

## Design of Control a Algorithm for Arc Fault Current without Current Sensor

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

**Abstract** - Arc Fault Current is an which occurs in two opposite electrode. In this paper, arc current control algorithm is designed for the interruption of arc fault current which is occurred in the low voltage network. This arc is one of the main causes of electric fire. General arc current sensor has troubles for detecting arc currents, thus we would like to propose the arc current detection method without current sensor.

In this paper, arc discharge currents within power lines are being detected through the arc current control algorithm.

**Key Words** : AFCL, Arc, Arc Current Controller, Current Sensor

### 1. 서 론

본 논문에서 설계한 아크 고장 전류 제어 알고리즘은 일상적으로 많이 사용하는 정격전압 120V에서 250V, 정격전류 5-150A에서 발생하는 아크 고장 전류를 대상으로 하였다. 아크 고장 전류는 전원선 및 중성선 사이에서 발생하는 병렬 아크, 전원선이나 중성선 등이 단선 되거나 전기 기구에 느슨하게 연결되어 있는 경우에 발생하는 직렬 아크, 중성선과 접지 사이에서 발생하는 접지 아크로 구분한다. 이러한 아크는 전기 화재로 발전할 수 있는 원인으로 분석되어 있으며, 현재까지는 전기화재의 경우 누전에 의한 것으로 연구 인식 되어왔으며, 누전전류의 검출 및 차단에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔으며, 계속적으로 알고리즘이 변천되어 왔으나 전기로 인한 화재는 줄어들지 않고 있다. 국내에서는 아직까지 누전전류를 검출하는 장치가 일반적으로 사용되고 있으나, 미국등을 비롯한 북미지역에서는 최근에 와서 화재의 주요 원인이 아크방전 전류에 의한 것으로 판단하고 이에 따라 아크 고장 전류를 차단할 수 있는 장치의 개발에 박차를 가하고 있다. 초창기 가정용에서 시작하여 현재는 에어컨등 개별 전기기기에 사용하도록 범용화 되어가고 있다. 기존의 알고리즘들은 전류 센서를 사용하여 아크방전 전류를 검출하는 방식을 취하고 있으나 여러 가지 문제점을 가지고 있다[1][2]. 센서는 포화 특성을 가지므로 일정량 이상에서는 동일한 성능을 나타내도록 하고 있다.

그러나 기존의 센서를 이용하여 아크 전류를 검출함으로써 여러 가지 전기 기기들을 사용할 때 발생하는 아크성

호를 검출 하는데 한계점을 가지고 있으므로 센서를 사용하지 않고 아크 고장 전류를 검출 할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 본 논문에서는 전류 센서를 사용하지 않고 전원 라인에서 회로의 구동을 위하여 인가되는 120 -250V의 전원을 입력받아 전파정류 및 직류 전압으로 변형한뒤에 회로에서 전류에 포함되어 있는 신호를 적분기와 미분기, 밴드패스 필터를 이용하여 아크 고장 전류 신호만을 취하여 로직 회로의 입력 신호로 하여 UL에 주어진 아크 고장 전류의 규격에 해당할 때 부하전류를 차단할 수 있도록 하였다.

### 2. 아크전류의 수학적 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.

\* 교신저자, 正會員 : 建國大學 電氣工學科 教授 · 工博  
E-mail : lkim@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 20日  
最終完了 : 2006年 4月 6日

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

또, 아크전류는 두 개의 전극사이에 존재하는 기체는 전기적으로 전도되기에 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.

Mayr의 아크 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$F(Q) = Ke^{\frac{Q}{Q_0}}, N = N_0 \quad (3)$$

여기서  $N_0$ 는 일정한 전력손실이고  $Q_0$ 는 일정한 축적 에너지량이다. 또한 특정시간을 고려하여 다음과 같이 정의한다.

$$\theta = \frac{Q_0}{N_0} \quad (4)$$

이들 관계에서 다음과 같이 Mayr의 미분방정식을 유도할 수 있다

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G}{\theta} \left( \frac{W}{N_0} - 1 \right) \quad (5)$$

여기서  $\theta$ 와  $N_0$ 는 상수이고,  $\theta$ 는  $W=0$ 으로 두고  $\frac{dG}{dt} = \frac{G}{\theta} \left( \frac{W}{N_0} - 1 \right)$ 식을 적분하여 구할 수 있다.  $W=0$ 으로 두고 해를 구하면 다음 식과 같다.

$$G = G_0 e^{\left(-\frac{t}{\theta}\right)} \quad (6)$$

위식에서와 같이 아크 컨덕턴스 G는 입력이 없을 때 지수적으로 초기값  $G_0$ 에서 시정수  $\theta$ 로 감소한다.

### 2.1 Arc 방전전류의 전기적 특성

일반적인 전기 사용시 발생하는 아크 고장 전류는 3가지 형태로 나타낸다. 아크 발생 위치에 따라 직렬 아크, 병렬 아크, 접지 아크로 나타내고 병렬 아크 고장의 발생빈도가 가장 높으며 병렬 아크에 의한 전기 화재의 위험성이 가장 높다.

아크 고장 전류는 그림 1에서와 같이 정상 파형이 일그러지는 점 즉 shoulder에서 아크가 발생한다.

아크는 시간에 따라 불연속적으로 발생하며 전압의 rms 값은 정상파형보다 작아짐을 알 수 있다

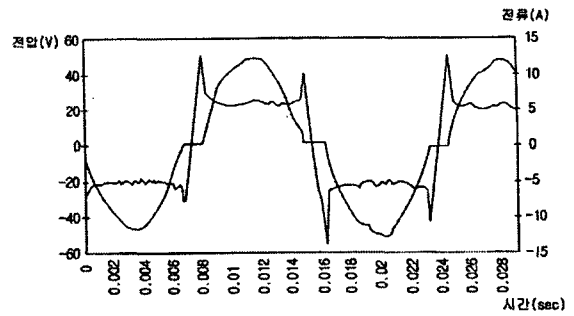


그림 1 저항 부하일때의 아크 방전 전류 특성  
Fig. 1 Arc current Characteristics of resistive load

국제적으로 아크 방전 전류에 대한 규격은 UL1699의 규정을 따르고 있으며, 일반적인 전기 기기의 사용에 있어서 발생하는 아크형태의 신호에 대해 규정을 하고 있다.

그림 2는 Cassie & Mayr의 아크방전 시험을 위한 시뮬레이션 모델을 나타낸다. 그림 3은 MATLAB을 이용하여 Cassie & Mayr의 아크 모델에 대한한 시뮬레이션 파형을 보여준다. 그림 4는 Dimmer 사용시 발생하는 파형으로 아크와 유사한 특성을 갖는다.

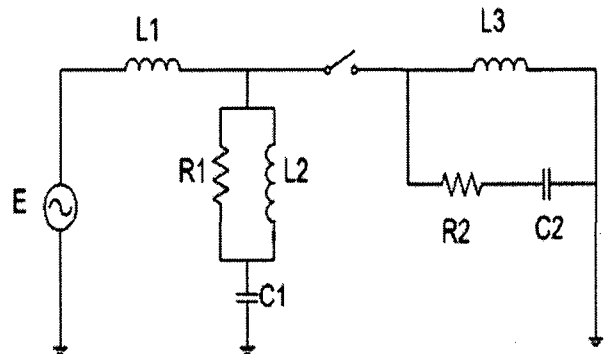


그림 2 Cassie & Mayr의 아크 모델  
Fig. 2 Arc Model of Cassie & Mayr

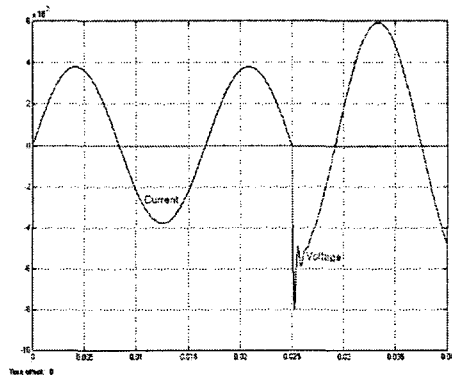


그림 3 Cassie & Mayr의 아크 모델에 의한 모의실험 파형  
Fig. 3 Simulation Result of Cassie & Mayr model

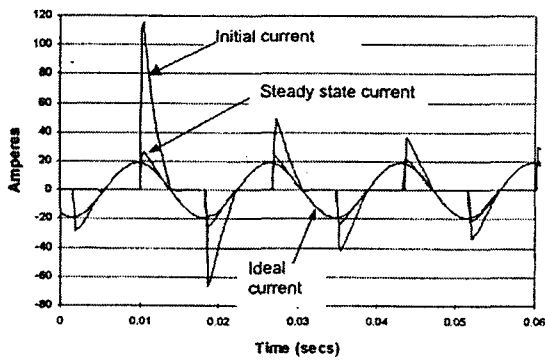


그림 4 Dimmer의 전류 특성  
Fig. 4 Current Characteristics of Dimmer

그림 5는 60W 형광등의 기동시 발생하는 전류 파형을 나타낸다. 형광등의 전류파형도 아크 특성과 유사한 전류 특성을 갖는다. 그림 6은 1000W의 백열전구의 기동시 전류 파형이다. 백열 전구의 배열은 UL1699의 규정에 따라서 설계하였다.

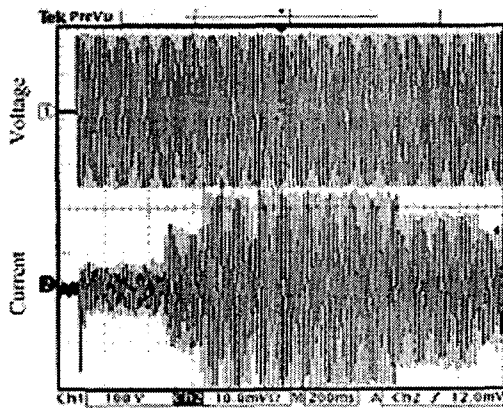


그림 5 형광등의 기동시 출력파형  
Fig. 5 Starting current Characteristics of fluorescent lamp

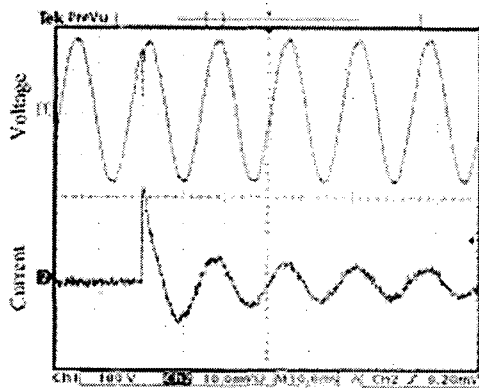


그림 6 1000W 백열전구 기동시 출력파형  
Fig. 6 Transient Characteristics of Lamp(1000W)

### 3. 아크 고장 전류 검출기 설계

전기 회로계에는 여러 가지 아크와 유사한 신호가 존재한다. 일반적으로 아날로그회로를 이용하여 아크전류 신호를 검출 할 때는 일회성 아크, 아크성 신호 및 전기 화재의 원인이 될 수 있는 아크신호를 구분하기가 쉽지 않다. 그러므로 아크 고장 전류를 검출하고 제어를 위해서는 새로운 개념에서 제어기를 설계하여야 한다. 또한, 일반적으로 사용되는 램프, 전기 드릴, 진공 청소기등 각종 전기 기구에서 발생하는 아크 형태의 노이즈와 전기 도선에서 발생하는 아크 고장 전류를 구분 할 수 있어야 한다. 본 논문에서 제안한 아크 고장 전류 제어기는 이러한 전기 기구에서 발생하는 노이즈와 전기 도선에서 발생한 아크 전류를 분류하여 전기 도선에서 발생하는 아크 전류만을 검출 차단할 수 있는 제어기를 설계하였다. 기존에는 전류 센서를 이용하여 아크 고장 전류를 검출하였으나 여기에서는 전류센서를 배제하고 전기도선에 존재하는 아크 고장 전류를 검출할 수 있도록 하였다.

그림 7(a),(b)는 아크 고장 전류를 인위적으로 발생시키기 위한 장치의 구성을 보여준다. 장치의 규격은 UL1699를 이용하여 설계하였다.

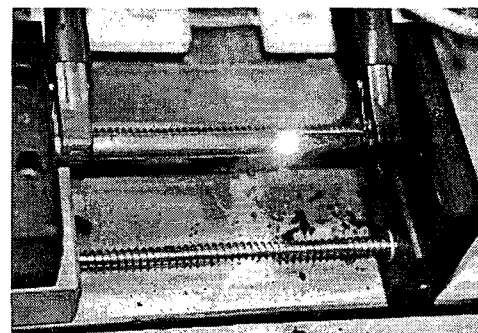
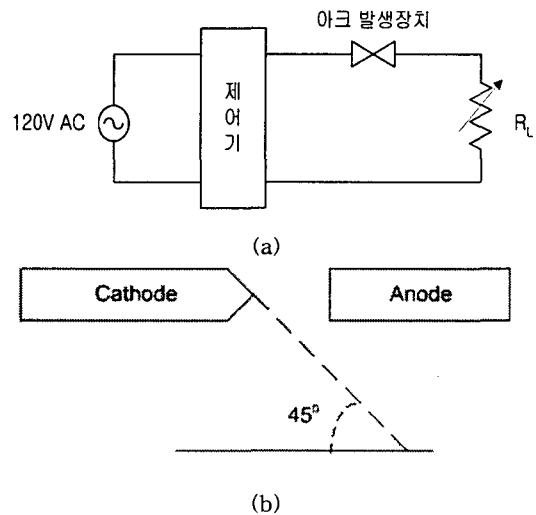


그림 7 아크 발생 장치(UL1699 규정)  
Fig. 7 Arc generator (UL1699)

아크 고장 전류 제어기는 전류가 인입되는 입력부와 차단부, 아크전류를 검출하는 검출부 및 신호를 처리하는 처리부로 구성되어 있다. 그림 8은 아크 전류 제어기의 전체 구성도를 나타낸다.

입력부는 전원 소스를 공급하는 부분이고, 전류 차단부는 아크전류가 발생하면 전류 검출부와 처리부를 거쳐서 부하와 전원 소스를 분리 시키는 역할을 한다. 아크 검출부분은 기존에 CT를 사용하여 전류를 검출 하던 방식에서 소스 전류를 전파 정류하고 레벨을 낮추어 프로세서에서 사용할 수 있는 5V 레벨을 만든다.

낮아진 레벨의 전류 소스는 필터부를 거치고 아크 고장 전류를 증폭시켜서 프로세서에 제공한다. 프로세서에서는 증폭된 아크 고장 전류를 처리하고, 차단부에 보낼 차단 신호를 발생한다. 이 차단 신호는 차단부의 솔레노이드 밸브를 동작시키고, 이와 함께 부하의 전류가 차단되는 구조를 갖는다.

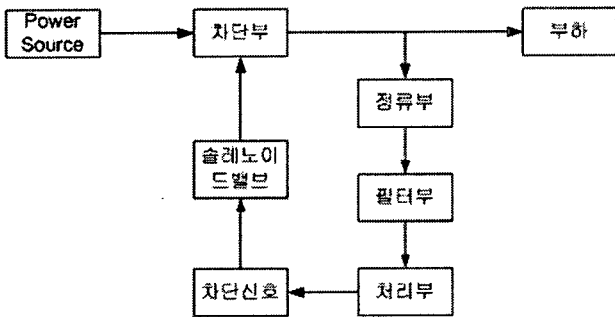


그림 8 아크 전류 제어기 블록도  
Fig. 8 Block diagram of arc current controller

그림 9는 전원부분에 해당하며 120V- 250V의 전원에서 정전압원을 만들기 위한 회로 부분을 나타낸다. 이 부분에서는 아크 고장 전류 신호가 포함되어 있다.

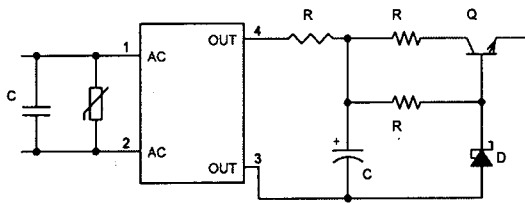


그림 9 정류부 회로  
Fig. 9 Rectifier Circuit

그림 10은 아크 고장 전류를 검출하고 처리하는 부분을 나타낸다. 전원 라인에 포함되어 있는 아크 고장 전류 파형을 검출하고 일정한 레벨의 신호를 만들기 위한 과정을 거친다.

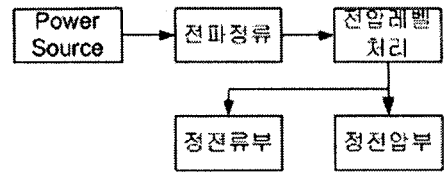


그림 10 아크 고장 전류 검출부  
Fig. 10 Current detection part of arc discharge

그림 11은 아크 고장 전류를 필터링 하기 위한 회로를 나타낸 것으로 주파수 밴드를 구성하기 위한 회로이다. 주파수 밴드폭을 설정하기 위하여 3회의 필터링을 거쳐서 아크 신호를 검출하여 소신호 일경우 증폭 회로를 거쳐서 로직 회로에 입력으로 가해진다.

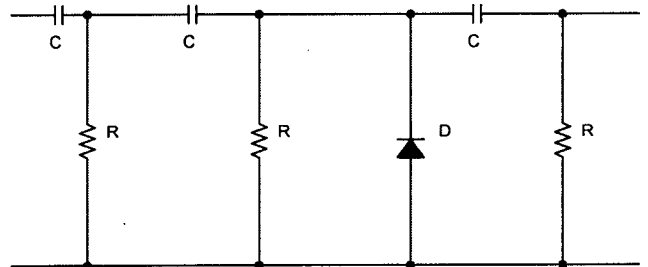


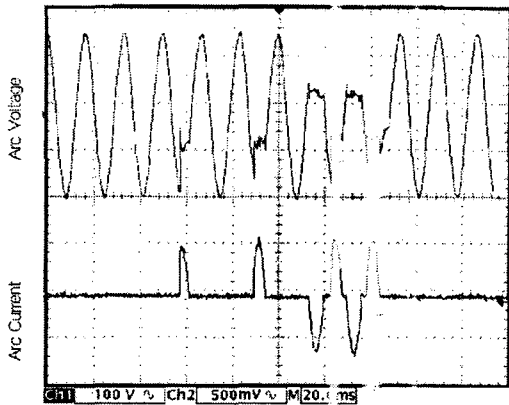
그림 11 아크 고장 전류 필터링 회로  
Fig. 11 Filtering circuit of arc fault current

#### 4. 실험결과 및 고찰

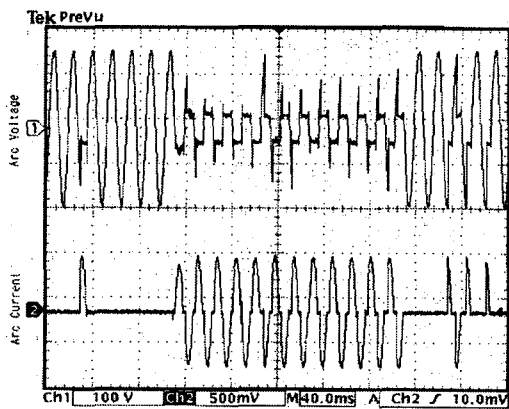
본 논문에서는 3장에서 제시한 아크 고장 전류 검출기를 설계하여 실제 현상과 동일한 환경 조건에서 아크 고장 전류를 인가하여 실험을 하였다.

아크 고장 전류는 5A ~ 150A 까지의 범위를 가지도록 하였다. 그림 12는 120A의 load를 인가했을 때 두 전극 사이에서 나타나는 아크 고장 전류와 전압 파형을 나타낸다. 아크 고장 전류가 발생한 시간은 90ms와 200ms이며 제어가 적용되기 전의 기존 제어기를 이용하여 검출된 파형이다. 여기서는 아크 고장 전류가 발생함에도 불구하고 아크 고장 전류를 검출하지 못하므로 부하전류 차단되지 않음을 보여준다. UL1699의 규정에서는 아크 고장 전류가 발생하고 연속적으로 고장 전류가 나타날 경우 각각의 부하 정격에 따라 전류 차단 시간을 다르게 규정하고 있다. 부하가 5A일 경우에는 1sec 이내에 부하전류를 차단하도록 규정하고 있으며 10A일 경우 0.4sec, 정격부하를 가질 경우 0.28sec의 규정으로 되어 있고, 150%의 과부하일 경우에는 0.16sec 이내에 부하 전류를 차단하여야 한다.

그림 12(a)의 경우 6개의 아크 고장 전류가 발생하였다. 그림 12(b)의 경우에는 24개 이상의 아크 고장 전류 신호가 발생하여도 부하 전류가 차단 되지 않음을 보여준다.



(a)



(b)

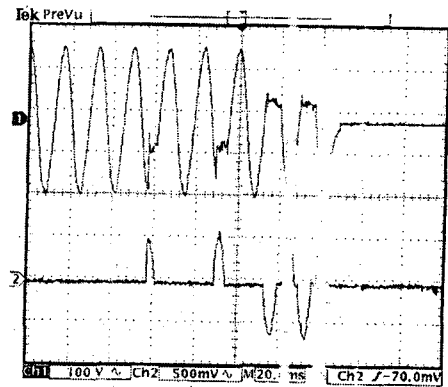
그림 12 아크 고장전류 검출기 적용전의 전류 전압 파형  
Fig. 12 Current & Voltage characteristics of conventional interrupter

그림 13는 본 논문에서 제안한 아크 고장 전류 제어기를 이용하여 검출한 전류, 전압 파형을 나타낸다. 그림 13(a)에서는 아크 고장 전류가 발생하기 시작하여 30ms만에 부하 전류를 차단하였다.

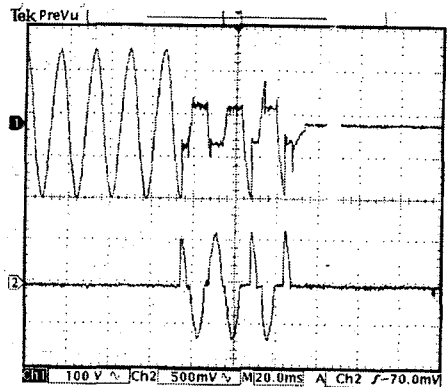
그림 13(b)에서는 60ms에서 부하 전류를 차단 하였다. 실험에 사용한 부하전류는 5~100A 까지는 저항 부하를 이용하였고, 100A 이상에서는 전기 도선을 사용하였다.

또한 설계한 아크 고장 전류 제어기는 병렬성 아크 고장인 경우 아크 고장 전류 파형이 UL1699의 규정인 8개의 반파가 발생하기 이전에 부하에 전달되는 전류를 차단할 수 있었다

표 2는 제안한 제어 알고리즘에 의한 아크 고장 차단 시간을 나타낸다. 아크 고장 전류 차단 실험 결과 제어알고리즘을 적용하기 전에는 아크 고장 전류가 지속적으로 발생을 하여도 부하로 유입되는 아크 전류를 차단할 수 없었다. 그러나 본 논문에서 제안한 제어 알고리즘을 적용하여 실험을 한 경우에는 UL에서 규정한 시간내에 모두 아크 전류를 차단하는 것을 확인하였다.



(a)



(b)

그림 13 제안한 아크 고장 전류 검출기에 의한 아크 전류, 전압 파형

Fig. 13 Current & Voltage Characteristics of proposed arc controller

표 1 제어기에 의한 아크차단 시간

Table 1 Interruption time of arc controller

제어기	반파(개)	전류차단시간
Arc 고장 전류제어기	3-8	30-66ms

### 5. 결 론

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

본 논문을 통하여 산업용의 대전류 및 기타 산업에서의 전기로 인한 재해를 줄일 수 있는 방법으로 발전할 수 있다. 본 실험에서, 기존 전류 제어기의 경우에 아크 고장 전류가 연속적으로 발생해도 아크 고장 전류에 대한 검출 및 제어가 불가능 하였으나 본 논문에서 제시한 제어기를 이용 하

였을 때 아크 고장 전류의 차단시간은 20ms ~ 0.5s 이내에 아크 고장 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. pp. 369-377, No. 11, 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, pp. 24-30. No. 3, 1988

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

[4] 김상현, 김해조, 마대영, 신태민, "방전가공기용 액체 절연 재료의 아크 방전 특성 연구", The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 8, No. 5, pp. 564-571, 1995

[5] 이세현, "아크 용접에 있어서의 아크의 특성과 응용", 대한용접학회, 제 10권, 1호, pp. 7-11, 1992. 3.

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

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

[8] 반기종, 김정완, 김천연, 김동섭. "Device and method for detecting arc fault", United States patent, No. US6,556,397 B2 Apr. 29, 2003

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

[10] 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

[11] 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

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

[13] 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 제어계측공학과 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 건국 대학교 전기공학과 교수  
Tel : 02-450-3485  
Fax : 02-447-9186  
E-mail : lkkim@konkuk.ac.kr