

3상 저항가열식 전기히터의 화재예방을 위한 결함 진단장치

Fault Diagnosis Device for Fire Prevention of the Resistance Heating Type three-Phase Electric Heater

이 문 형* · 김 찬 오*
(Mun-Hyung Lee · Chan-O Kim)

Abstract - In this study, We have discussed the development of a diagnostic device to detect and prevent electrical fire due to the arc caused by contact failure and partial disconnection at the connection part of the three-phase electric heater wiring used in the industrial field. The arc caused by contact failure and partial disconnection at the connection part of the electric heater shows a change in the current effective value. Therefore, it is possible to determine whether there exists a defect by analyzing the current unbalance factor and the number of current fluctuations with the diagnostic apparatus. The three-phase unbalanced heater is considered to be capable of determining defects through periodic measurement and trend analysis of the current unbalance factor. It is also expected that this device can be used not only for electric heaters but also for detection of defects in wiring and connections of electrical equipment having a characteristic of constant load current.

Key Words : Electric heater, Electric fire

1. 서 론

산업현장에서 저항가열식의 전기히터는 원료의 예열, 용해, 가열, 건조 및 냉동기의 제상히터 등 매우 광범위하게 사용되고 있으며, 히터의 종류와 형태도 매우 다양하다.

전기히터는 온도상승을 목적으로 하여 사용되지만 의도하지 않은 결함에 의하여 화재의 원인으로 작용하기도 한다. 국내에서 2012년부터 2016년까지 5년간 산업용 “히터/히터봉/가열장치”에서 발생한 화재는 모두 1,191건(전체화재의 1.49%)으로 약 135억원의 재산피해와 22명의 사상자가 발생하였다[1].

또한, 2015년 한 해 동안 발생한 전기화재의 발화유형별 분석 결과를 보면 전체 전기화재 7,760건 중 접촉불량이 748건으로 9.6%, 반단선이 141건으로 7.8%를 차지하였다[2].

전기히터에서 발생하는 전기화재의 주요 발생원인은 접촉불량, 배선의 과전류나 반단선에 의한 발열 또는 아크, 전기히터의 절연불량에 의한 누전, 온도조절장치 또는 수위조절장치의 결함에 의한 과열, 전기히터 주변의 가연물에 의한 착화 등으로 구분할 수 있다. 이 중 과전류나 누전, 과열 등에 의한 전기화재는 과전류차단기, 누전차단기, 과온센서 또는 온도퓨즈 등을 사용하여 화

재발생 이전에 위험을 검출하고 차단할 수 있지만, 전기히터에 접속된 배선의 접촉불량, 반단선(전선의 소선(素線)중 일부가 절연피복 내에서 단선되고 그 부분에서 단선과 이어짐이 반복되는 상태 또는 완전히 단선되지 않을 정도로 소선의 일부가 남아있는 상태)[3]과 같은 배선에서의 결함요인은 통전상태에서나 발견할 수 있으므로 점검작업이 매우 위험하며, 사전에 이상 증후를 검출하는 것이 매우 어렵다.

따라서 본 연구는 3상평형 저항가열식 전기히터에 연결된 배선의 접촉불량 또는 반단선 등에 의한 전기적인 현상을 실험을 통하여 확인하고 분석하여 화재를 사전에 예방할 수 있는 결함 진단장치를 개발하고자 한다.

2. 전기히터의 결선 및 운전방식

2.1 전기히터의 결선방식

전기히터는 단상 또는 3상으로 구분될 수 있으며, 산업용으로 주로 많이 사용하는 3상 전기히터는 대부분 동일한 부하용량의 전기히터 3개 또는 그 이상을 조합하여 Δ 또는 Y 결선의 3상평형히터로 구성하여 사용하고 있다.

2.2 전기히터의 운전방식

전기히터의 운전방식은 On/Off 제어방식과 온도를 정밀하게 제어하기 위한 위상제어(Phase Angle Control), 싸이클제어(Zero

† Corresponding Author : Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology
E-mail : kimco@seoultech.ac.kr

* Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Received : August 28, 2017; Accepted : October 28, 2017

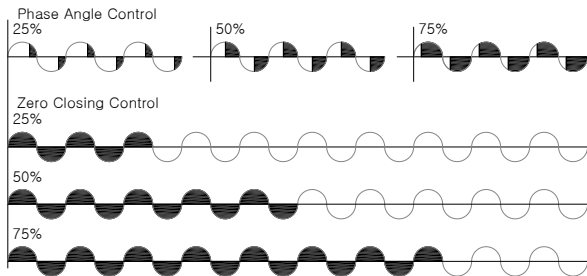


그림 1 위상제어와 싸이클제어
Fig. 1 Phase Angle And Zero Closing Control[4]

Closing Control)를 주로 사용한다. 위상제어와 싸이클제어는 그림 1과 같이 전원의 출력이 다르게 나타난다.

3. 전기히터의 배선 결함에 따른 전기적 특성

3.1 3상평형 전기히터의 접촉불량 및 반단선에 의한 불평형 전류

3상평형 전기히터는 정상상태에서는 3상 전원에 대하여 각 상의 전류가 동일한 크기로 흐르게 된다. 하지만, 배선에서 반단선이 발생하거나 한상 또는 두 개 상의 접촉불량에 의하여 전류의 흐름이 일시적으로 끊어지거나 전류가 감소하게 되면 각 상의 전류가 불평형 상태가 된다. 실제로 산업현장에서 사용되는 626개의 3상 평형히터에 대한 정밀진단 결과 전류불평형이 10%를 초과하는 경우에는 그림 2와 같이 배선의 접촉불량이 발견되는 경우가 많이 있었다[5]. 그림 2는 건조조에 설치된 9개의 히터를 사용하여 3상 Y결선으로 조합된 히터로서 부하전류가 A상 27.2 A, B상 30.2 A, C상 23.9 A로 측정되어 전류불평형이 20.9%였으며, 히터의 접속부에 대한 점검결과 C상의 접촉불량으로 밝혀진 사례이다[5].

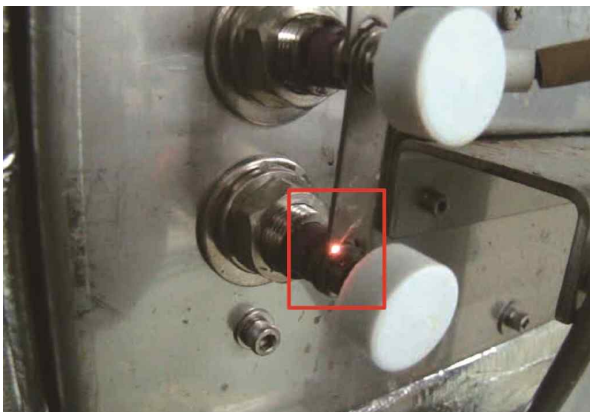


그림 2 전기히터 접속부분의 접촉불량에 의한 아크발생 현상 사례
Fig. 2 Examples of arcing caused by poor contact of electric heater connection part

배선이 유동상태에 있는 경우에는 배선의 일부 또는 전체가 끊어졌다 연결되기를 반복하여 그림 3과 같이 아크가 발생하게 되며 오랜기간 반복적으로 발생하는 아크에 의하여 전선 피복의 절연이 파괴되어 단락사고로 이어지는 경우도 발생할 수 있다.

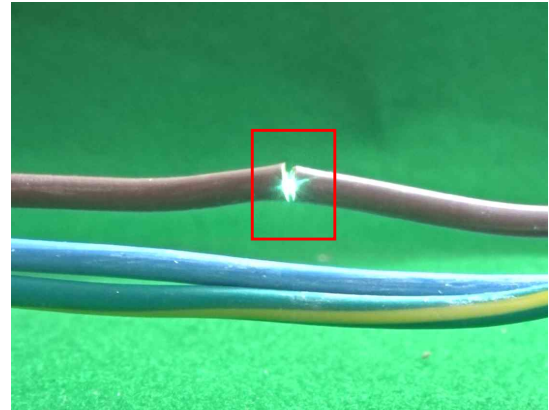


그림 3 반단선에 의한 아크발생 현상
Fig. 3 Arc generation by semi-disconnection

3.2 실험장치의 구성 및 불평형전류의 측정

그림 4와 같이 3개의 시스히터를 직렬로 연결한 히터유닛 3개를 3상 Y결선으로 연결하여 3상 380 V, 1.1 kW의 전기용량을 갖는 히터를 구성하였고, 전력제어장치와 아크발생기를 연결하여 접촉불량 또는 반단선에 의한 불꽃 발생 상황을 모의하여 각 상의 전류를 레코더로 측정하였다.

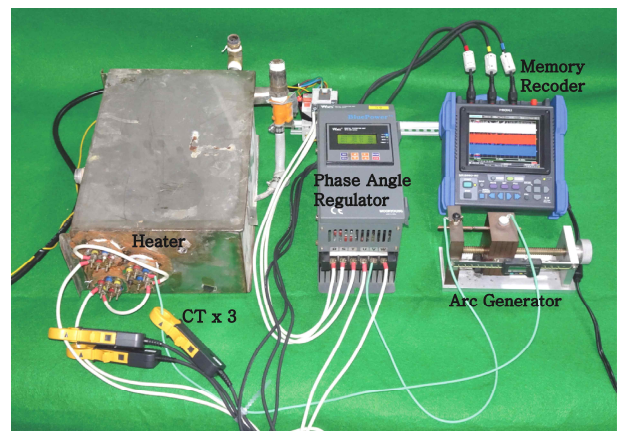


그림 4 실험장치의 구성
Fig. 4 Configuration of experimental apparatus

On/Off제어방식으로 전기히터를 가동하고 아크 발생기를 사용하여 B상 배선의 접촉불량 상태를 모의한 결과 그림 6과 같이 전류 순시치의 파형 변화를 검출할 수 있었으며, 그림 7과 같이 전류 실효치의 변화를 검출할 수 있었다.

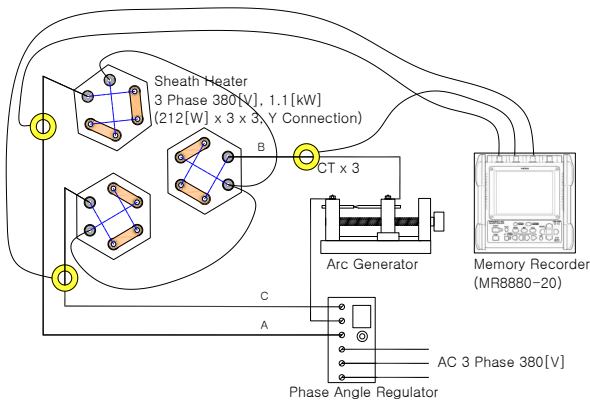


그림 5 실험장치의 구성 상세도
 Fig. 5 Detailed configuration of experimental apparatus

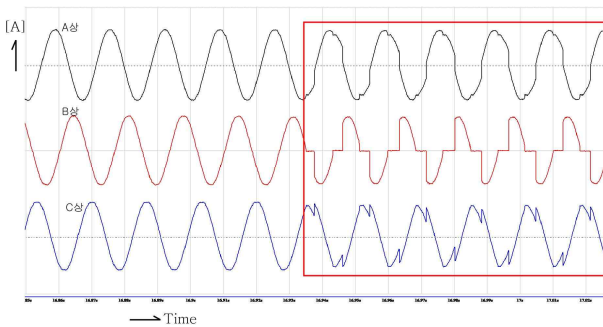


그림 6 1상 접촉불량에 의한 전류특성(순시치)
 Fig. 6 Current characteristics due to 1 phase contact failure (Instant-Current)

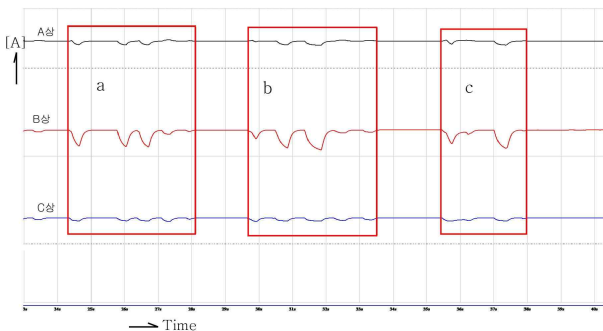


그림 7 1상 접촉불량에 의한 전류특성 (실효치)
 Fig. 7 Current characteristics due to 1 phase contact failure (RMS-Current)

그림 8은 그림 7의 b와 c로 구분된 영역의 각 상 전류 파형을 동일한 기준선에 놓고 비교한 것이며, 불평형률(%CUF)을 계산하여 포함한 것이다. 그림 7에서 전류 불평형률은 B상의 접촉 불량에 의하여 아크가 발생한 시기에 높게 나타나고 대부분 10%를 초과하였으며, 반복적인 실험에서도 유사한 결과로 나타났

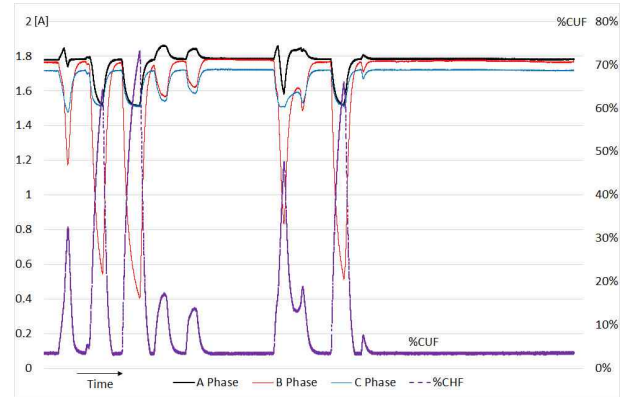


그림 8 1상 접촉불량에 의한 전류특성(실효치)과 %CUF
 Fig. 8 Current characteristics due to 1 phase contact failure (RMS-Current) and %CUF

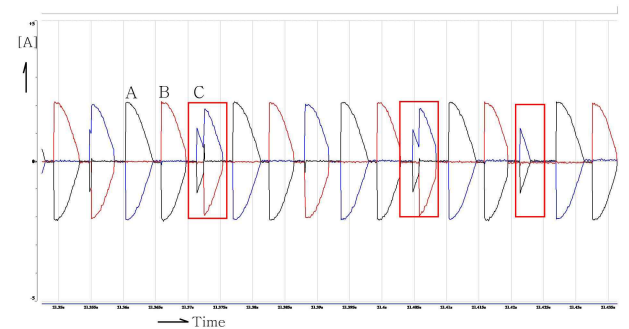


그림 9 위상제어방식에서의 접촉불량에 의한 전류 특성(순시치)
 Fig. 9 Current characteristics due to contact failure in phase angle control system(Instant)

다. 또한, 산업현장에서의 3상히터에서의 전류불평형률 10% 초과 시 배선의 결함이 발견되었다는 논문[5] 내용과도 일치하여 “3상히터의 전류불평형률 10% 초과 시 히터 내부 또는 접속점이나 배선에서 결함이 발생하였을 가능성이 매우 높은 것으로 판정할 수 있다”고 판단되었다.

전력제어장치(Phase Angle Regulator)를 사용하여 위상제어 방식으로 부하 부담 50%로 운전하면서 접촉불량 상태를 모의하여 측정한 전류 순시치는 On/Off 방식과는 달리 그림 9와 같이 점호각에 따른 파형 일그러짐이 발생하였으나, 전류 실효치는 그림 10과 같이 On/Off 제어방식과 유사한 형태의 패턴을 보였다.

즉, 전기히터의 가동방식이 On/Off제어, 위상제어와 관계없이 배선의 접촉불량 또는 반단선이 발생하면 전류 실효치가 변화되며, 3상전류의 불평형률이 높아지는 것을 알 수 있다. 따라서 3상평형 전기히터의 배선에서 발생하는 접촉불량 및 반단선에 의한 전류의 실효치의 변화와 3상전류의 불평형률을 검출하여 전기히터의 결함을 초기에 발견할 수 있다.

대부분의 전기 부하설비의 결상 보호장치에서 사용하는 전류 불평형률(Current unbalance factor)은 식(1)을 적용하고 있다.[6]

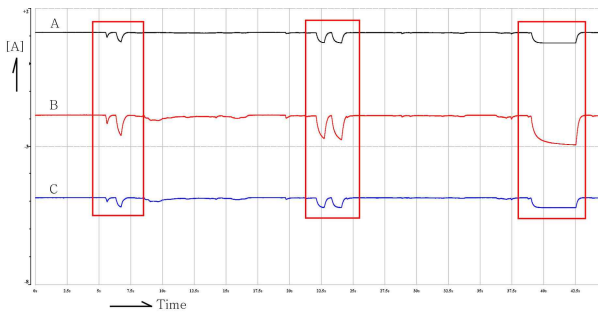


그림 10 위상제어방식에서의 접촉불량에 의한 전류 특성(실효치)
 Fig. 10 Current characteristics due to contact failure in phase angle control system(RMS)

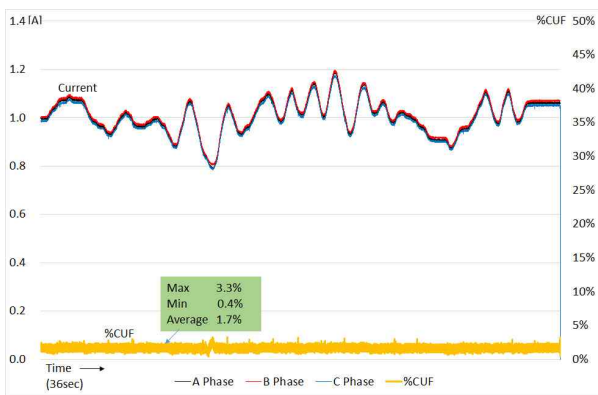


그림 11 위상제어를 활용한 PID 제어에서의 각 상의 전류실효치의 변화
 Fig. 11 Change of rms value of each phase in PID control using phase control

$$\%CUF = \frac{\max(I_a, I_b, I_c) - \min(I_a, I_b, I_c)}{\max(I_a, I_b, I_c)} \times 100 \% \quad (1)$$

또한, 그림 11과 같이 위상제어를 활용하여 PID제어를 하는 경우를 모의하여 전기히터의 전류출력 값을 변화하였을 경우에도 정상상태에서는 전류실효치가 3상이 거의 동일한 비율로 변화하며, 전류불평형률(황색실선, %CUF)은 출력 전류의 크기가 변화함에도 불구하고 거의 일정하게 유지됨이 확인되었다.

따라서 위상제어를 활용한 PID제어에서는 정상 상태에서도 3상전류의 크기가 온도변화 등에 따라서 변화하므로 전류변동 횟수(Flicker)에 의한 결함판정은 어렵겠지만 전류 불평형률에 의한 전기히터의 결함 검출방식은 On/Off 방식만이 아니고 위상제어 방식에서도 유효하게 활용할 수 있다.

다만, 이는 공급되는 전압이 일정하였을 경우에 한하여 적용할 수 있으며, 공급전압의 불평형이나 전압 변동이 심한 경우에는 적용하기 어렵다.

우리나라에서 전압불평형률에 대한 허용기준은 교류식 전기철도의 경우 단상부하에 의하여 다른 부하에 영향을 줄 수 있어 전압불평형의 허용한도를 “변전소 수전점에서 3% 이하일 것”[7]

으로 규정하고 있으나, 일반 수변전설비 및 부하설비에 대한 전압불평형률은 규정된 것이 없다. 하지만, 국내외 전압불평형률의 허용범위는 대개 관련 규격에 의하여 0~3% 범위 이내로 설정하고 있다[8]. 또한, 아크로, 전기철도 등에 전력을 사용하는 고객으로서 플리커나 고조파를 발생하는 고객은 전압변동률의 경우 예측 계산에 의하여 최대전압변동률 2.5%를 초과하거나, 실측시 실측전압변동률이 0.4%를 초과할 경우 보호장치를 설치하도록 되어 있다.[9]

따라서 위상제어방식에서도 저항성부하인 3상 전기히터와 배선의 건전성 판정을 위하여 전류불평형률 10% 이상을 결함 판정 기준으로 설정하여도 대부분의 결함을 검출할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 3상 불평형 전기히터의 접촉불량 및 반단선에 의한 불평형 전류

발열설비를 제작하는 과정에서 부득이하게 3상 불평형 상태로 제작된 전기히터의 경우에는 정상상태라 하더라도 3상 전원에 대하여 불평형 전류가 흐르게 된다. 따라서, 전류 불평형률을 검출하여 결함을 판단하는 것은 적용할 수 없다. 다만 정기적으로 3상전류 불평형률을 측정하고, 추이분석 관리를 통하여 전기히터의 결함을 발견할 수 있다. 또한, 접촉불량이나 반단선에 의하여 발생하는 전류 실효치의 변동횟수를 분석하여 전기히터의 결함을 발견할 수 있다.

3.4 단상 전기히터의 접촉불량에 의한 전류의 변화

단상 전기히터의 경우에는 전류의 크기를 비교할 수 있는 대상이 없으므로 정상상태에서의 부하 전류의 크기를 측정하여 기록하고 정기적으로 부하전류를 측정하여 추이분석 관리를 하며, 접촉불량이나 반단선에 의한 전류 실효치의 변화를 검출하여 결함을 발견할 수 있다.

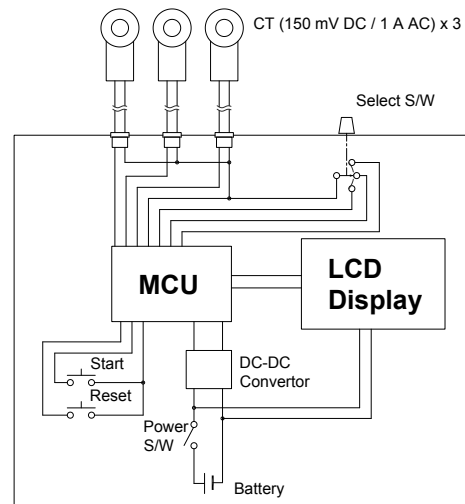


그림 12 진단 장치의 구성
 Fig. 12 Configuration of the diagnostic device

4. 전기히터 결함 진단장치

4.1 전기히터 결함 진단장치의 구성

진단장치는 그림 12와 같이 3개의 CT(150 mV DC/1 A AC)를 사용하여 AC전류를 DC전압으로 변환하여 MCU의 AD입력에 연결하고 디지털 신호로 변환되도록 하였으며, 측정값은 LCD Display를 통하여 표시하도록 하였다.

4.2 장치에 의한 전기히터의 결함 분석

진단장치의 동작방법은 전기히터 배선에 연결된 3개의 CT를 통하여 10초 간의 연속적인 전류의 측정과 측정값의 비교 및 연산을 하고, 전류 변화의 반복횟수(Flicker), 최대, 최소, 평균 전류와 전류불평형률 등을 계산한 뒤 LCD Display를 사용하여 결과값을 표시할 수 있도록 하였다.

진단장치의 동작 순서도는 그림 13과 같다.

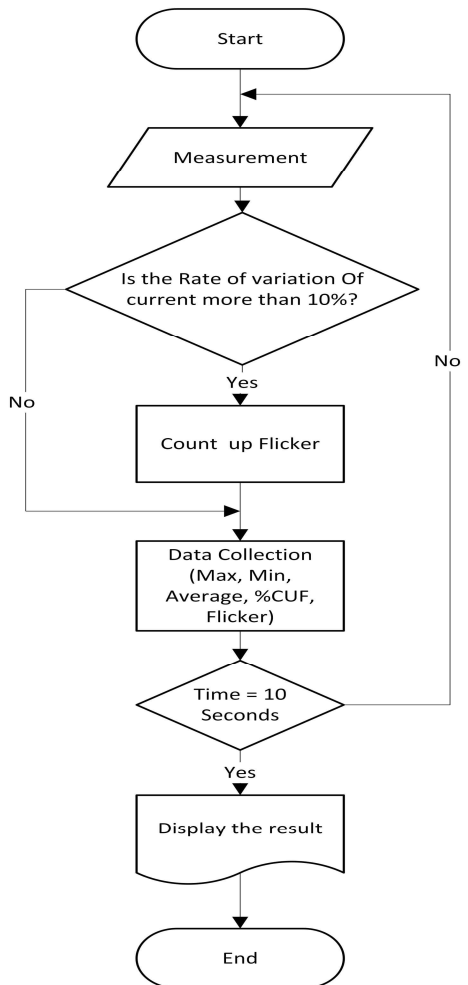


그림 13 진단장치의 동작 순서도

Fig. 13 Operation flowchart of diagnostic device

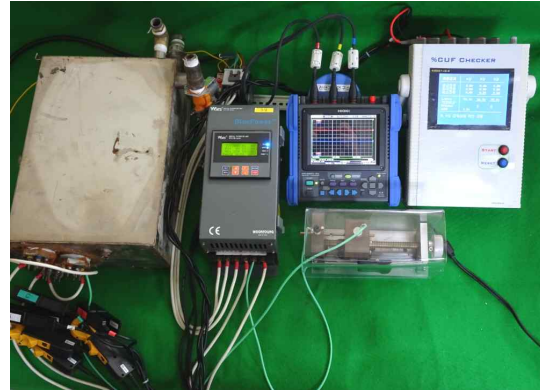


그림 14 전기히터 결함 진단장치의 측정의 예

Fig. 14 Examples of measurement of defective diagnosis device of electric heater

측정결과	A상	B상	C상
평균전류	1.6A	1.6A	1.6A
최대전류	1.8A	1.7A	1.7A
최소전류	0.6A	0.0A	0.7A
L/H(%)	37.1%	0.0%	43.1%
Flicker	36	39	32
%CUF Max	100.0%		
%CUF Min	2.7%		

B상 접촉상태 확인 요망

그림 15 측정 결과 값의 표시의 예

Fig. 15 Example of display of measurement result value

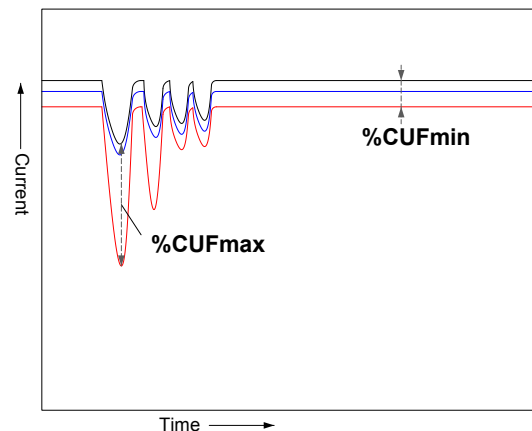


그림 16 전류불평형률의 최대치와 최소치

Fig. 16 The maximum and minimum values of the current unbalance Factor

그림 14는 제작된 진단장치를 활용하여 B상의 접촉 불량 상황을 모의하여 3상 전기히터의 전류변화를 측정하는 장면이고, 그림 15는 측정 결과 값이다.



그림 17 진단장치의 외형

Fig. 17 Appearance of diagnostic device

각 상의 평균, 최대, 최소전류가 표시되어있고, 각 상의 최대전류 대비 최소전류의 비율(L/H%), 각 상의 전류변화의 반복횟수(Flicker)와 전류불평형률(%CUF)의 최대치와 최소치가 표시된다. 또한, 최대전류 대비 최소전류의 변화폭이 가장 큰 상을 접촉불량으로 판단하여 주의문구를 표시하도록 하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 산업현장에서 사용되는 전기히터와 배선 접속 부분에서의 접촉불량 및 배선의 반단선에 의한 아크로 인한 전기 화재 위험에 대하여 사전에 이를 검출하고 개선할 수 있도록 하기 위한 진단 장치의 개발에 대하여 논하였다.

3상평형의 전기히터 접속부의 접촉불량이나 배선의 반단선에 의한 아크는 전류 실효치의 변화를 일으키는데, 개발된 진단장치를 통해 이를 측정하고 전류불평형률, 전류의 변동횟수(Flicker) 등을 분석하여 결함여부를 판정할 수 있었다.

3상불평형 히터와 단상 전기히터는 접촉불량이나 반단선에 의한 전류의 변동횟수를 분석하여 결함여부를 판정할 수 있으며, 또한 3상 불평형 히터는 전류 불평형률에 대한 정기적인 측정 및 추이분석을 통해서도 결함을 판정할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 본 장치가 전기히터만이 아니고 부하전류가 일정한 특징을 갖는 전기설비의 접속부와 배선의 결함을 검출하는데도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] Korea Electrical Safety Coporation, "A Statistical Analysis on the Electrical Accident for 2015", pp. 26, 2016.
 [2] National Fire Data System, "www.nfds.go.kr", 2017.
 [3] Jin Man Choi, Ten Fire Investigation Introduction, Sungandang, pp. 248, 2010.

[4] Woonyoung co, LTD. "Digital Type Thyristor Unit", pp. 5~6, 2015. 3.
 [5] Mun Hyung Lee, "Fault Prediction based on Unbalanced Current Detection of Three Phase Heaters and Selection of Protective Device", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 30, No. 1, pp. 28~33, February 2015.
 [6] Schneider Electric, "Electronic Motor Protection Relays", pp. 20-47, pp. 110, 2006.
 [7] Korea Electric Association, "Electrical equipment technical standards and criteria Article267(Prevention from voltage imbalance), 2017.
 [8] Jong Gyeum Kim, "The Measurement & Analysis of Voltage Unbalance Factor at LV Customer of Three-Phase Four-Wire System", Journal of the Korea Institute of illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 18, No. 36, pp. 95~96, 2014.11.
 [9] KEPCO, "Basic Terms and Conditions Bylaws Article 26 (Facilities such as protection devices for electricity use)", pp. 42, 2017.

저 자 소 개



이 문 형 (Mun-Hyung Lee)

1961년 2월 13일생. 2001년 서울과학기술대학교 졸업. 2003년 서울과학기술대학교 대학원 안전공학과 졸업(석사). 2014~서울과학기술대학교 대학원 안전공학과(박사과정). 2011~한국전기안전서비스 기술연구소 소장



김 찬 오 (Chan-O Kim)

1953년 7월 30일생. 1978년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1981년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1985년~서울과학기술대학교 안전공학과 교수