

논문 2007-44SC-1-2

마이크로프로세서를 이용한 아크결함 차단기 설계

(Arc Fault Circuit Interrupter Design using Microprocessor)

윤 광 호*, 반 기 중**, 이 효 직*, 박 병 석*, 남 문 현***

(Kwang Ho Yoon, Gi Jong Ban, Hyo Jik Lee, Byung Suk Park, and Moon Hyon Nam)

요 약

본 연구에서 설계한 AFCI는 Arc 고장 차단기로서 종속된 전기 배선상의 노화, 절연 및 배선 파괴, 연결 고장, 절연과 배선에 과도한 기계적 손상으로 인한 아크고장을 검출하여 차단하는 기능을 가지고 있으며 기존 차단기가 가지고 있던 과전류에 의한 바이메탈의 만곡 특성에 의한 동작으로 차단하는 방식은 차단에 긴 시간이 걸리나 설계한 AFCI는 전자방식으로서 과부하, 과전류에 의한 기계적, 전기적인 스트레스를 검출하여 차단하는 기능을 가진 제품으로 차단시간이 100% 이상 단축되어 전기 화재의 발생률을 낮추도록 하였다.

Abstract

As an arc fault interrupter, the AFCI mentioned in this paper has been designed to detect and interrupt arc faults due to wire deterioration, insulation, wire damage, loose connection, and excessive mechanical damage. Since AFCI is digital and uses mechanical and electric stress, the length of interruption against overload and over-current is much shorter than the current bi-metal method. Therefore, the risk of electrical fires has been reduced.

Keywords : AFCI, Arc, Fire Protection, Arc current controller, Sensor

I. 서 론

본 논문에서는 가정 및 산업 현장에서 발생하는 아크결함에 의한 전기 안전에 관하여 연구하였다. 전기의 사용이 많아지면서 전기 사용에 따른 화재나 감전 등 인체에 발생하는 피해와 더불어 건축물이나 산업에 막대한 피해를 주고 있다. 근래 들어서 전기 감전사고에 대비하기 위하여 GFCI(Ground Fault Circuit Interrupter)라는 장치를 설치하여 전기 안전에 대비하고 있으나 이러한 장치가 있음에도 불구하고 많은 전기 화재가 발생

하고 있다¹⁻²⁾.

이에 따라서 GFCI가 검출할 수 없는 전기 안전 영역에 대한 장치의 필요성이 대두되었으며 미국을 비롯한 북미지역에서는 가정용 전류 차단 장치에 우선적으로 AFCI(Arc Fault Circuit Interrupter)의 사용을 의무화하였으며, 국내에는 아직까지 도입되어 있지 않다. 국내의 경우 전기 화재 원인 분석에서 전기 화재는 누전에 의한 것으로 판단하고 있다. 그러나 미국의 경우 소비자제품안전위원회(CPSC)의 분석에 따르면 매년 발생하는 전기 화재의 40%가 Arc에 기인한다고 발표하였다. 본 연구에서는 이러한 전기 화재의 원인이 되는 Arc 전류를 검출하여 부하전류를 차단함으로써 화재를 방지할 수 있는 AFCI를 설계하였다. 연구에서 사용한 정격전압 120V에서 250V, 정격전류 5-150A의 전류에서 발생하는 아크를 대상으로 하였다. 아크 결함은 발생형태에 따라 여러 가지로 나타낼 수 있다. 여기에서는 직렬성 아크결함과 병렬성 아크결함 두가지로 한정하여 실험을 실시하였다. 현재까지 국내를 비롯하여 국외에서도 아

* 정희원, 한국원자력연구소 핵주기원격장치랩
(Nuclear Fuel Cycle Technology Lab., Korea Atomic Energy Research Institute Spent Fuel Technology Division, Korea Atomic Energy Research Institute)

** 정희원, 부천전문대학 전자공학과
(The Dept. of Electronic Engineering, Buchon College)

*** 정희원, 건국대학교 전기공학과
(The Dept. of Electrical Engineering, Konkuk Univ.)
접수일자: 2006년6월9일, 수정완료일: 2007년1월2일

크방전에 대한 연구는 거의 진행되고 있지 않으며, 근래에 와서, 누전을 검출할 수 있는 장치와, 단락, 서지 등을 검출하고 보호해주는 장치들이 있음에도 불구하고 전기에 의한 화재등 피해가 줄어들지 않음으로써 아크방전에 대한 연구가 활성화 되고 있다. 전기로 인한 피해사례를 보면 아크방전에 의한 화재 발생건수가 계속적으로 증가하고 있다.

기존의 아크방전 검출방식은 누전검출기가 가지고 있는 기능에 추가적으로 작은 기능을 넣음으로써 검출하고 부하로의 전류를 차단할 수 있다고 믿었으나, 여러 가지 방향으로 연구 결과 그러한 방법에는 한계가 있음이 밝혀졌다. 현재 일반적으로 GFCI(Ground Fault Circuit Interrupter)가 개발되어 사용되고 있으나, 주택 등에서의 전기화재는 줄어들지 않고 있다. GFCI는 인체의 감전에 따른 피해를 방지하기 위한 목적이었으므로 전기 화재의 방지에는 성능을 기대하기 어려웠다. 이러한 GFCI를 대체할 수 있는 AFCI의 필요성이 요구되었다^[3-8]. 현재까지 아날로그 형태의 회로설계가 대부분이었으나 본 연구에서는 전기 화재 방지를 위한 아크방전현상을 검출하고 부하로의 아크 전류를 차단할 수 있는 아크고장전류 차단 제어기를 위하여 마이크로프로세서를 사용하였다. 설계에 사용한 프로세서는 마이크로칩사의 마이크로프로세서를 이용하여 아크결함 차단장치를 설계하였다^[9-15].

II. 아크전류의 특성및 모델링

2.1 아크방전 전류의 종류및 특징

일반적인 전기 사용시 발생하는 아크방전의 형태는 여러 가지로 나타나고 있으나 여기서는 직렬 아크결함과 병렬 아크 결함, 그리고 접지 아크 결함의 세 가지로 분류하였으며. 그림 1의 (a), (b), (c)에 3가지 아크결함의 형태를 나타내었다.

그림에서 발생빈도가 높은 아크는 병렬성 아크이며 병렬성 아크에 의한 화재의 위험성이 가장 높다. 그러나 아크방전 현상은 우리 주변에서도 쉽게 나타나므로 아크방전현상만을 검출하기가 어려움이 많다.

그림 2는 직렬성 아크 결함에 의한 방전현상을 나타내고 있다. 아크 방전현상을 재현하기 위하여 제작한 아크방전 발생장치는 Anode는 동을 이용하고 Cathode는 카본을 이용하여 아크 방전현상의 발생이 용이하도록 하였다^[3-4].

그림 3은 일반적으로 나타날 수 있는 형태의 아크방

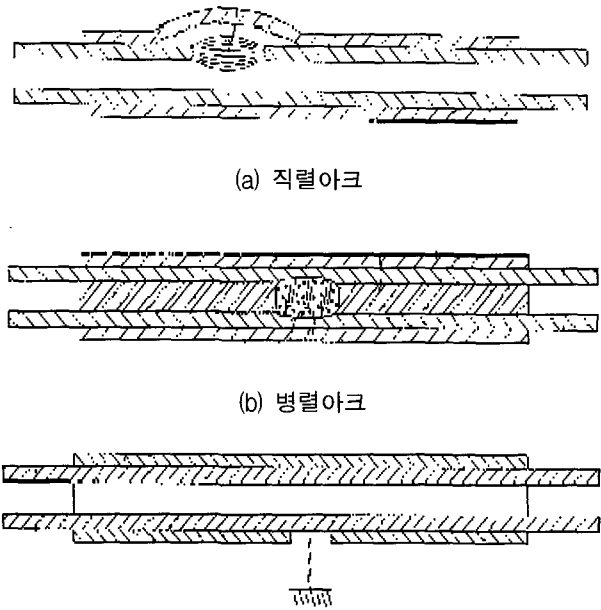


그림 1. 아크결함의 발생 형태

Fig. 1 Classification of discharge.

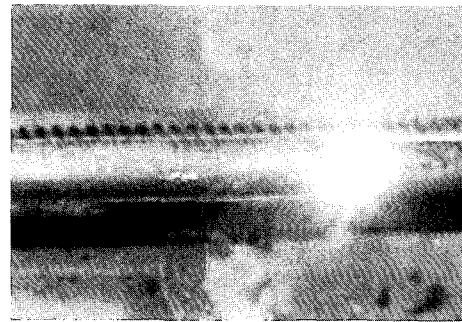


그림 2. 직렬성 아크 방전 현상

Fig. 2. Discharge phenomenon of serial arc.

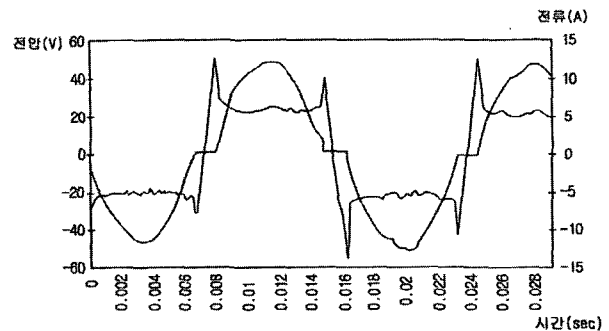


그림 3. 저항 부하일때의 아크에 의한 전류 특성

Fig. 3. Arc current Characteristics of resistive load.

전 파형으로, 직렬로 연결된 전기 도선에 저항 부하를 연결하고 아크방전 발생기에 의해 아크방전 전류를 발생시켰을 때 나타나는 파형이다.

아크방전 전류는 정상 파형이 일그러지는 점 즉 shoulder에서 아크방전 현상이 발생한다.

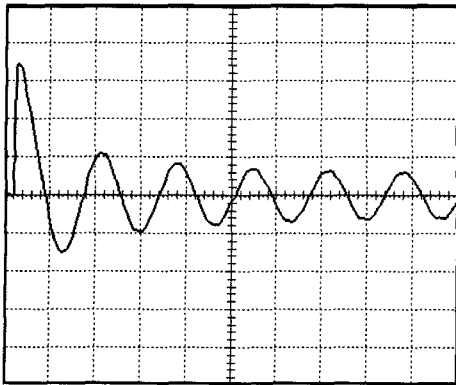


그림 4. 형광등의 기동시 전류 특성(1kW)
 Fig. 4. Start-up transient of incandescent lamps with a total power of 1 KW.

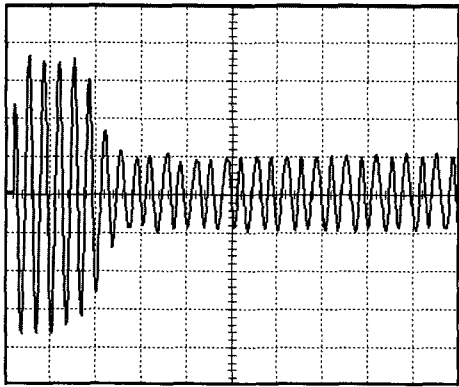


그림 5. 1마력 컴프레서의 기동시 전류 특성
 Fig. 5. Start-up transient of a 1HP air compressor.

그림에서 아크는 시간에 따라 불연속적으로 발생하며 전압의 rms 값은 정상파형보다 작아짐을 알 수 있다. 그림 4는 형광등의 기동시 전류 특성을 나타낸다.

그림 5는 1마력 컴프레서에 의한 기동시 전류 특성을 보여준다. 그림에서와 같이 형광등의 기동시 전류와 컴프레서의 기동시 전류 파형은 아크 결함시 나타나는 파형과 유사성을 가지고 있다. 따라서, 아크결함과 구분할 필요가 있다.

2.3 Arc 전류 모델링

아크란 전기 배선등 두 개의 전극사이에 존재하는 기체가 전압강하에 의하여 전기적으로 방전되어 전류가 흐르는 것이다. 이때, 두 전극 사이에는 주울열이 발생하며 i^2Rt 의 식으로 표현된다. 일반적으로 단위시간에서의 주울열은 i^2R 로 나타낸다. 이렇게 발생한 주울열은 발화점 이상의 높은 열을 발생시키고 이러한 열은 전기화재의 원인이 된다. 또한 아크전류에 의해 발생하는 방전 에너지를 수식으로 표현하면 방전에너지 E_a 는

방전 전류 I_a 와 아크 전압 V_a 의 곱의 시간 적분으로 구한다. 여기서 아크전류가 반주기 사이에 발생하는 일회성 아크인 경우 t_1 을 아크 개시시간, t_2 를 아크 종료시간으로 하면 아크전류에 의한 방전 에너지 E_a 는 식 (1)과 같다.

$$E_a = \int_{t_1}^{t_2} V_a \cdot I_a dt \quad (1)$$

또한, 전원전압이 V_a 에 도달한 즉시 아크를 형성하면 방전중에 소비되는 평균전력 P_{arc} 는 다음과 같이 식 (2)로 나타낸다^{[4][5]}.

$$P_{arc} = \frac{E_a}{\pi} = \frac{2V_p V_a}{\pi R} \sqrt{1 - \left(\frac{V_a}{V_p}\right)^2} - \frac{V_a}{2V_p} (\pi - 2\sin^{-1} \frac{V_a}{V_p}) \quad (2)$$

또, 아크전류는 두 개의 전극사이에 존재하는 기체는 전기적으로 전도되기 충분한 온도를 유지하며 분자들은 아크 내에서 전체적으로 또는 부분적으로 해리가 되어, 원자들은 다시 이온화가 된다. 아크는 전기 도선의 종류, 도선의 단면적, 또는 전류, 전압의 크기에 따라 온도 와 기하학적 특성이 변하며 이는 실제 이온화 에너지, 해리 에너지 등의 전기적 특성과 금속의 성질에 따라 다르게 나타난다.

실제 전극에서의 온도 분포 방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} (k \frac{dT}{dx}) - C_s(T) \rho V_w \frac{dT}{dx} + \frac{I^2 \rho_r(T)}{S^2} \quad (3)$$

아크 저항은 일정하지 않기 때문에 영전류 부근의 아크 저항을 계산하기 위하여 과도 아크 전류와 전압을 이용한 미분방정식 형태의 수학적 모델로 표현할 수 있다. 아크 방정식의 해를 구하기 위해서는 아크를 단순히 전기회로 요소로 취급하고 논리적으로 영향이 적은 요소는 무시한다.

동적 아크 모델을 간략하게 나타내기 위한 기본 개념은 전기적인 컨덕턴스 G의 관계를 갖는 아크 내에 축적된 에너지 Q로 가정한다.

$$G = F(Q) = F \left[\int (W - N) dt \right] \quad (4)$$

(W : 입력 전력, N : 전력손실)

이 축적된 에너지는 아크의 열적 관성을 설명하고 아크 컨덕턴스 G의 변화를 제한한다. 식 (4)를 미분 방정식 형

태로 변형하면 식 (5)와 같다^[5].

$$\frac{dG}{dt} = (W - N) \frac{dF(Q)}{dQ} \quad (5)$$

III. 마이크로프로세서를 이용한 AFCI 설계

전기 회로계에는 여러 가지 아크와 유사한 신호가 존재한다. 일반적으로 아날로그회로를 이용하여 아크전류 신호를 검출 할 때는 일회성 아크, 아크형태의 신호 및 전기 화재의 원인이 될 수 있는 아크신호를 구분하기가 쉽지 않다. 그러므로 아크 전류 제어를 위해서는 새로운 개념에서 제어기를 설계하여야 한다. 또한, 일반적으로 사용되어지는 전기 드릴, 진공 청소기등 각종 전기 기구에서 발생하는 아크 형태의 신호와 전기 도선에서 발생하는 아크방전 전류를 구분 할 수 있어야 한다.

본 연구에서 제안한 아크결함 차단기(AFCI)는 이러

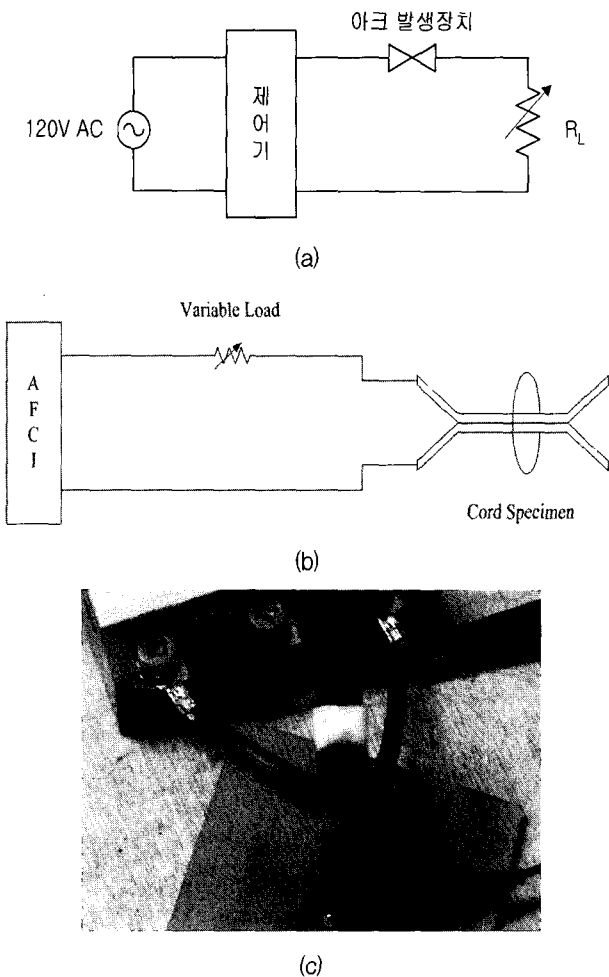


그림 6. 아크 발생 장치(UL1699 규정)
Fig. 6. Arc Generator(UL1699).

한 전기 기구에서 발생하는 노이즈와 전기 도선에서 발생한 아크 전류를 구분하여 전기 도선에서 발생하는 아크 방전 전류만을 검출 차단할 수 있도록 하기 위하여 마이크로프로세서를 이용하여 AFCI를 설계하였다. 그림 7은 설계한 제어기의 성능 실험을 위한 아크 발생 장치의 구성을 나타낸다. 그림 6(a)는 아크 결함을 발생하기 위한 장치이며, 그림 6(b)는 clearing time test를 위한 장치를 보여준다. 그림 (c)에는 그림 (b)에 의해 실험을 하기 위한 카본화 된 전선을 보여준다. 이 실험에서는 카본화된 영역을 따라서 전류가 흐를 때 나타나는 아크 결함에 의한 사고를 방지할 수 있는 기능을 보기 위한 것이다.

그림 7에서는 아크 결함을 처리하기 위한 순서를 나타내었다. 그림에서 처리부에는 기존 아날로그 회로를 이용하였으나 본 연구에서는 PIC16C711 마이크로프로세서를 이용하였다.

아크고장 전류 차단기는 전류가 인입되는 입력부와 차단부, 아크전류를 검출하는 검출부 및 신호를 처리하는 처리부로 구성되어 있다. 그림 8은 설계한 AFCI의 차단 영역을 나타낸다.

입력부를 통해 전류가 인가되면 아크방전 전류 검출

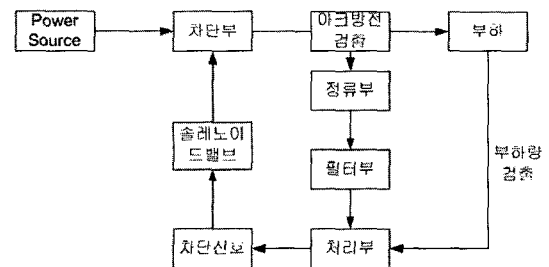


그림 7. 아크고장 전류 차단기 블록도
Fig. 7. Block diagram for the Arc Fault Circuit Interrupter.

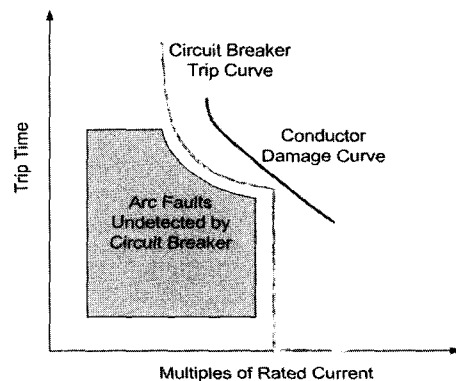


그림 8. AFCI 차단곡선
Fig. 8. Trip curve of AFCI.

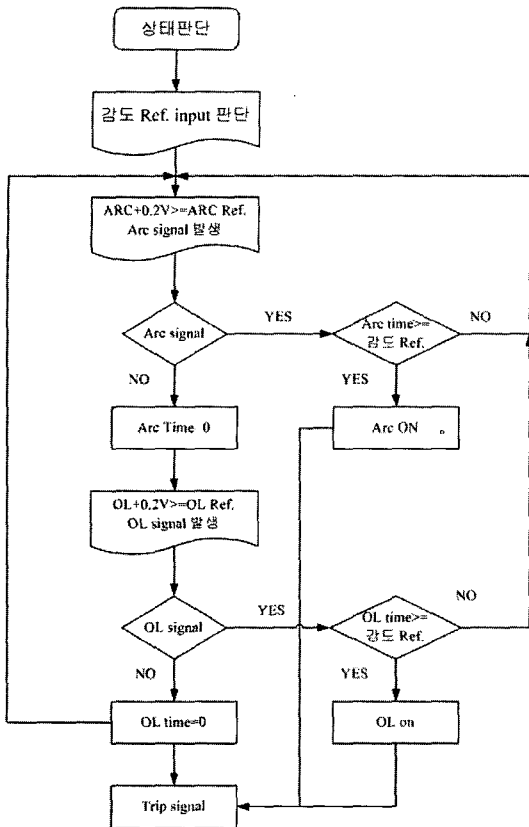


그림 9. 아크결함을 처리하기 위한 알고리즘
Fig. 9. Algorithm of AFCI.

부에서는 실시간으로 전류를 모니터링하여 아크방전 전류로 인식하면 프로세서에 신호를 송신하게 되고 이에 따라 프로세서에서 처리하여 전류 차단부에 차단 신호를 보낸다. 그림 9는 프로세서에서 아크 결함을 처리하는 순서도를 나타낸다.

IV. 실험결과 및 고찰

4.1 실험 결과 및 고찰

본 논문에서는 III장에서 제시한 AFCI를 설계하여 아크를 인가하여 실험을 하였다.

표 1은 설계한 AFCI의 성능 시험을 위하여 규정한 UL1699의 규격이다. AFCI의 정격은 20A를 가지고 실험

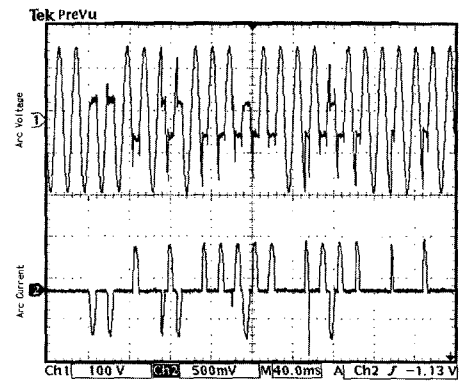
표 1. UL 1699 실험 규격
Table 1. Specification of UL1699.

부하 \ 정격	15A	20A
5A	1sec	1sec
10A	0.4sec	0.4sec
정격	0.28sec	0.20sec
150%	0.16sec	0.11sec

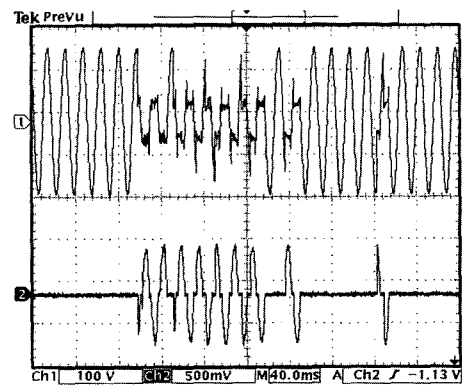
험을 실시하였다. 표에서와 같이 주어진 부하량에 따라 부하전류 차단 시간이 달라진다.

UL에서는 500A까지 실험하도록 되어 있으나 본 연구에서는 5A~150A 까지의 범위를 가지도록 하였다. 그림 10은 120A의 load를 인가했을 때 두 전극 사이에서 나타나는 아크 전류와 전압 파형을 나타낸다. 아크 전류가 발생한 시간은 240ms 이상이며 아크 검출 기능이 없는 일반 차단기를 이용하여 검출된 파형이다. 여기서는 아크 전류가 발생함에도 불구하고 아크 전류를 검출하지 못하므로 부하전류 차단되지 않음을 보여 준다.

그림 11은 본 논문에서 제안한 AFCI를 이용하여 검출한 전류, 전압 파형을 나타낸다. 그림 11에서는 아크 전류가 발생하기 시작하여 20ms만에 부하로의 전류가 차단되었다. 실험에 사용한 부하전류는 5~100A 까지는 저항 부하를 이용하였고, 100A 이상에서는 전기 도선을 사용하였다.



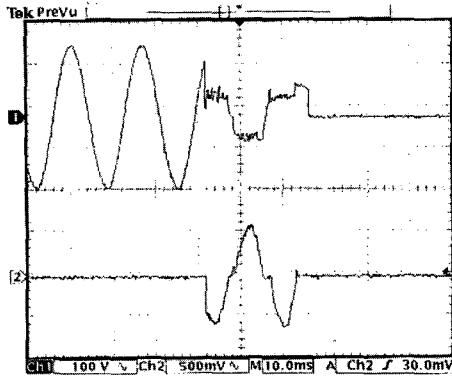
(a)



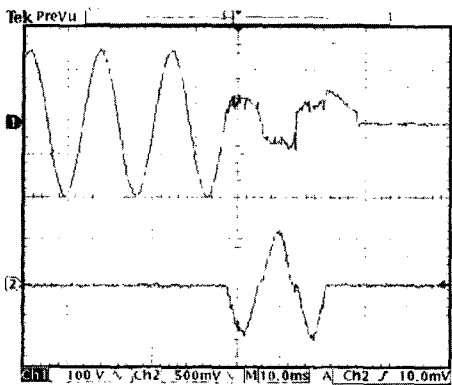
(b)

그림 10. 아크방전 검출기능이 없는 전류 제어기의 전류 전압 파형

Fig. 10. Current & Voltage Characteristics of current controller without arc current detection.



(a)



(b)

그림 11. AFCI에 의한 아크 전류, 전압 파형
Fig. 11. Current & Voltage Characteristics of AFCI.

표 2. 제어기에 의한 아크차단 시간
Table 2. Interruption time of arc controller.

제어기	반파(개)	전류차단시간
Arc 전류제어기	3-8	15-66ms

또한 설계한 AFCI는 병렬성 아크인 경우 아크 전류 파형이 8개의 반파가 발생하기 이전에 부하에 전달되는 전류를 차단할 수 있었다.

V. 결 론

본 AFCI에서는 기존 전류 제어기가 가지고 있지 않은 아크 전류에 대한 제어를 할 수 있는 제어기 설계를 통하여, 일반적인 환경에서 사용되는 저전류, 저전압의 전원에서 발생하는 아크 전류를 제어하였으며, 아크 전류가 발생할 수 있는 여러 가지 환경에서의 아크 전류 제어 실험을 통하여, 전기 배선상에서 이루어지는 고장 전류를 제어할 수 있다. 또한 아날로그 형태에서 발생하던 넓은 오차 범위를 마이크로프로세서를 사용하여

줄일 수 있었으며 더 정확한 아크 결함을 검출 차단할 수 있었다.

본 논문을 통하여 산업용의 대전류 및 기타 산업에서의 전기로 인한 재해를 줄일 수 있는 방법으로 응용될 수 있을 것이다. 본 실험에서, 기존 전류 제어기의 경우에는 아크 전류가 연속적으로 발생해도 아크 전류에 대한 검출 및 제어가 불가능 하였다. 본 논문에서 제시한 제어기를 이용 하였을 때 아크 전류의 차단시간은 20ms ~ 0.5s 이내에 아크 전류를 차단시킴으로 AFCI의 성능을 확인하였다.

참 고 문 헌

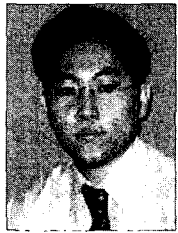
- [1] 장정근. "전기화재 감지기법 연구 (A Study on the Outbreak of Fire Phenomenon by Deterioration for an Organic Insulated Material)" 한국전기안전공사 전기안전시험 연구원 12월, 1998.
- [2] W. Wang, S. Liu and J. E. Jones "Flux cored arc welding : Arc signals processing and metal transfer characterization", Welding Journal, Vol. 74. No. 11, pp.369-377, 1995.
- [3] H. Nomura, Y. Sugitani : "Automatic Real-time Bead Height Control with Arc Sensor(Report2)", Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol.4, No. 3, pp.24-30, 1988.
- [4] Underwriters Laboratories Inc. UL1699 ISBN 0-7629-0401-1 "Arc-Fault Circuit-Interrupters", December 1, 2000.
- [5] NEC(National Electric Code) : Article 210-Branch Circuits 210-12, (1999 Edition)
- [6] 한국전기연구소, " 개폐장치 설계기술 개발을 위한 대전류 아크 특성에 관한 연구", 1991. 7. 12
- [7] L. C. Cullity, "Introduction to Magnetic Materials", Addison-Wesley, 1972.
- [8] E. C. Snelling, "Soft Ferrites : Properties and Applications", Butterworths, 1993.
- [9] B. Lax, "Microwave Ferrites and Ferrimagnetics", McGraw-Hill Book Company, 1962.
- [10] Jeong-Wan Kim, Cheon-Youn Kim, Dong-Sub Kim, Gi-Jong Ban "Device and method for detecting arc fault", United States patent, No. US6,556,397 B2 Apr. 29, 2003.
- [11] 김천연, 반기중, 김동섭, "아크 결함 검출 장치", 대한민국특허청, No. 10-0434664, 2004. 5. 25.
- [12] David Dini, "Arc Fault Circuit Interrupter", 2002.
- [13] Jeong-Wan Kim, Cheon-Youn Kim, Dong-Sub Kim, Gi-Jong Ban, "Overload circuit interrupter capable of electrical tripping and circuit breaker

with same”, US 6,577,478 B2, 2003. 6. 10

[14] Jeong-Wan Kim, Cheon-Youn Kim, Dong-Sub Kim, Gi-Jong Ban , “Circuit breaker with display function” , US 6,552,884 B2, 2003. 4. 22

[15] 김천연, 반기종, 김동섭, “전자적인 트립이 가능한 과부하 검출회로 및 이를 구비한 회로 차단기”, 대한민국 특허청, 10-0386815-0000, 2003. 5. 10

저 자 소 개



윤 광 호(정회원)
1999년 호서대학교 전기공학과 학사 졸업.
2001년 건국대학교 전기공학과 석사 졸업.
2005년 건국대학교 전기공학과 박사 졸업.
2006년~현재 한국원자력연구소
<주관심분야 : AFCI, 화재방지시스템, Observer, Fuzzy, Neural Network, Motor Control, 최적제어>



반 기 종(정회원)
1995년 호서대학교 제어계측 공학과 졸업.
1998년 건국대학교 전기공학과 석사 졸업.
2006년 건국대학교 전기공학과 박사 졸업.
2001년~현재 부천대학 전자과 겸임교수
<주관심> AFCI, 화재방지시스템, AI, Fuzzy , Motor Control, 최적제어, 재활로봇



이 효 직(정회원)
1995년 KAIST 기계공학과 졸업.
1998년 KAIST 기계공학과 석사 졸업.
2004년 KAIST 기계공학과 박사 졸업.
2004년~현재 한국원자력연구소
<주관심분야 : 지능제어, 로보틱스, 원격조종기, 이상감시>



박 병 석(정회원)
1986년 조선대학교 기계공학과 졸업.
1990년 전남대학교 기계공학과 졸업(석사).
2002년 충남대학교 기계설계 공학과 졸업(박사).
1987년~현재 한국원자력연구소 책임연구원 (Lab장).
<주관심분야 : 힘반영 서보매니플레이터, 로보틱스, 시스템 식별 및 제어>



남 문 현(정회원)
1975년 연세대학교 전기공학과 박사 졸업.
1980년~1982년 Univ. of California Berkeley 전기전산과 초빙교수.
1976년~현재 건국대학교 전기공학과 교수
<주관심분야 : 자동제어, Observer, Fuzzy, Neural Network, Motor Control, 최적제어, 생체신호처리>