1 + (a+a^2) I_2 = 0$$

$$\therefore I_1 = -I_2 \quad (a + a^2 \neq 0 \text{ 이므로})$$

$$I_a = 0$$

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2$$

$$= \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) I_1 - \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) I_1$$

$$= -j\sqrt{3} I_1 = -j 1.732 I_1$$

$$I_c = -I_b = +j\sqrt{3} I_1 = +j 1.732 I_1$$

$$\text{여기서 } a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$1 + a + a^2 = 0 \text{ 이 된다.}$$

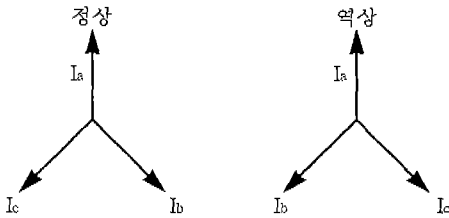
이제 이 식을 자세히 검토하여 보면 그림 9와 같이 정상전류와 역상전류는 선전류의 $\frac{1}{\sqrt{3}} \times 100 = 57.74\%$ 로 그 크기가 같고 서로 60° 를 이루고 있음을 알 수 있다. 즉 선전류의 불평형률이 100%일 때 역상전류의 크기는 선전류의 57.74%가 된다. 결상시 유도 전동기는 역상전류에 의하여 전동기의 토크가 크게 감소하고 또, 기동 토크가 없으므로 정지중인 전동기는 기동은 할 수 없으나 경부하로 운전중인 전동기는 그 전류는 증가하나 회전은 계속된다.

6-3. 역상전류와 전동기 온도

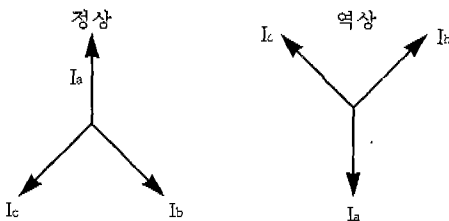
NEMA에서는 전압 불평형률이 1%인 경우는 전동기 용량 감소를 고려하지 않아도 되나 3%일 때 용량감소 계수 0.9, 4.4% 불평형일 때 0.8을 적용하도록 되어 있다. 그러나 전류 불평형에 대하여는 그 허용값에 대한 규정은 없다. 역상전류는 불평형 전압 뿐만 아니라 스테이터 권선의 증간 단락과 같은 불평형 부하에서도 발생한다. 전동기 온도상승의 원인은 불평형 전압에 의한 역상전류이다. 따라서 계전기에 따라 역상 보호 요소로 전

압 불평형을 채택한 경우와 전류 불평형(역상전류)을 채택한 2가지 형태가 있다.

이제 정상전류와 역상전류가 그림 10의 (a)와 같이 A상이 동상인 역상전류가 30%인 때를 보면



(a) A상이 동상일 때



(b) A상이 180°일 때

그림 10 정상전류와 역상전류의 위상

A상 전류는 전압 평형시의 1.3배, B상과 C상 전류는 0.89로 감소되어 발열량은 A상은 전압 평형시의 1.69배, B상과 C상은 0.79배로 되어 평균 발열량은 약 9% 증가한다. 역상전류 30%는 대체로 전압 불평형률 5%에 해당한다. 그림 10의 (b)와 같이 A상이 180°인 경우 A상 전류는 전압 평형시의 0.7배, B상과 C상은 1.39배로 되어 평균 발열량은 이때에도 9%가량 증가한다. 이는 곧 이 정도의 불평형으로 인한 역상전류만으로는 일반 범용 전동기의 1차 권선에는 치명적 영향을 미친다고 할 수 없으나 대형 전동기로서 중(重)부하인 경우에는 문제가 될 수 있다는 것을 의미한다.

그러나 역상전류가 가장 영향을 미치는 곳은 전동기의 회전자이다. 역상전류가 만드는 회전자계는 회전자의 회전방향과 반대방향이므로 회전자 도선(Bar)에 $(2-s) \times f$ 인 주파수의 전류, 곧 120Hz의 전류를 흐르게 한다. 이와 같은 높은 주파수로

인한 표피효과(Skin Effect)로 회전자 도선(Bar)의 저항은 매우 커진다. 실제의 저항값은 주로 회전자 슬롯(Slot)의 깊이에 따라 증가한다. 회전자의 발열량은 회전자 도선의 저항에 직선적으로 비례하여 증가함으로 역상전류가 흐르게 되면 회전자의 온도는 상승하게 된다. 실험결과에 의하면 NEMA Design 1과 2 전동기는 100% 부하에서 전압 3% 불평형일 때 여전에 따라 다소 다르나 최악의 상태에서 회전자 손실은 평형 전압일 때의 1.17배 스테이터 손실은 1.09배, 전압 5% 불평형에서 회전자 손실은 1.38배 스테이터 손실은 1.19배로 회전자 손실이 훨씬 커진다. 따라서 전동기 보호를 위한 역상전류 정정값은 전동기의 Negative Sequence Thermal Withstand Curve에 의하여 정하여 지는 것이 타당하다고 볼 수 있다.

발전소에서는 전압 불평형률 5%(=역상전류 30%) 정도를 소형 전동기의 운전 허용 한계로, 3%(=역상전류 15%) 정도를 대형 전동기의 운전 한계로 하고 있다. 위의 실험 결과에 의하면 100% 부하에서 역상전류 15%일 때 전동기 손실 증가는 부하 전류 1.131배 증가에 해당한다. 이는 대체로 과전류 정정 점인 115%와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그림 11은 Negative Sequence Thermal Withstand Curve의 한 예다.

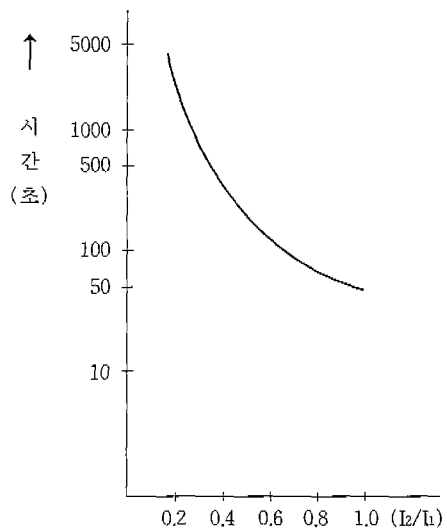


그림 11 Negative Sequence Thermal Withstand Curve의 예

7. 유도전동기의 고장 보호

전동기 고장 유형별 보호에 대해서는 ANSI/IEEE에 자세히 기술되어 있으며, 우리나라에서는 현장에 따라 다르나 전동기 용량 75kW 또는 150kW 이상을 고압으로 하고 그 이하는 저압으로 하는 경우가 대부분이다.

저압 전동기는 일반적으로 열팽창계수가 다른 2개의 바이메탈이 근접한 히터에서 발생하는 Joule 열에 의하여 단속되는 기계적 힘을 이용, 점점을 개폐하는 재래식 열동형 계전기를 사용하여 왔으나, 전동기가 설치되어 있는 현장과 조작 패널이 분리되어 있고 또 패널 내부의 온도상승으로 정확한 보호가 어려운 점, 그 기계적인 동작에 따른 기능의 제한 등으로 점차 전자화된 전자식 과전류 계전기의 사용이 증가하고 있는 추세이다.

전자식 과전류 계전기는 디지털화 된 정지형 계전기로 과부하 보호 기능뿐만 아니라 전동기의 운전 상태를 감시하는 기능과 사전 경보 기능을 가지고 있는 점에서 상당히 발전된 보호계전기라 할 수 있다.

전동기의 전용 디지털 계전기 MPR은 온도 상승의 주 원인이 되는 과부하, Stall, 기동, 역상 등을 주보호 대상으로 하고, 여기에 단락, 지락보호 등 계통보호 계전 요소와 과전압, 저전압 계전기를 갖추고 있다. 퓨즈를 사용한 경우는 계전기의 순시 정정은 폐쇄한다. 전동기에 소요되는 계전 요소들을 정리하면 표 3과 같다.

이와 같은 광범위한 계전 요소의 정정에는 전동기에 대한 충분한 사전 정보가 있어야 한다. 이에 따라 전동기 제작자가 제출하여야 할 데이터는 다음과 같다.

- ① 전동기의 정격사항 즉, 전압, 역률, 용량, 회전수 등
- ② Thermal Limit Curve, 허용구속시간 등과전류영역에 관한 사항
- ③ 기동시간, 기동전류 등 기동특성
- ④ NPS Thermal Limit Curve
- ⑤ 정격 토크 및 Break Down Torque
- ⑥ 계통 해석을 위한 Open Circuit AC Time Constant, Short Circuit DC Time Constant,

Short Circuit AC Time Constant 등이다.

그 외에 전동기 보호에는 부족 전류계전기(37), 단속계전기(66) 등이 쓰이고 있다. 부족 전류계전기는 펌프의 공운전이나 V벨트 연동 기계에서 V벨트가 끊어지는 경우 등 수중 펌프를 제외하고는 기계 보호측면이 많고, 단속계전기는 혼동 운전(Inching Drive)처럼 반복 운전을 계속하는 경우 개폐기의 투입 개방시간을 조정할 때 쓰인다. 유도 전동기를 정지하였다가 개로 교류 시정수(Open Circuit AC Time Constant) 이내에 재투입하면 전동기 잔류전압과 투입전압의 위상이 다를 때에는 큰 돌입전류가 흘러 퓨즈의 용단 또는 개폐기를 손상시킬 우려가 있기 때문이다. 개로 시정수는 전동기의 용량에 따라 다르나 대체로 0.2~0.7초 정도이지만 수천 kW의 대형 전동기에서는 1.2초를 넘은 예도 있다.

또, 100kW 이상 되는 대형 전동기는 차동 계전 방식으로 보호한다. 차동 계전기의 보호대상은 전

표 3 전동기의 보호

보 호 항 목	수 량	ANSI Device No
① 과부하		
열동 과부하 계전기	2 또는 3	49
반한시성 과전류 계전기	2 또는 3	50/51
온도 계전기(권선용)	1 또는 3	49T
② 회전자 구속보호		
순시요소부 과전류 계전기	1	50/51
③ 단락보호		
순시요소부 과전류 계전기	2 또는 3	50/51
④ 지락보호		
반한시성 과전류 계전기	1	50/51G
방향성 지락 계전기	1	67
⑤ 불평형보호		
상 전류 평형 계전기	1	46
역상 전압 계전기	1	47
⑥ 저전압보호		
순시 저전압 계전기	1	27
시간지연 저전압 계전기	1	27
⑦ 보조 계전기		
진동 계전기	1	39
속도 계전기	1	12/14

동기 내부의 지락과 단락으로 차동보호가 주보호가 된다.

유의할 점은 차동 계전기로는 과부하나 회전자 고장과 동일 권선의 층간단락(turn to turn layer fault)은 검출되지 않는다는 것이다. 회전자 결상은 Goerges 현상이라 하여 운전중일 때 회전자가 결상이 되면 1차 전류와 토크가 불안정하여 1차 전류가 크게 진동한다.

차동보호에는 2가지 방식이 있는데 하나는 전류 차동보호이고 다른 하나는 Flux-Balancing Current Differential 방식이다.

그림 12는 전류차동방식이고 그림 13은 Flux-Balancing Current Differential 방식을 보여 주고 있다.

전자는 CT가 배전반 속에 설치되어 있으므로

케이블이 계전기의 보호 범위에 들어가나, 후자는 CT가 전동기에 내장되어 있으므로 케이블은 보호 범위에 속하지 않는다.

Flux-Balancing Current Differential 방식이 경제적이고 설비도 간단함으로 보편적으로 채택되고 있으며 계전기로는 전압 차동계전기나 High Drop 과전류 계전기를 사용한다. 일반 자가용 설비에서는 전압 차동계전기가 많이 쓰이고 있으나 발전소에서는 High Drop 과전류 계전기도 사용되고 있다. 이때에 사용되는 CT는 3개가 그 특성이 같아야 하고 특별한 경우를 제외하고는 다른 계전기와 공용하지 않는 것이 좋다. High Drop OCR로는 순시특성이 이용된다.

● 다음호에 계속 됩니다

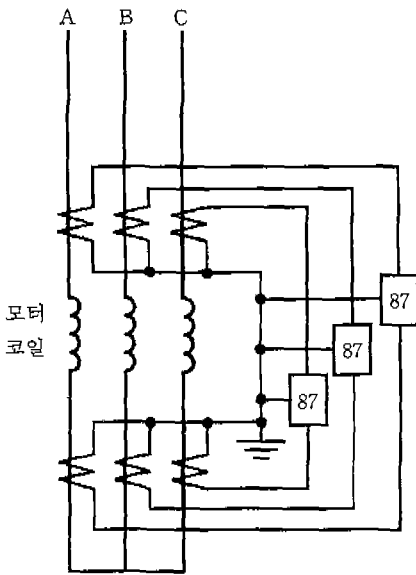


그림 12 차동계전방식

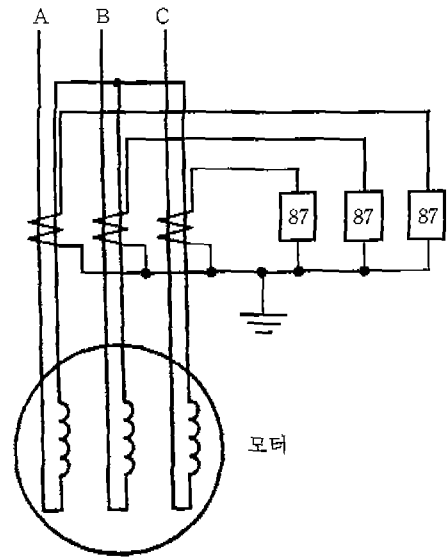


그림 13 Flux-Balancing Differential 방식