

3상 히터의 불평형전류 검출에 의한 결함예측 및 보호장치의 선정

이문형[†] · 정재희

서울과학기술대학교 안전공학과

(2014. 11. 13. 접수 / 2014. 12. 10. 수정 / 2015. 1. 2. 채택)

Fault Prediction Based on Unbalanced Current Detection of Three Phase Heater and Selection of the Protective Device

Mun Hyung Lee[†] · Jae Hee Jung

Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received November 13, 2014 / Revised December 10, 2014 / Accepted January 2, 2015)

Abstract : Three phase heaters in 7 buildings of 2 sites were examined for precise diagnosis. The sample size was 626. Precise examinations of current and the heater wiring status revealed contact failures and arcs in equipments that had CUF larger than 10%. Contact failures and arcs may cause electrical fire. Therefore, the correlation between the CUF and the imperfections in heater equipment and its wiring was analyzed for three phase heaters. In addition, the protection devices used for detection of heater imperfections were found to be unsuitable for the purpose. Current status of the protection devices was analyzed, and suggestions for improvements were made for new standards of the protection device selection.

Key Words : electric fire, heater fault detector, plating

1. 서론

도금, 세정 및 건조 작업 등에서 많이 사용되고 있는 3상히터의 경우 대부분 동일 용량의 히터 3개회로를 델타(Delta) 또는 와이(Wye)로 결선하여 사용하고 있기 때문에 이상이 없는 한, 각 상의 부하전류가 동일하게 흐르는 것이 정상이다. 하지만 일부 히터 내부의 단선, 지락 또는 배선의 결함이 생기면 불평형전류가 흐르게 되며, 발열량의 감소에 의한 제조공정상의 불량이나 수율의 저하 등의 문제점이 발생하게 된다. 특히 히터 결선부의 접속불량은 발열과 아아크 등의 발생으로 인하여 주변의 가연성 분진이나 가연성 부속물에 의하여 출화하는 경우가 발생하기도 한다. 따라서, 3상히터 회로에 결함을 검출하기 위한 보호장치를 사용하고 있으나, 대부분 전동기 회로의 결상시 과부하전류를 검출하여 차단시키는 보호장치를 선정하여 사용하고 있어서 결상 시에도 과전류가 발생하지 않는 히터부하에서는 정작 히터단선, 접속 불량 등이 발생하여도 보호장치가 동작되지 않는 경우가 많다. 본 논문에서는 도금, 세정, 건조설비 등에 설치된

2개 사업장 7개 공장건물에 설치된 626개의 3상히터에 대한 정밀진단 결과를 바탕으로 하여 전류 불평형률과 원인을 분석하고, 3상히터의 결함을 검출하는 보호장치 선정에 대하여 논하고자 한다.

2. 히터/히터봉/가열장치에서의 화재현황

2009년부터 2013년까지 5년간 국내에서 산업용 “히터/히터봉/가열장치”에서 발생한 화재는 모두 1,252건

Table 1. Fire in the Industrial “heater / heater rods / heating unit”¹⁾

Year	Number of Accidents	Casualties		Property Damage (thousand won)
		Death	Injury	
2009	252	0	4	1,712,981
2010	219	0	3	1,020,903
2011	258	2	0	2,022,208
2012	277	1	4	2,043,599
2013	246	0	2	4,011,891
Total	1,252	3	13	10,811,582

[†] Corresponding Author : Mun Hyung Lee, Tel : +82-10-2535-0772, E-mail : exit2safety@korea.com

Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

(전체화재의 1.59%)으로 약 108억원의 재산피해와 16 명의 사상자가 발생하였다.

또한, 2013년도에 발생한 전기화재 중에서 접촉불량에 의한 화재가 757건이 발생하여 전체 전기화재의 8.5%를 점유하였다²⁾.

3. 3상히터의 결함에 따른 부하전류의 변화

히터의 구조, 종류, 용도와는 관계없이 3상 히터는 동일한 용량의 히터 3개 또는 여러 개의 히터를 3조로 구성하여 델타(Delta) 또는 와이(Wye) 결선을 하여 사용한다.

또한, 히터의 제어회로는 Fig. 1과 같이 온도를 측정하고 설정된 온도와 비교하여 전원을 개폐해주는 온도 조절장치와 전자접촉기(Magnet Contactor) 또는 SSR (solid state relay), CT를 사용하여 전류를 측정하고 결함이 발생하였을 경우 전원을 차단하는 보호장치로 구성되어있다.

3.1 불평형 Δ결선에서의 부하전류

각 상의 히터가 서로 같은 용량으로 구성 되어 있기 때문에 정상적인 평형상태의 3상 전원이 공급되면 각 상의 선간전류는 모두 같게 된다.

하지만 Fig. 2와 같이 Δ결선에서 1상의 배선 또는 1상의 히터에 결함이 생기면 전류불평형이 발생하게

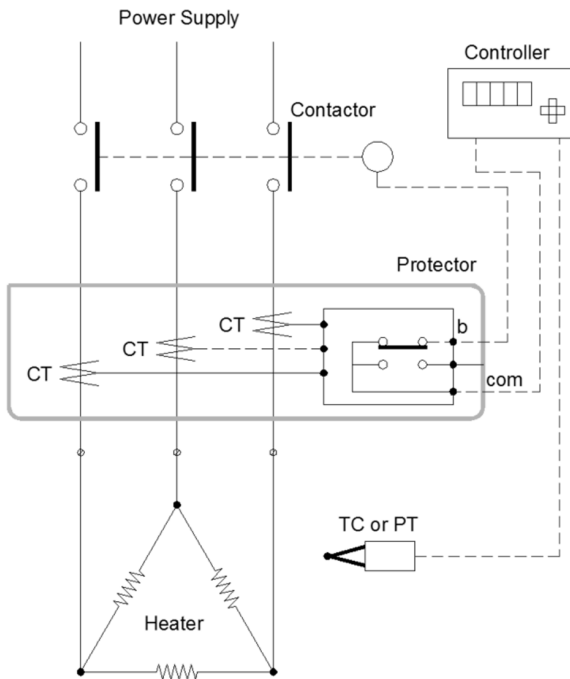


Fig. 1. Control circuit of three phase heater.

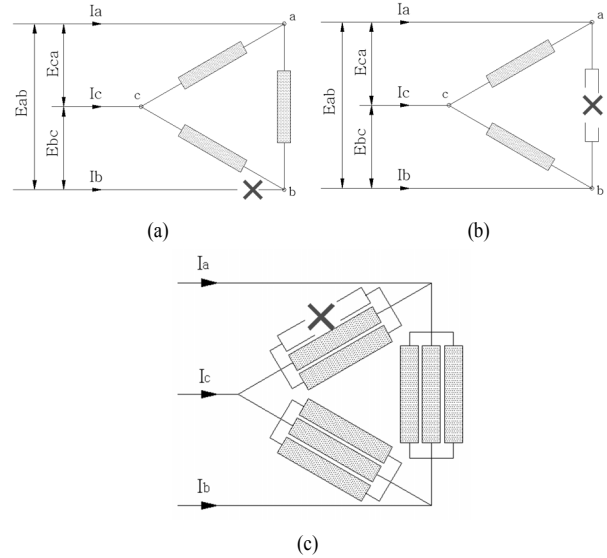


Fig. 2. Defects in Delta-wiring.

되며, 각 상의 전류는 식(2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{E}_{ab}}{\dot{Z}_{ab}}, \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{E}_{bc}}{\dot{Z}_{bc}}, \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{E}_{ca}}{\dot{Z}_{ca}} \quad (1)$$

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \quad (2)$$

3.2 불평형 Y결선에서의 부하전류

Fig. 3과 같이 Y결선에서 1상의 배선 또는 1상의 히터에 결함이 생기면 전류불평형이 발생하게 되며, 각 상의 전류는 식(3)-(5)와 같이 계산할 수 있다.

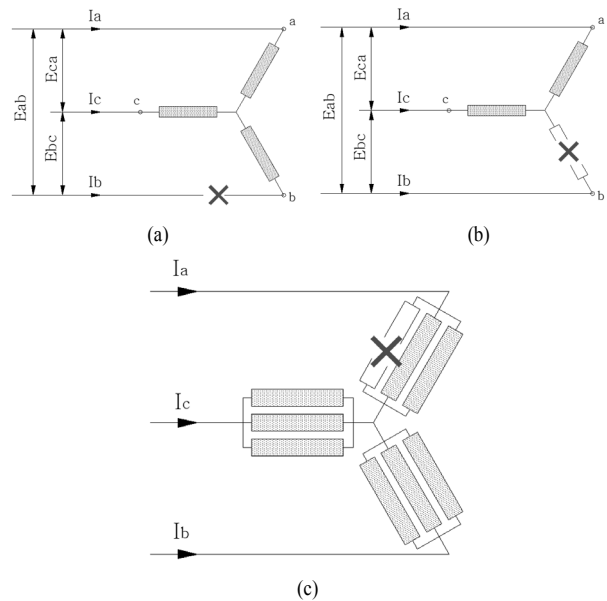


Fig. 3. Defects in Wye-wiring.

$$i_a = \frac{\dot{E}_{ab}(\dot{Z}_b + \dot{Z}_c) + \dot{E}_{bc}\dot{Z}_b}{\Delta} \quad (3)$$

$$i_b = \frac{\dot{E}_{bc}(\dot{Z}_c + \dot{Z}_a) + \dot{E}_{ca}\dot{Z}_c}{\Delta} \quad (4)$$

$$i_c = \frac{\dot{E}_{ca}(\dot{Z}_a + \dot{Z}_b) + \dot{E}_{ab}\dot{Z}_a}{\Delta} \quad (5)$$

단, $\Delta = \dot{Z}_a\dot{Z}_b + \dot{Z}_b\dot{Z}_c + \dot{Z}_c\dot{Z}_a$

$$\text{설비불평형률} = \frac{\text{각 간선에 접속되는 단상부하 총설비용량의 최대와 최소의 차}}{\text{총부하설비용량의 1/3}} \times 100 \quad (6)$$

대부분의 히터 결상보호에 사용하는 장치에서 전류 불평형률(Current Unbalance Factor)을 계산하는 방식은 식(7)과 같은 방식⁴⁾을 적용하고 있다.

$$\%CUF = \frac{\max(I_a, I_b, I_c) - \min(I_a, I_b, I_c)}{\max(I_a, I_b, I_c)} \times 100 \quad (7)$$

3.3 3상히터의 전류 불평형률 (%CUF : Current Unbalance Factor)

일반적으로 3상3선식 또는 3상4선식의 부하의 설비 불평형률을 계산하는 방식³⁾은 식(6)과 같은 방식을 주로 사용하지만,

따라서 본 논문에서 히터의 전류불평형률의 계산에는 식(7)을 적용하였으며, Δ 결선 또는 Y결선의 히터의 결함에 따른 전류의 변화 및 전류불평형률(%CUF)은

Table 2. Changes in load current due to imperfections in the heater

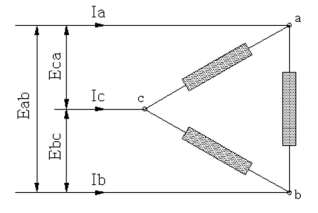
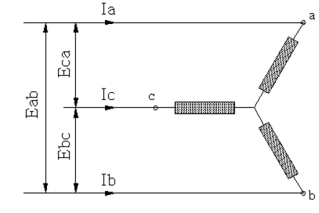
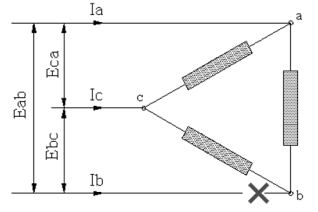
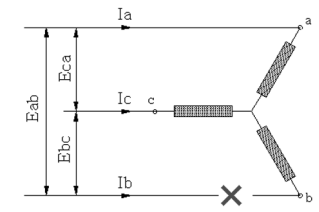
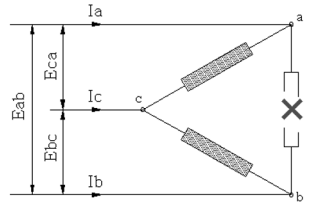
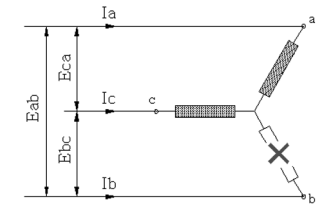
condition	Delta	Wye
Normalcy	 <p>Ia : 100% Ib : 100% Ic : 100% %CUF : 0%</p>	 <p>Ia : 100% Ib : 100% Ic : 100% %CUF : 0%</p>
1 Phase wiring disconnection	 <p>Ia : 86.6% Ib : 0% Ic : 86.6% %CUF : 100%</p>	 <p>Ia : 86.6% Ib : 0% Ic : 86.6% %CUF : 100%</p>
1 Phase Heater disconnection	 <p>Ia : 57.7% Ib : 57.7% Ic : 100% %CUF : 42.3%</p>	 <p>Ia : 86.6% Ib : 0% Ic : 86.6% %CUF : 100%</p>

Table 3. Changes in current when one of the heaters was disconnected

Wiring	n=	normalcy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Delta	Ia	100%	58%	76%	84%	88%	90%	92%	93%	94%	94%	95%
	Ib	100%	58%	76%	84%	88%	90%	92%	93%	94%	94%	95%
	Ic	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	%CUF	0.0%	42.3%	23.6%	16.1%	12.2%	9.8%	8.2%	7.1%	6.2%	5.5%	5.0%
Wye	Ia	100%	0%	60%	75%	82%	86%	88%	90%	91%	92%	93%
	Ib	100%	87%	92%	94%	96%	97%	97%	98%	98%	98%	98%
	Ic	100%	87%	92%	94%	96%	97%	97%	98%	98%	98%	98%
	%CUF	0.0%	100%	34.5%	20.5%	14.6%	11.3%	9.2%	7.8%	6.7%	5.9%	5.3%

Table 2와 같다.

또한, 복수개의 히터를 조합하여 사용하는 도중에 1개의 히터가 단선되는 경우 전류의 변화 및 전류불평형의 변화는 Table3과 같이 많은 수량의 히터를 사용할수록 1개의 히터가 단선될 경우 전류감소율과 전류불평형률이 줄어들게 된다.

4. 3상히터의 전류불평형률의 실측 결과

4.1 3상히터의 불평형률 측정결과

2013년부터 2014년까지 도금, 세정, 건조설비 등에 설치된 2개 사업장의 7개 공장건물에 설치된 626개 3상히터에 대한 정밀진단을 실시하여, 626개의 3상히터로 공급되는 배선에서 각 상별 부하전류를 측정하여 전류불평형률을 계산하였으며, 그 결과 Fig. 4와 같이 전류불평형률이 10%를 넘는 경우가 전체 626개의 히터 중에서 85개로 15.3%를 차지하였다.

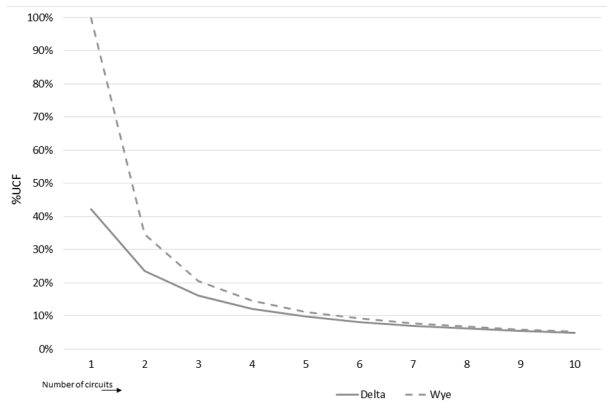


Fig. 4. Percentage change in CUF when one of the heaters was disconnected.

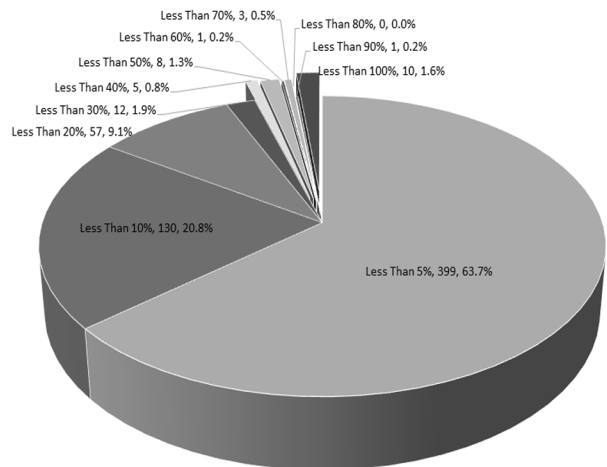


Fig. 5. %CUF of three phase heater.

4.2 3상히터의 전류불평형률 실측값과 상태

3상히터의 제조과정에서의 제품별 저항의 불균일, 3상전압의 불평형, 배선 등에서의 각상 저항의 편차 등으로 인하여 미소한 전류불평형이 발생할 수 있으며, 다수의 히터를 Δ 결선 또는 Y결선하여 사용하더라도 각 상별 히터가 5개 미만인 경우가 대부분이므로 3상히터의 전류불평형률이 10%를 초과하는 3상히터에 대하여 샘플을 선정하여 히터의 배선과 연결부 등에 대한 정밀점검을 추가적으로 실시하여 아래와 같은 결함을 발견하였다.

사례 ① SSR 불량

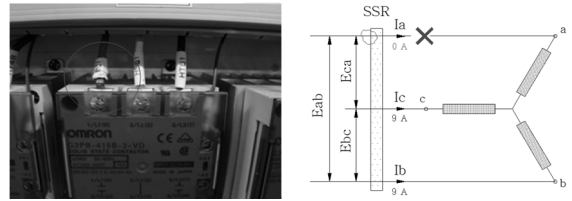


Fig. 6. SSR Failure.

- %CUF: 100%, A상: 0 A, B상: 9 A, C상: 9 A
- SSR A상 1차측 단자 발열, 변색
- SSR A상 결함으로 인한 개방상태

사례 ② Y결선 중성점BUS 접촉불량 및 단선

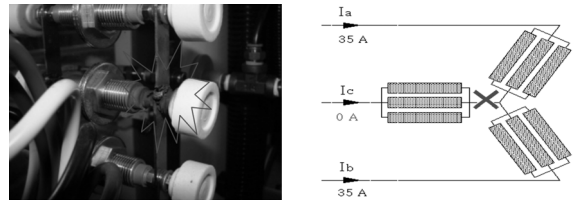


Fig. 7. Neutral BUS contact failure & Disconnection

- %CUF: 100%, A상: 35 A, B상: 35 A, C상: 0 A
- C상 히터의 중성점 BUS 단선
- 접촉불량에 의한 BUS 접촉부 발열 및 용융

사례 ③ 배선의 접촉불량 및 단선

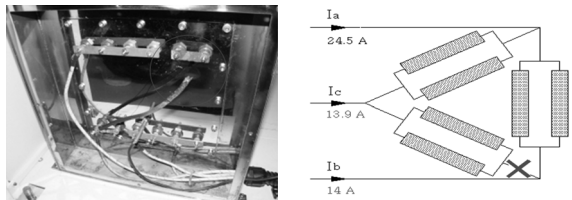


Fig. 8. Contact failure & Disconnection.

- %CUF: 43.3% (이론적 계산치: 42.3%)
- A상: 24.5 A, B상: 13.9 A, C상: 43.3 A
- C상 히터의 배선 단선
- 접촉불량에 의한 압착단자와 배선 발열 및 용융

사례 ④ 접촉불량에 의한 BUS ARC 발생

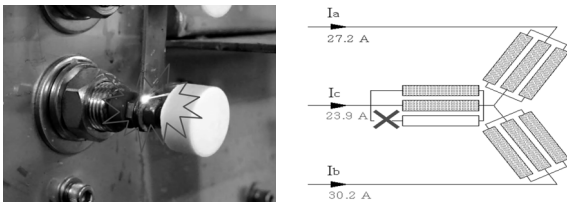


Fig. 9. Arcing due to poor contact.

- %CUF : 20.9%, (이론적 계산치 : 20.5%)
- A상 : 27.2 A, B상 : 30.2 A, C상: 23.9 A
- C상의 3개히터 중 1개히터 BUS 단선
- 접촉불량에 의한 아크(ARC) 발생

이외에도 다수의 사례가 발견되었으며, 대부분결합의 주요원인은 접촉불량에 의한 발열 및 단선과 히터 자체의 단선으로 나타났다.

히터와 전선 또는 BUS의 접촉불량이 발생하게 되면 Fig. 9와 같이 진동에 의하여 아크가 발생하거나 접촉 저항 증가에 의한 glowing contacts 또는 glowing electrical connection이라는 발광을 동반하는 적열현상이 발생한다³⁾. 또한 고온의 용융물이 비산 또는 낙하할 경우 가연성 먼지 등에 접촉하게 되어 출화할 수 있다.

따라서 3상히터의 전류불평형이 발생할 경우에 전원을 차단하거나, 경보를 알려줄 수 있는 장치가 필요하다.

5. 3상히터의 보호장치 설치 실태

일반적으로 3상 전동기의 경우 결상이 발생하면 과전류가 흐르기 때문에 2개의 CT를 사용하여도 과전류 검출에 의하여 결상보호를 할 수 있다. 따라서 2CT방식의 모터보호장치는 과전류 검출에 의한 전동기 결상 보호를 전제로 하여 설계 및 제작된 것이다. 하지만 1개상이 결상되어도 과전류가 발생하지 않는 3상히터 등의 정지형 부하기기의 경우에 2CT방식의 모터보호장치로는 전혀 보호기능을 할 수 없다. 3상히터의 보호를 위해서는 불평형전류를 검출하거나 3CT를 활용한 3상 부족전류를 검출하는 방식을 사용하여야 한다. 또한, 부족전류 검출만을 이용하려면 3CT를 사용하고 설정값을 정밀하게 설정해야만 보호역할을 제대로 할 수 있으나, 2CT를 사용하였을 경우 다수의 히터를 조합하여 구성한 3상히터를 보호하기에는 다소 어려움이 있다.

이번 논문의 대상이 된 7개 사업장의 3상히터에 적

Table 4. Comparison of functions of protection devices of heaters⁶⁻¹⁰⁾

Protector	CT Quantity	Ground Fault	Under Current	Current phase loss protection	Current Unbalance		Applicability
					Protector	Operating Range	
EOCR-i3DM	3	×	○	○	○	10~50%	○
EOCR-3DM	3	×	×	○	○	5~50%	○
EOCR-3DZ	3	○	×	○	○	50% Fixing	△
EUCR	2	×	○	×	×	-	△
EMPR GMP40-3T	3	×	×	○	○	50% Fixing	△
HFD	2	×	○	×	×	-	△
EOCR-3E	3	×	×	○	×	-	△
EOCR-SS	2	×	×	×	×	-	×
EOCR-SP	2	×	×	×	×	-	×

※ Remark: ○: Available, △: Restriction, ×: No Protection

Table 5. State of %CUF and Protector

Protactor	%CUF	0%	less than 5%	less than 10%	less than 20%	less than 30%	less than 40%	less than 50%	less than 60%	less than 70%	less than 80%	less than 90%	less than 100%	Total	Share (%)
EOCR-i3DM			3	1										4	0.8
EOCR-3DM			1											1	
EOCR-3DZ			1											1	
EUCR	15	29	12	4										60	23.3
EMPR		4	4	7	2									17	
HFD	5	21	8	4								1		39	
EOCR-3E		18	11											29	68.8
EOCR-SP	5	25	10	1	1							2		44	
None	89	183	85	43	9	5	8	1	3	0	0	5	431		
Total		114	285	131	59	12	5	8	1	3	0	0	8	626	

용된 보호장치는 Table 4와 같이 다양한 제품을 선정하여 사용하고 있으며, 설치된 시기와 제어설비의 제조회사가 각각 다르며, 보호장치의 선정기준이 명확하게 정해진 것이 없기 때문에 다양한 보호장치가 설치되어 있었다.

또한, Table 4에 표기된 보호장치 이외에도 수많은 종류의 제품이 출시되고 있으나, 3상히터에 적용하고 있는 보호장치의 기능은 Table 4에 표기된 제품의 유형을 크게 벗어나지 않는다.

Table 4의 보호장치 중에서 3상히터의 결함에 의한 전류의 변화를 제대로 검출할 수 있는 것은 EOCR-i3DM과 EOCR-3DM이며, 전류불평형률의 검출범위가 50%로 고정된 제품은 3상히터의 배선이나 히터에 결함이 발생하였을 경우 전류불평형이 100%가 될 경우에만 제한적으로 사용할 수 있다. 또한 2개의 CT를 사용하는 EUCR(Electronic Under Current Relay)이나 HFD(Heater Fault Detector)의 경우에는 다수의 히터를 사용하여 배선 또는 히터의 단선으로 인하여 부하전류가 10%이하의 전류감소를 보이는 히터의 결함에서는 전류검출범위를 아주 정밀하게 설정하지 않고서는 결함을 검출하는 것이 쉽지 않다.

또한, SS Type과 SP Type의 EOCR의 경우에는 전동기를 보호하기 위한 과전류보호장치이며 전동기가 결상이 되었을 경우 부하전류가 상승하는 것을 검출하는 방식이나, 대부분 이러한 사실을 알지 못하여 3상 전력 콘덴서나 히터의 결상보호용으로 잘못 사용하는 경우가 종종 발견되고 있다.

626개의 3상히터에 대한 전류불평형률과 설치된 보호장치의 상관관계를 분석해 보면 Table 5와 같이 195개 (31.2%)의 히터에는 보호장치를 설치하였으나, 대부분 과전류보호 또는 부족전류 기능만 있는 제품이 많았으며, 전류불평형 검출방식도 설정값이 50%로 고정되어 있어 다수의 히터를 조합하여 회로를 구성한 경우에는 결함을 제대로 검출하지 못하였다.

6. 결론

생산설비내에 설치되어 가동중인 3상히터의 전류를 측정하여 불평형률을 계산하면 설비의 가동을 중단시키지 않고도 히터와 배선 등의 결함을 예측할 수 있었으며, 이러한 방법으로 가동 중인 3상히터의 건전성을 손쉽게 판별하는 데 널리 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

국내외적으로 3상히터 보호장치의 선정과 설치에 대한 명확한 기준이 정해지지 않은 상태이며, 3상히터 보호장치의 잘못된 선정에 대한 문제점이 아직까지는 공식적으로 알려진 바 없다.

따라서 보호장치 선정의 오류가 재발되지 않도록 사례의 공유와 전파가 필요하며,

3상히터 보호장치 선정에 관한 기준을 명확하게 정립할 필요가 있다.

이에 대한 기본적인 원칙은

1) 3상히터의 보호장치는 반드시 전류불평형을 검출하여 동작하는 제품을 선정하여 설치하되, 전류불평형률은 최소 10%이상부터 설정할 수 있는 제품을 선정하여야 하는 것이 바람직하다.

2) 보호장치의 전류불평형률 설정값은 3상 히터를 구성하고 있는 히터의 수량에 따라서 달라지며, 앞의 Table 2와 Table 3을 참고하여 정확하게 설정하여야 한다.

References

- 1) National Fire Data System, "www.nfds.go.kr", 2014.
- 2) KESCO, "2013 A Statistical Analysis on the Electrical Accident", pp. 25, 2014.
- 3) Korea Electric Association, "Consumer's Electrical Installation Guide", pp. 42, 2013.
- 4) Schneider Electric, "Electronic Motor Protection Relays", pp20-47, pp. 110, 2006.
- 5) Kim Hyang-Kon, "Comparison of Characteristics between Cu₂O Growing by Poor Connection and Heating up Wire", pp. 12, 2000.
- 6) Schneider Electric, "Electronic Motor Protection Relays", pp. 31-33, 2008.
- 7) Schneider Electric, "Electronic Motor Protection Relays - Analog", pp. 6-25, 2011.
- 8) LSIS, "Electronic Motor Protection Relays", pp2-10, 2014.
- 9) OMRON, Heater Element Burnout Detector K2CU, pp. 1-11, 2012.
- 10) Schneider Electric, "www.schneider-electric.com", 2014.