

Arc Fault Circuit Interrupter Design for Electrical Fire Protection

潘基宗* · 金洛教†
(Gi-Jong Ban · Lark-Kyo Kim)

Abstract - Arc Fault Current is an electric discharge which is occurred in two opposite electrode. In this paper, AFCI(arc fault circuit interrupter) is designed for the interruption of arc fault current which is occurred in the local electric network. This arc is one of the main causes of electric fire. Arc fault in electrical network has the characteristics of low current, high impedance and high frequency. Conventional arc fault circuit interrupter does not have the arc current interrupt function. Hence, Arc current controller is designed for the interruption of arc fault current which has the modified arc characteristics.

Key Words : AFCI, Arc, Fire Protection, Arc Current Controller, Sensor

1. 서 론

본 논문에서는 일반적인 전기환경에서 발생하는 아크방전에 의한 전기 안전에 관하여 연구하였다. 전기의 사용은 현대에 들어서 필요불가결한 것이 되어 있으나, 그에 따른 부작용으로 전기에 의한 화재가 발생하는 것이다. 미국을 비롯한 북미지역에서는 가정용 전류 차단장치에 우선적으로 AFCI(Arc Fault Circuit Interrupter)의 사용을 의무화 하였으며, 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 미연에 방지할 수 있는 AFCI를 설계하였다. 연구에서 사용한 정격전압 120V에서 250V, 정격전류 5-150A의 전류에서 발생하는 아크를 대상으로 하였다. 아크방전은 전원선 및 중성선 사이에서 발생하는 병렬성 아크방전, 전원선이 단선 되거나 전기 기구에 느슨하게 연결되어 있는 경우에 발생하는 직렬성 아크방전등 여러 가지로 분류할 수 있으나, 여기에서는 직렬성 아크방전과 병렬성 아크방전 두가지로 한정하여 실험을 실시하였다. 현재까지 국내를 비롯하여 국외에서도 아크방전에 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 아크 방전에 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, 주택등에서의 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 요구 되었으며, 아크방전 신호를 검출 할 수 있는 센서가 필요하게 되었다. 본 연구에서는 이에 따른 센서 설계 방법을 제안하고, 아크방전 검출용 센서를 설계하였고, 전기 화재 방지를 위한 아크방전현상을 검출하고 부하로의 아크 전류를 차단할 수 있는 아크고장전류 차단 제어를 설계하였다[1][2].

2. 아크전류의 특성 및 모델링

2.1 아크방전 전류의 종류 및 특징

일반적인 전기 사용시 발생하는 아크방전의 형태는 여러 가지로 나타나고 있으나 여기서는 직렬형 아크방전과 병렬형 아크 방전 두가지로 분류하였다. 그림 1의 (a), (b), (c)에

† 교신저자, 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : lkkim@konkuk.ac.kr

* 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 博士課程
接受日字 : 2006年 3月 10日
最終於了 : 2006年 3月 24日

3가지 아크방전의 형태를 나타내었다.

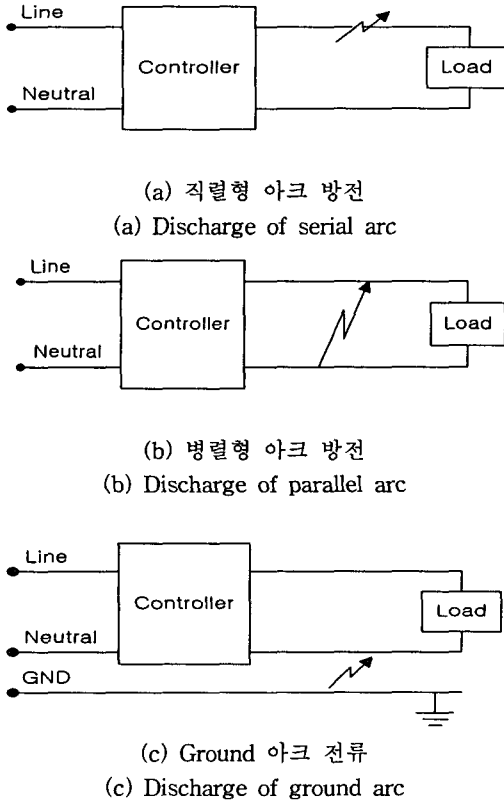


그림 1 아크방전의 발생 형태
Fig. 1 Classification of discharge

그림 1에서 발생빈도가 높은 아크는 병렬성 아크방전이며 병렬성 아크방전에 의한 화재의 위험성이 가장 높다. 그러나 아크방전 현상은 우리 주변에서도 쉽게 나타나므로 아크방전현상만을 검출하기가 어려움이 많다. 그림 2는 직렬성 아크 방전현상을 나타내고 있다. 아크 방전현상을 재현하기 위하여 제작한 아크방전 발생장치는 Anode는 동을 이용하고 Cathode는 카본을 이용하여 아크 방전현상의 발생이 용이하도록 하였다[3][4].

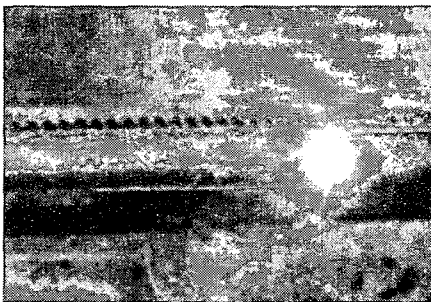


그림 2 직렬성 아크 방전 현상
Fig. 2 Discharge phenomenon of serial arc

그림 3은 일반적으로 나타날 수 있는 형태의 아크방전 파형으로, 직렬로 연결된 전기 도선에 저항 부하를 연결하고

아크방전 발생기에 의해 아크방전 전류를 발생시켰을 때 나타나는 파형이다.

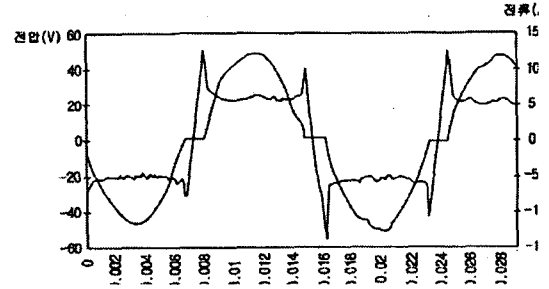


그림 3 저항 부하일때의 아크에 의한 전류 특성
Fig. 3 Arc current Characteristics of resistive load

아크방전 전류는 정상 파형이 일그러지는 점 즉 shoulder에서 아크방전 현상이 발생한다. 그림에서 아크는 시간에 따라 불연속적으로 발생하며 전압의 rms 값은 정상파형보다 작아짐을 알 수 있다. 그림 4는 진공청소기의 기동시 전류, 전압 특성을 나타내며 그림 5는 형광등의 기동시 전류, 전압 특성을 보여준다. 진공청소기와, 형광등의 기동시에 나타나는 전류, 전압은 아크 방전전류의 발생에 의한 전류, 전압과 유사한 특성을 갖기 때문에 아크방전 전류와 구분할 필요가 있다.

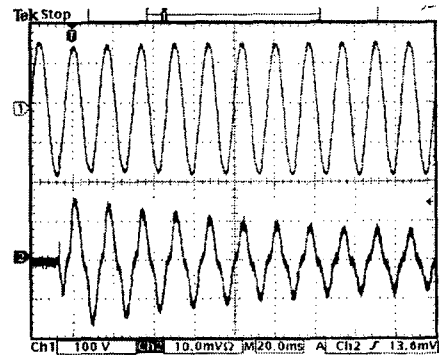


그림 4 진공청소기 기동시 전류 특성
Fig. 4 Startup transient of vacuum cleaner

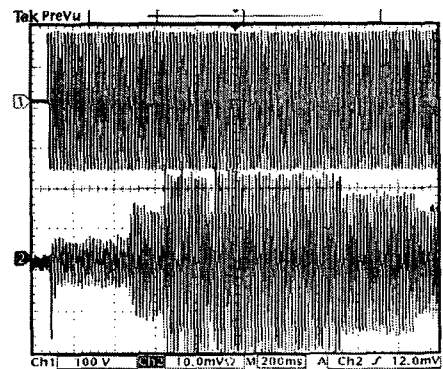


그림 5 형광등 기동시의 전류 특성
Fig. 5 Startup transient of fluorescent lamp

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 온도와 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 형태로 변형하면 식 (5)와 같다[5].

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

2.4 아크 방전 전류 검출 센서 설계

전류 검출 센서로는 일반적으로 CT(Current transformer)를 사용한다.

CT센서는, 1차측은 적게 감고, 2차측은 많은 횡수를 감는 형태로 하였으며 높은 권수의 비율은 많은 누설자속을 발생시키므로 누설자속을 줄이기 위하여 환형 형태의 고투자율을 갖는 재료를 사용하여 밀접한 철심결합을 하여 누설자속을 최소화 시킨다. 여자 전류는 센서의 정밀도를 결정한다.

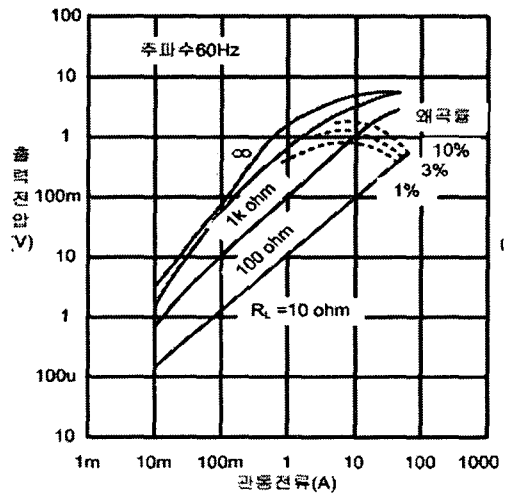


그림 6 전류센서의 특성
Fig. 6 Characteristics of current sensor

여자 전류는 철심의 히스테리시스와 와전류손에 해당하는 1차측 전류의 일부로서 2차 전류는 1차 전류에서 여자 전류를 뺀 값과 비례하기 때문에 오차의 원인이 되며 오차의 크기는 1차 전류의 자화전류의 비율에 정비례한다.

2차측의 부하전류는 부하저항과 결합하여 2차 전압을 형성한다. 2차 전압은 식 (6)으로 나타낸다.

$$E_s = I_s \times R_B \quad (I_s : \text{부하전류}, R_B : \text{부하저항}) \quad (6)$$

1차측 전류 I_P 는 식(7)로 표현되며 I_P 는 측정 또는 조절된 전류이므로 1차와 2차 전류의 비는 권수비와 반비례한다.

$$I_P = I_S \times \frac{N_S}{N_P} \quad (7)$$

대부분의 경우 1차측은 1회이므로 1차 전류는 $I_P = I_S \times N_S$ 이 된다. 1차측에서 사용되는 권선의 단면적은 식 (8)에 의해 결정된다.

$$W_a = \frac{A_C \times N_S}{K} \quad (8)$$

여기서 K는 권선계수로 권선간 공극과 권선 절연, 층간 절연과 관련이 있으며 2차와 1차권선에 높은 전압이 사용되면 K값은 감소되어야 한다.

센서의 다른 특성은 포화특성으로 자속밀도 B는 식 (9)로 나타낸다.

$$B = \frac{E_S \times 10^8}{4.44 \times N_S \times f \times A_C} \quad (9)$$

(B : 자속밀도[Gauss], f : 주파수, A_C : 유효 철심의 단면적 [cm^2])

철심의 자속밀도는 재료의 최대 자속밀도보다 적은가를 확인하고, 적지 않으면 보다 큰 면적의 철심을 선택하고, 계산된 자속밀도가 재료의 최대보다 작으면 단면적이 적은 철심을 사용한다[6][7][8].

3. AFCI 설계

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

본 연구에서 제안한 아크고장전류차단기(AFCI)는 이러한 전기 기구에서 발생하는 노이즈와 전기 도선에서 발생한 아크 방전 전류를 구분하여 전기 도선에서 발생하는 아크 방전 전류만을 검출 차단할 수 있도록 설계하였다. 그림 7은 설계한 제어기의 성능 실험을 위한 아크 발생 장치의 구성을 나타낸다.

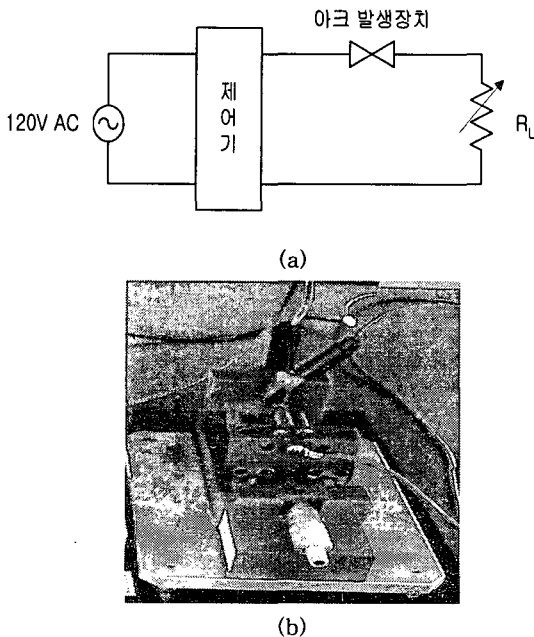


그림 7 아크 발생 장치(UL1699 규정)
Fig. 7 Arc Generator(UL1699)

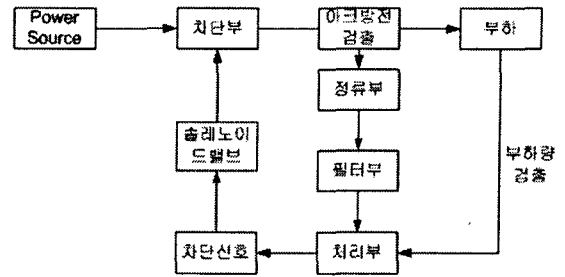


그림 8 아크고장 전류 차단기 블록도
Fig. 8 Block diagram for the Arc Fault Circuit Interrupter

아크고장 전류 차단기는 전류가 인입되는 입력부와 차단부, 아크전류를 검출하는 검출부 및 신호를 처리하는 처리부로 구성되어 있다. 그림 8은 아크고장전류차단기의 전체 구성도를 나타낸다.

입력부를 통해 전류가 인가되면 아크방전 전류 검출부에서는 실시간으로 전류를 모니터링하여 아크방전전류로 인식하면 프로세서에 신호를 송신하게 되고 이에따라 프로세서에서 처리하여 전류 차단부에 차단 신호를 보낸다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험 결과 및 고찰

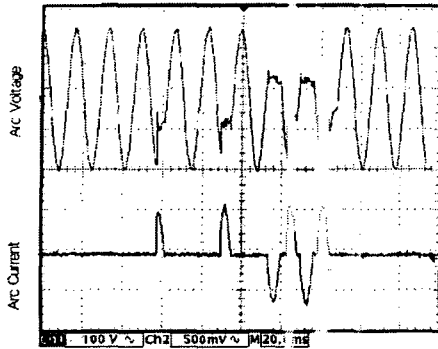
본 논문에서는 3장에서 제시한 AFCI를 설계하여 아크방전 전류를 인가하여 실험을 하였다. 실험은 UL1699의 실험 항목을 위주로 하였다.

UL1699의 규정을 표 1에 나타내었다. AFCI의 정격은 15A 와 20A 두가지를 가지고 실험을 실시하였다. 표에서와 같이 주어진 부하량에 따라 부하전류 차단 시간이 달라진다.

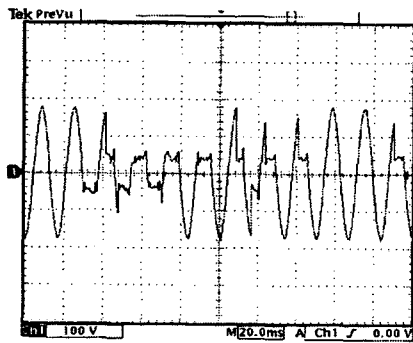
표 1 UL 1699 실험 규정
Table 1 Specification of UL1699

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

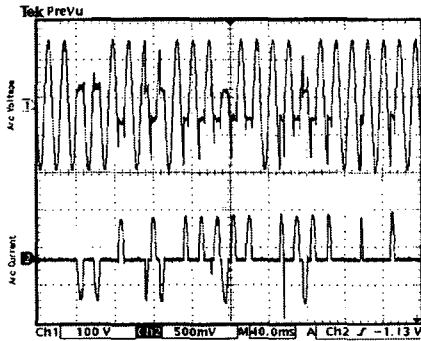
아크방전 전류는 5A ~ 150A 까지의 범위를 가지도록 하였다. 그림 9는 120A의 load를 인가했을 때 두 전극 사이에서 나타나는 아크방전 전류와 전압 파형을 나타낸다. 아크방전 전류가 발생한 시간은 90ms 이며 아크 방전 검출기능이 없는 기존의 전류 제어기를 이용하여 검출된 파형이다. 여기서는 아크방전 전류가 발생함에도 불구하고 아크방전 전류를 검출하지 못하므로 부하전류 차단되지 않음을 보여준다.



(a)



(b)



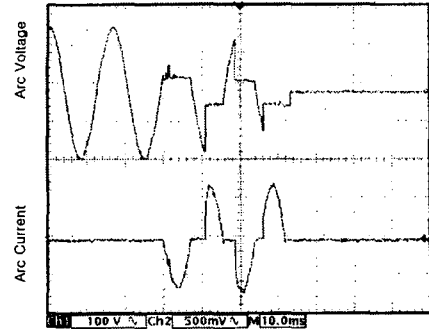
(c)

그림 9 아크방전 검출기능이 없는 전류 제어기의 전류 전압 파형 (a)점접촉 아크전류, 전압 (b)점접촉 아크전압 (c)점접촉 아크 전류, 전압II

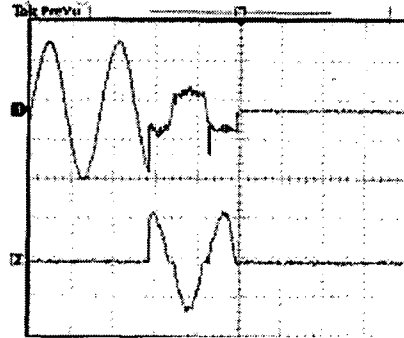
Fig. 9 Current & Voltage Characteristics of current controller without arc current detection

(a) point contact arc current & voltage I (b) point contact arc voltage (c) point contact arc current & voltage II

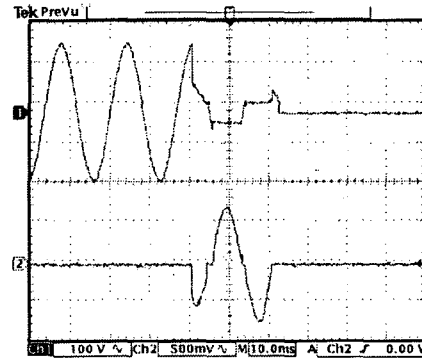
그림 10은 본 논문에서 제안한 AFCI를 이용하여 검출한 전류, 전압 파형을 나타낸다. 그림 10에서는 아크방전 전류가 발생하기 시작하여 26ms만에 부하로의 전류가 차단되었다. 실험에 사용한 부하전류는 5~100A 까지는 저항 부하를 이용하였고, 100A 이상에서는 전기 도선을 사용하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 10 AFCI에 의한 아크 전류, 전압 파형

(a) 점접촉아크 전류, 전압I (b)점접촉아크 전류, 전압II (c)점접촉아크 전류, 전압III

Fig. 10 Current & Voltage Characteristics of AFCI

(a) point contact arc current & voltage I (b) point contact arc current & voltage II (c) point contact arc current & voltage III

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

표 2 제어기에 의한 아크차단 시간

Table 2 Interruption time of arc controller

제어기	반파(개)	전류차단시간
Arc 전류제어기	3-8	24-66ms

5. 결 론

본 AFCI에서는 기존 전류 제어기가 가지고 있지 않은 아크방전 전류에 대한 제어를 할 수 있는 제어기 설계를 통하여, 일반적인 환경에서 사용되는 저전류, 저전압의 전원에서 발생하는 아크방전 전류를 제어하였으며, 아크방전 전류가 발생할 수 있는 여러 가지 환경에서의 아크방전 전류 제어 실험을 통하여, 전기배선상에서 이루어지는 이상전류를 제어할 수 있다.

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 아크방전 전류에 대한 검출 및 제어가 불가능 하였다. 본 논문에서 제시한 제어기를 이용하였을 때 아크 전류의 차단시간은 20ms ~ 0.5s 이내에 아크 전류를 차단시킴으로 전류제어기의 성능을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] 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

[2] 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

[3] Underwriters Laboratories Inc. UL1699 ISBN 0-7629-0401-1 "Arc-Fault Circuit-Interrupters", December 1, 2000.

[4] NEC(National Electric Code) : Article 210-Branch Circuits 210-12, (1999 Edition)

[5] 한국전기연구소, "개폐장치 설계기술 개발을 위한 대전류 아크 특성에 관한 연구", 1991. 7. 12

[6] L.C. Cullity, "Introduction to Magnetic Materials", Addison-Wesley, 1972.

[7] E. C. Snelling, "Soft Ferrites : Properties and Applications", Butterworths, 1993.

[8] B. Lax, "Microwave Ferrites and Ferrimagnetics", McGraw-Hill Book Company, 1962

[9] 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

[10] 김천연, 반기종, 김동섭, "아크 결합 검출 장치", 대한민국특허청, No. 10-0434664, 2004. 5. 25.

[11] 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

[12] 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

[13] 김천연, 반기종, 김동섭, "전자적인 트립이 가능한 과부하 검출회로및 이를 구비한 회로 차단기", 대한민국 특허청, 10-0386815-0000, 2003. 5. 10

[14] 김천연, 김동섭, 반기종, "표시기능을 구비한 회로 차단기", 대한민국특허청, 10-0434663-0000, 2004. 5. 26

저 자 소 개



반 기 종(潘基宗)

1969년 10월 9일생. 1995년 호서대학교 제어측공학과 졸업. 1998년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사과정재학. 2001년~현재 부천대학 전자과 겸임교수.

Tel : (02) 456-2585

Fax : (02) 444-8868

E-mail : sklogo@nate.com



김 낙 교(金洛教)

1949년 2월 4일생. 1973년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1977년 연세대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986-87 Oregon State Univ. 교환교수. 1996-97 Ohio State Univ. 교환교수. 1978-80한국 원자력 연구소 선임연구원. 1980-현재 건국대학교 전기공학과 교수

Tel : (02) 450-3485

Fax : (02) 447-9186

E-mail : lkkim@konkuk.ac.kr