

논문 2005-42TE-3-4

화재 방지를 위한 아크전류 검출 제어기 설계

(Arc Detection and Interruption Algorithm Design for Fire Protection)

반 기 중*, 원 영 진**, 임 승 하**

(Gi-Jong Ban, Young-Jin Won, and Seung-Ha Lim)

요 약

본 연구에서는 일반 주택이나 저전력의 전기를 사용하는 전기환경에서 발생하는 전기 화재의 원인이 되는 아크를 검출하고 부하 전류를 차단하여 화재를 방지할 수 있는 제어기를 설계하였다. 전기 화재를 방지하기 위해 전기가 발명된 이래로 많은 변천이 있어왔다. 휴즈에서 시작하여 일반 누설전류에서 동작하는 차단기를 거쳐 아크를 검출하고 부하전류를 제어할 수 있는 장치까지 개발되기에 이르렀다. 현재 발생하는 많은 전기 화재의 원인은 아크로 인해 발생하는 것으로 확인되었다. 본 연구를 통해서 일반 전기 환경에서 발생하는 전기 화재의 원인을 미연에 검출하여 인명피해는 물론이고 물질적인 피해를 방지할 수 있도록 하였으며, 본 연구를 계속적으로 확대하여 대전력 환경에서도 안정적으로 동작할 수 있는 제어기를 설계하고자 한다.

Abstract

Arc Fault Current is an electric discharge which is occurred 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 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 current controller does not have the arc current interrupt function. Hence, Controller of arc current is designed for the interruption of arc fault current which has the modified arc characteristics.

Keywords: arc, controller, detection, arc sensor, fire protection

I. 서 론

전기가 발명된 이래로 산업현장과 일반 가정에서의 전기 보급은 많은 변화를 가져왔다. 생활의 편리함을 제공해주고, 다른 산업의 발달에 많은 기여를 하였다. 그러나, 이러한 이로운 환경을 제공하는 반면에 전기를 사용함에 따라 여러 가지 부작용이 발생한다. 대표적인 예로서 전기 화재를 들 수 있다. 전기 화재는 전기 누전으로 알려져 있으며, 지금까지 휴즈에서 누전 차단기로의 발전을 거듭하면서도 전기 화재가 줄어들지 않는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 전기 화재의 원인으로 알려진 아크현상에 대해 분석하고, 아크현상을 검출하여 부하를 차단할 수 있는 알고리즘을 개발

하였다. 특히 가정이나, 일반 산업현장에서 사용하는 저전압에서 발생하는 아크현상에 대해서는 활발한 연구가 이루어지 지지 않고 있는 실정이다. 본 논문에서는 실제상황과 유사한 실험을 하기 위하여 전세계적으로 통용되는 전압인 정격전압 120V에서 250V, 정격전류 5A에서 150A의 전류에서 발생하는 아크를 대상으로 하였다. 일반적으로 아크 현상은 일상생활에서 많이 볼 수 있으며, 브러시가 부착된 모터나, 전기 코드의 접촉시, 전기 도선이 느슨하게 연결된 경우, 형광등의 on, off시에도 확인할 수 있다.^[1] 그러나, 이러한 아크에서는 부동작을 해야 하므로 전기 화재의 위험성을 내포하는 아크현상을 검출하고 부하를 차단하여야 한다.

그러나 기존의 센서를 적용해서 아크를 검출하고 일반적인 아크와 비교 검출하는 것이 어려우므로 아크를 검출할 수 있는 센서를 설계하고, 설계한 센서를 이용하여 실험 회로를 설계하여 실험을 하였다. 설계한 센서는 60Hz에서 동작할 수 있도록 하였으며 전원 주파수에 따라 50Hz에서도 동작하도록 할 수 있다. 본 연구

* 정회원, 건국대학교
(KonKuk University)

** 정회원, 부천대학
(Bucheon Colledge)

접수일자: 2005년1월14일, 수정완료일: 2005년9월6일

에서는 아크전류를 검출할 수 있는 센서를 설계하고 아크현상을 수학적으로 모델링한후 알고리즘을 설계하고 하드웨어를 제작하여 설계한 알고리즘의 성능을 확인하였다.

II. 아크의 특성 해석

2.1 Arc의 수학적 해석

아크는 전기 배선의 두 개의 전극사이에 존재하는 기체가 전압강하에 의하여 전기적으로 방전되어 전류가 흐르는 것이다. 이때, 두 전극 사이에는 주울열이 발생하며 $i^2 R t$ 의 식으로 표현된다. 여기서 시간 t 는 1[sec]이다. 이렇게 발생한 주울열은 발화점 이상의 높은 열을 발생시키고 이때 발생한 열은 전기화재로 발전할 수 있다. 따라서 아크검출은 발화점 이상으로 전이되기 전에 이루어져야 한다. 아크전류에 의해 발생하는 방전 에너지를 수식으로 표현하면 방전에너지 E_a 는 방전 전류 I_a 와 아크 전압 V_a 의 곱의 시간적분으로 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 (2-1)과 같다.

$$E_a = \int_{t_1}^{t_2} V_a \cdot I_a dt \quad (2-1)$$

또한, 전원전압이 V_a 에 도달한 즉시 아크를 형성하면 방전중에 소비되는 평균전력 P_{arc} 는 다음과 같이 식 (2-2)로 나타낸다^[4,5,6].

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

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 (2-3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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 G 의 관계를 갖는 아크 내에 축적된 에너지 Q 로 가정한다.

$$G = F(Q) = F\left[\int (W - N) dt\right] \quad (2-4)$$

(W : 입력 전력, N : 전력손실)

이 축적된 에너지는 아크의 열적 관성을 설명하고 아크 컨덕턴스 G 의 변화를 제한한다. 식 (2-4)를 미분방정식 형태로 변형하면 식 (2-5)와 같다.

$$\frac{dG}{dt} = (W - N) \frac{dF(Q)}{dQ} \quad (2-5)$$

그림 1은 Cassie & Mayr의 아크 모델의 회로를 나타낸다. 그림의 스위치를 이용하여 아크를 발생시킬 수 있다.

그림 2는 아크 모델을 MATLAB의 시뮬링크를 이용하여 시뮬레이션 한 파형을 보여준다.

그림에서는 아크의 전압 파형과 전류 파형을 동시에 나타내었다.

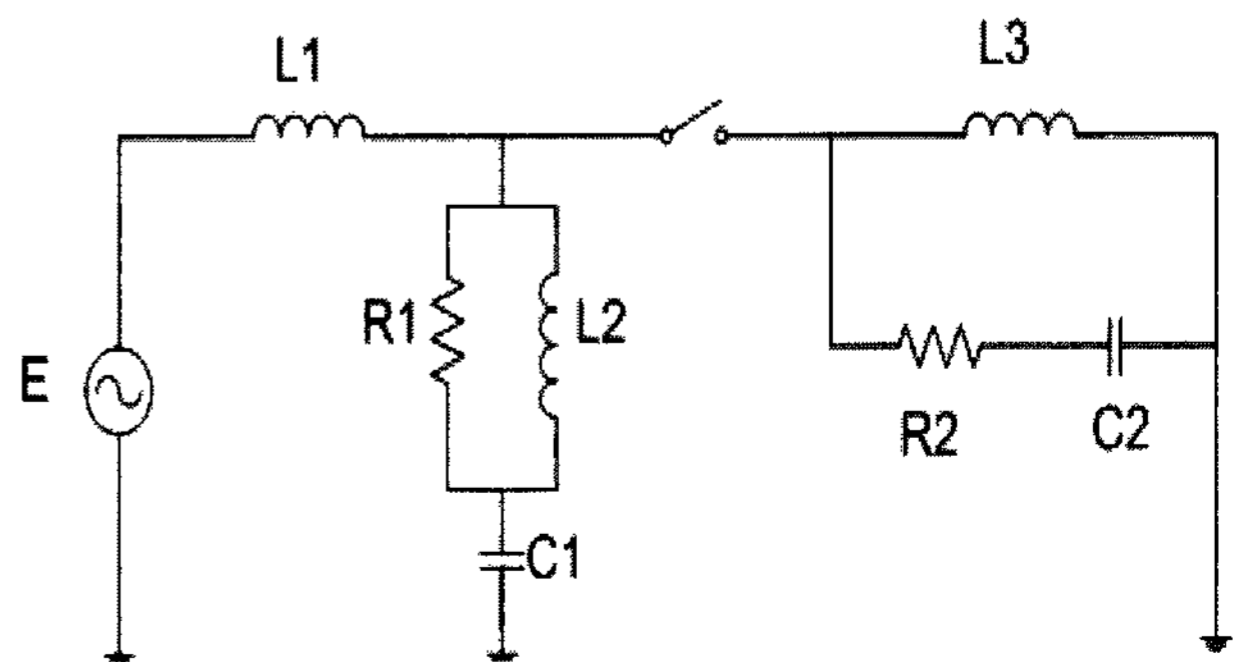


그림 1. Cassie & Mayr의 아크 모델
Fig. 1. Arc model of Cassie & Mayr.

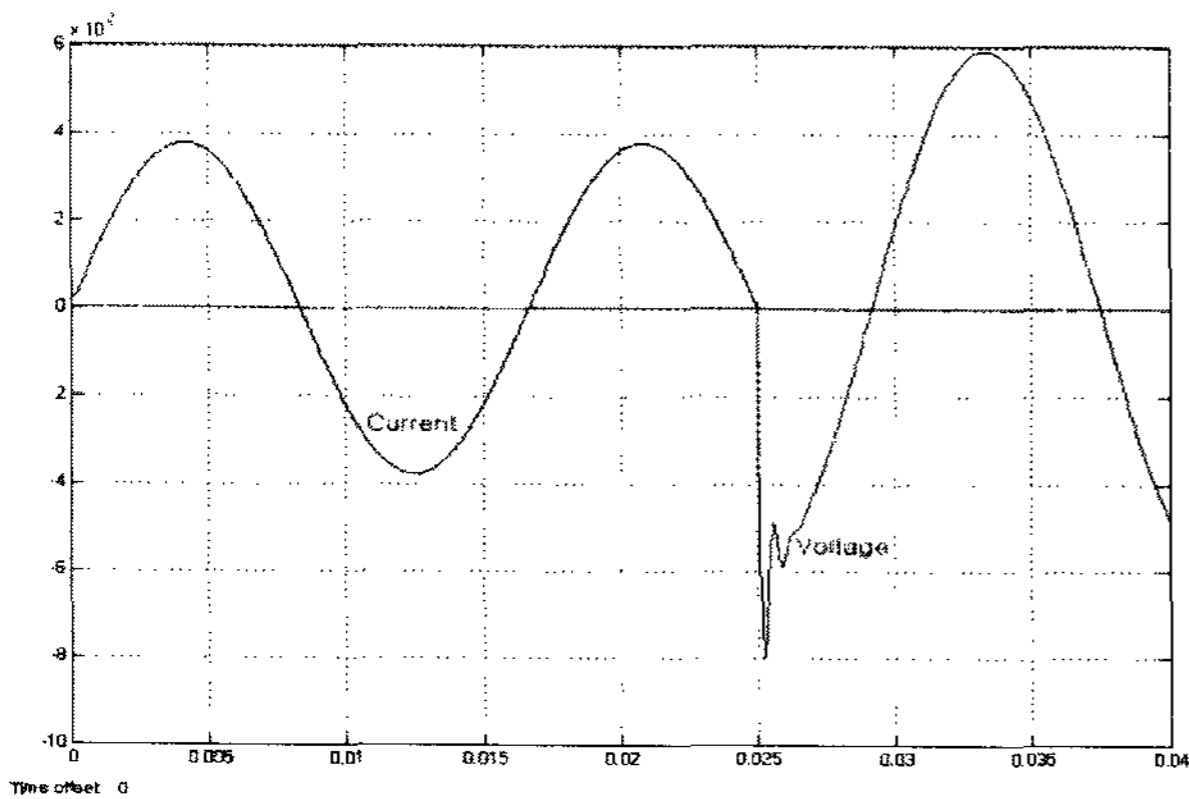


그림 2. Cassie & Mayr의 아크 모델에 의한 시뮬레이션 파형

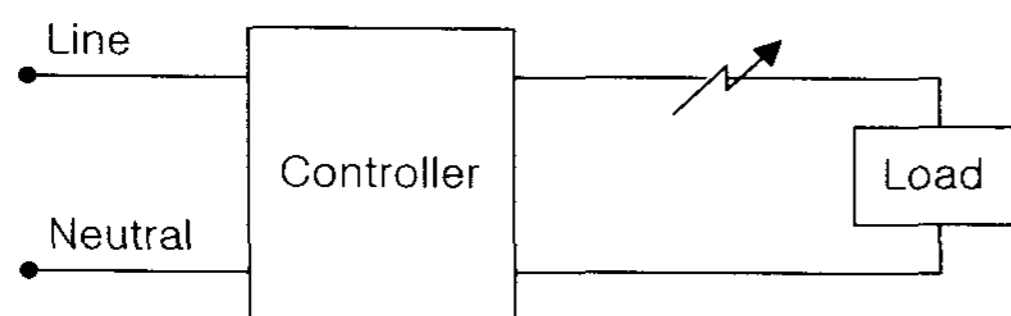
Fig. 2. Arc properties of Cassie & Mayr Model.

2.2 Arc의 전기, 물성적 특성

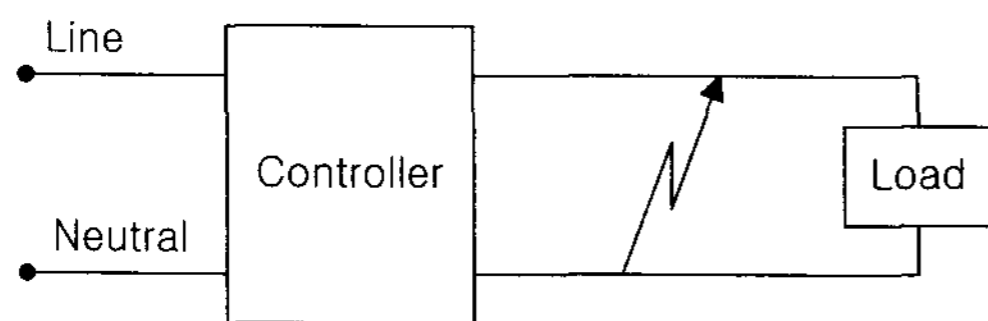
아크현상은 전기가 도선에 흐를 때 발생하며, 전기의 사용시 발생하는 아크 전류는 아크의 발생 위치에 따라 다음과 같은 3가지 형태로 나타낸다. 즉, 직렬 아크, 병렬 아크, 접지 아크로 나타내며 그림 1의 (a), (b), (c)에 3가지 아크의 발생형태를 나타내었다.

그림 3에서 발생빈도가 높은 아크는 병렬 아크이며 병렬 아크에 의한 화재의 위험성이 가장 높다.

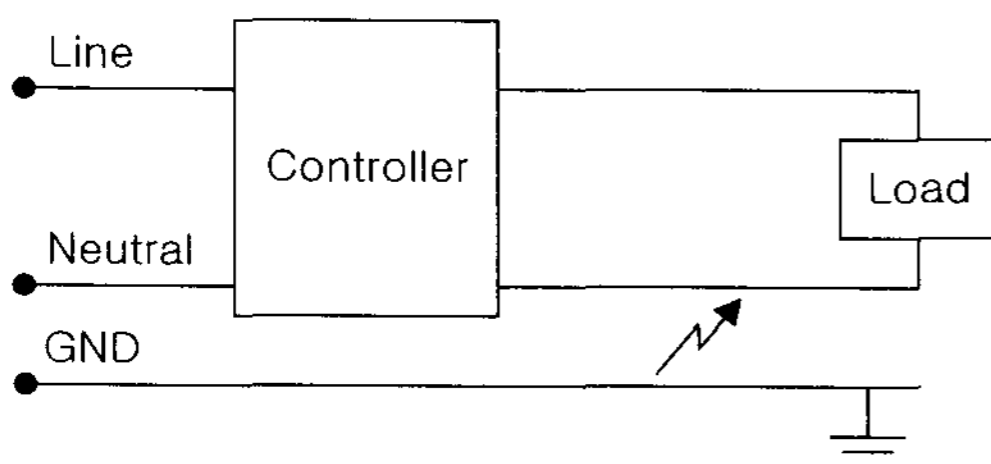
일상생활에서 쉽게 관찰 할 수 있는 아크에 의한 전



(a) 직렬 아크전류



(b) 병렬 아크 전류



(c) Ground 아크 전류

그림 3. 아크전류의 발생 형태에 의한 분류

Fig. 3. Classification of Arc Current.

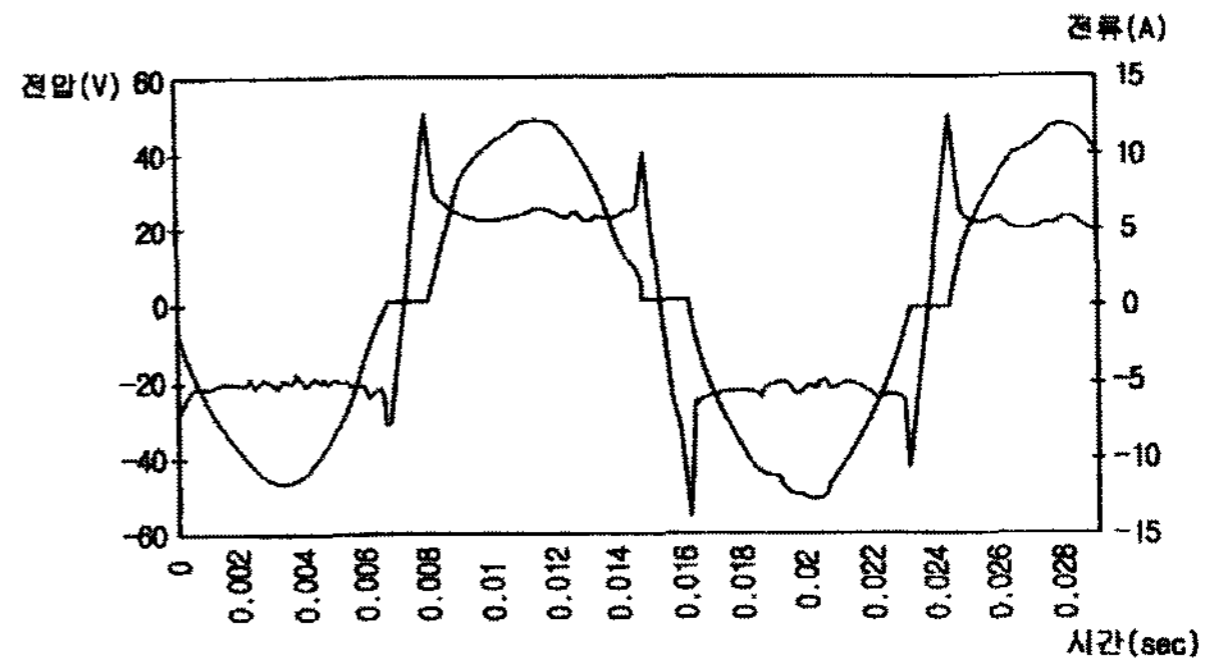


그림 4. 저항 부하일때의 아크에 의한 전류 특성

Fig. 4. Properties of arc voltage , current with resistive road.

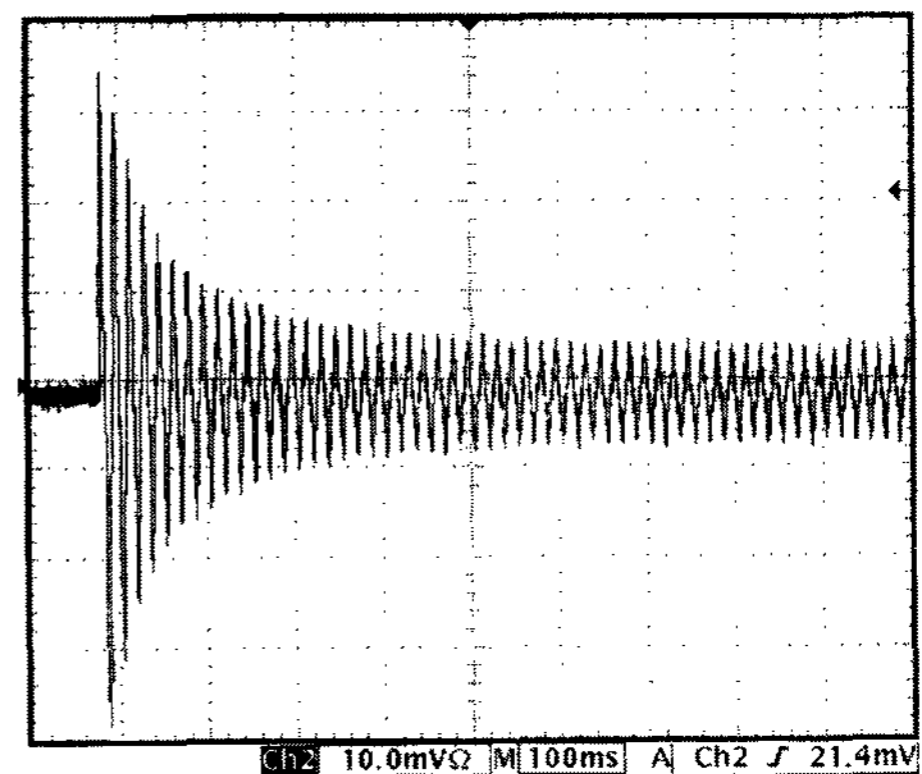


그림 5. 전기드릴의 기동시 파형

Fig. 5. Transient properties of Electric drill.

압 전류 파형을 그림 4에 나타내었다. 그림4는 직렬로 연결된 전기 도선에 저항 부하를 연결하고 두 접점의 점접촉에 의해 발생한 것이다. 아크 전류는 정상 파형이 일그러지는 점 즉 shoulder에서 아크가 발생한다.

그림에서 아크는 시간에 따라 불연속적으로 발생하며 전압의 rms 값은 정상파형보다 작아짐을 알 수 있다. 또한 아크 발생시에는 주파수도 일정하게 나타나지 않는다^{[2][4][5]}.

그림 5은 정격 5A인 전기드릴을 기동할 때 발생하는 파형으로 기동시 정격전류 수배에서 수십배의 임펄스성 신호를 발생시킨다. 이 임펄스성 신호는 전기드릴을 비롯한 전기기구들에서 공통적으로 나타나며, 특히 브러시 모터의 경우 많이 발생한다. 또한 이러한 신호들은 아크신호와 유사한 형태를 가진다.

2.3 전류 센서 설계

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

CT(Current Transformer)센서는, 1차측은 적게 감

고, 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 정도를 결정한다. 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 (2-6)으로 나타낸다.

$$E_s = I_s \times R_B \tag{2-6}$$

(I_s : 부하전류, R_B : 부하저항)

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

$$I_p = I_s \times \frac{N_s}{N_p} \tag{2-7}$$

대부분의 경우 1차측은 1회이므로 1차 전류는 $I_p = I_s \times N_s$ 이 된다. 1차측에서 사용되는 권선의 단면적은 식 (2-8)에 의해 결정된다.

$$W_a = \frac{A_C \times N_s}{K} \tag{2-8}$$

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

센서의 다른 특성은 포화특성으로 자속밀도 B 는 식 (2-9)로 나타낸다.

$$B = \frac{E_s \times 10^8}{4.44 \times N_s \times f \times A_C} \tag{2-9}$$

(B : 자속밀도[Gauss], f : 주파수,

A_C : 유효 철심의 단면적 [cm^2])

철심의 자속밀도는 재료의 최대 자속밀도보다 적은 값을 확인하고, 적지 않으면 보다 큰 면적의 철심을 선택하고, 계산된 자속밀도가 재료의 최대보다 작으면 단면적이 적은 철심을 사용한다^{[3][7][8][9]}.

III. 아크 전류 검출 및 차단 제어기 설계

우리가 사용하는 가정용 전기를 비롯하여 산업계 등 전기 사용환경에서는 여러 가지 아크와 유사한 신호가 존재한다. 일반적으로 아크 신호의 검출시 센서에서 검출된 신호는 아날로그 신호이므로 아크 신호와 유사한 일회성 아크, 아크성 신호 및 전기 화재의 원인이 되는 아크신호등을 구분하기가 쉽지 않다. 그러므로 아크 전류 제어를 위해서는 기존의 아날로그 제어 회로와 다른 새로운 개념에서 제어기를 설계할 필요가 있다. 또한, 일반적으로 사용되어지는 전기 드릴, 진공 청소기 등 각종 전기 기구에서 발생하는 아크 형태의 노이즈와 전기 도선에서 발생하는 아크 전류를 분류 할 수 있어야 한다. 본 연구에서 설계한 아크 전류 제어기는 이러한 전기 기구에서 발생하는 노이즈와 전기 도선에서 발생한 아크 전류를 분류하여 전기 도선에서 발생하는 아크 전류만을 검출 차단할 수 있도록 제어기를 설계하였다. 그림 4는 UL1669의 규정에 의해 설계 제작하였으며 본 연구에서 설계한 제어기의 성능 실험을 위한 아크 발생 장치의 구성을 나타낸다.

아크 전류 제어기는 전류가 인입되는 입력부와 차단부, 아크전류를 검출하는 검출부 및 신호를 처리하는 처리부 그리고, 아크 신호와 아크 특성을 포함하는 아크 신호를 비교 판단하는 비교부로 구성되어 있다. 그림 7은 아크 전류 차단 제어기의 전체 구성도를 나타낸다.

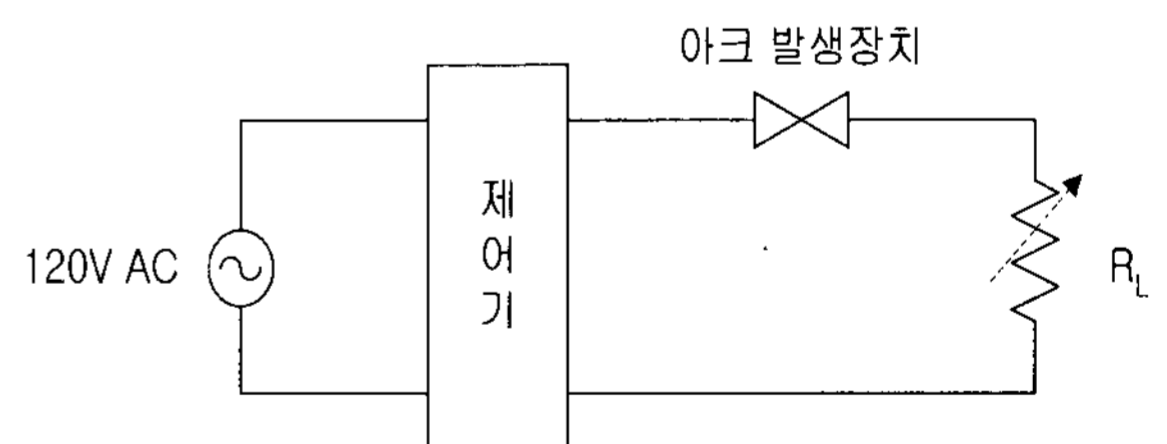


그림 6. 아크 발생 장치(UL1699 규정)

Fig. 6. Arc generator(UL1699).

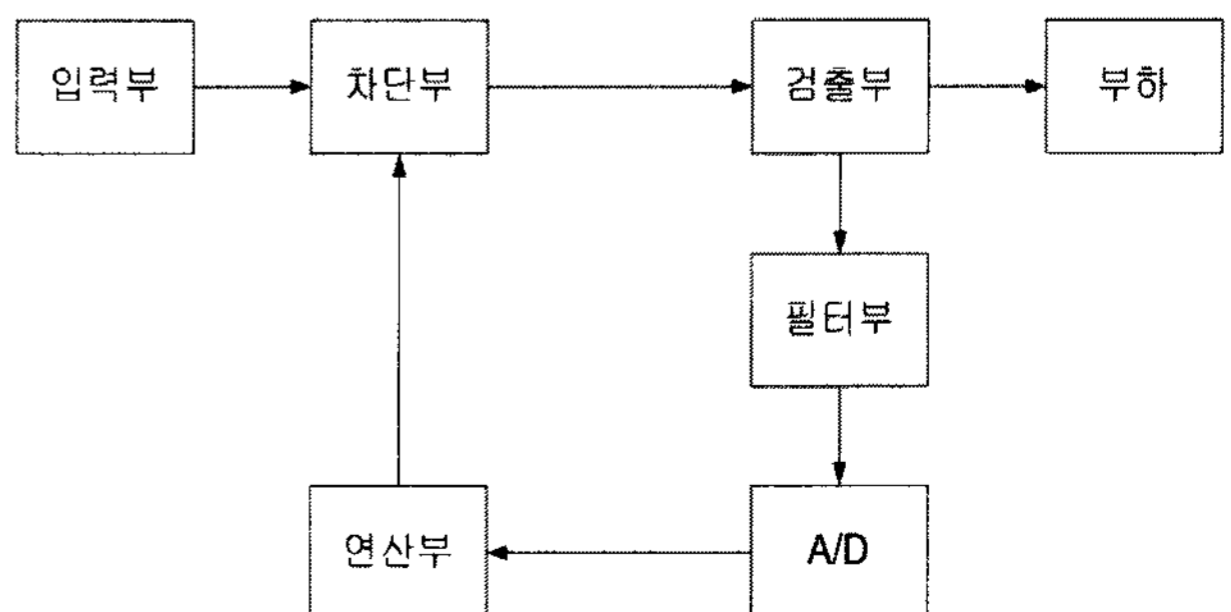


그림 7. 아크 전류 제어기 블록도

Fig. 7. Block diagram of arc controller.

입력부를 통해 전류가 인가되면 아크 전류 검출부에서는 실시간으로 전류를 모니터링하여 신호를 검출하고 필터부에서 아크 성분을 제외한 다른 신호를 제거하고 아날로그 디지털 신호 변환부에서 디지털 신호로 만든다. 디지털화된 신호는 연산부에서 아크전류를 차단할 수 있는 신호로 만들어 차단부에 송신된다.

IV. 실험결과 및 고찰

4.1 실험 결과

본 논문에서는 III장에서 제시한 제어기를 설계하고 실생활에서 발생 할 수 있는 아크 전류를 인가하여 실험을 하였다.

아크 실험 전류는 5A~150A 까지의 범위를 가지도록 하였다. 그림 8과 그림 9는 120A의 load를 인가했을

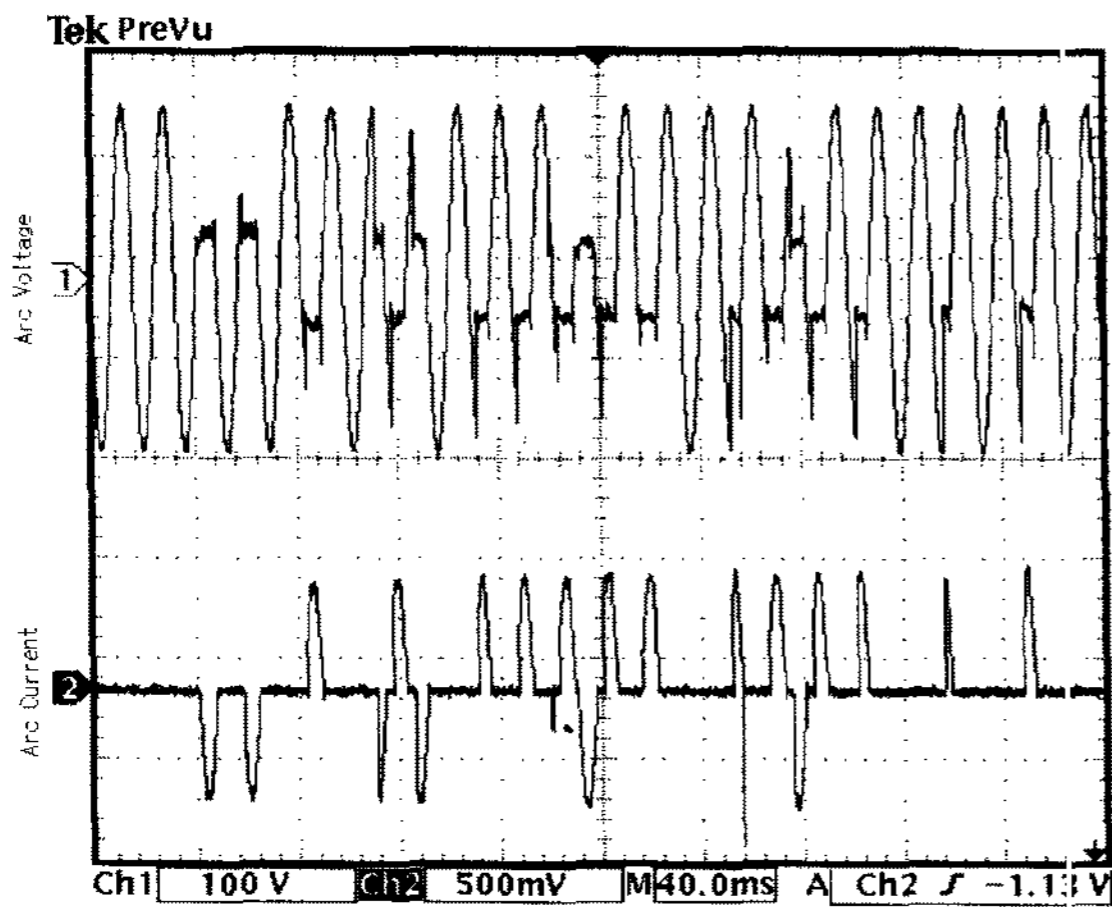


그림 8. 일반 제어기의 전류 전압 파형(120A)
Fig. 8. Current & Voltage properties of General controller(120A).

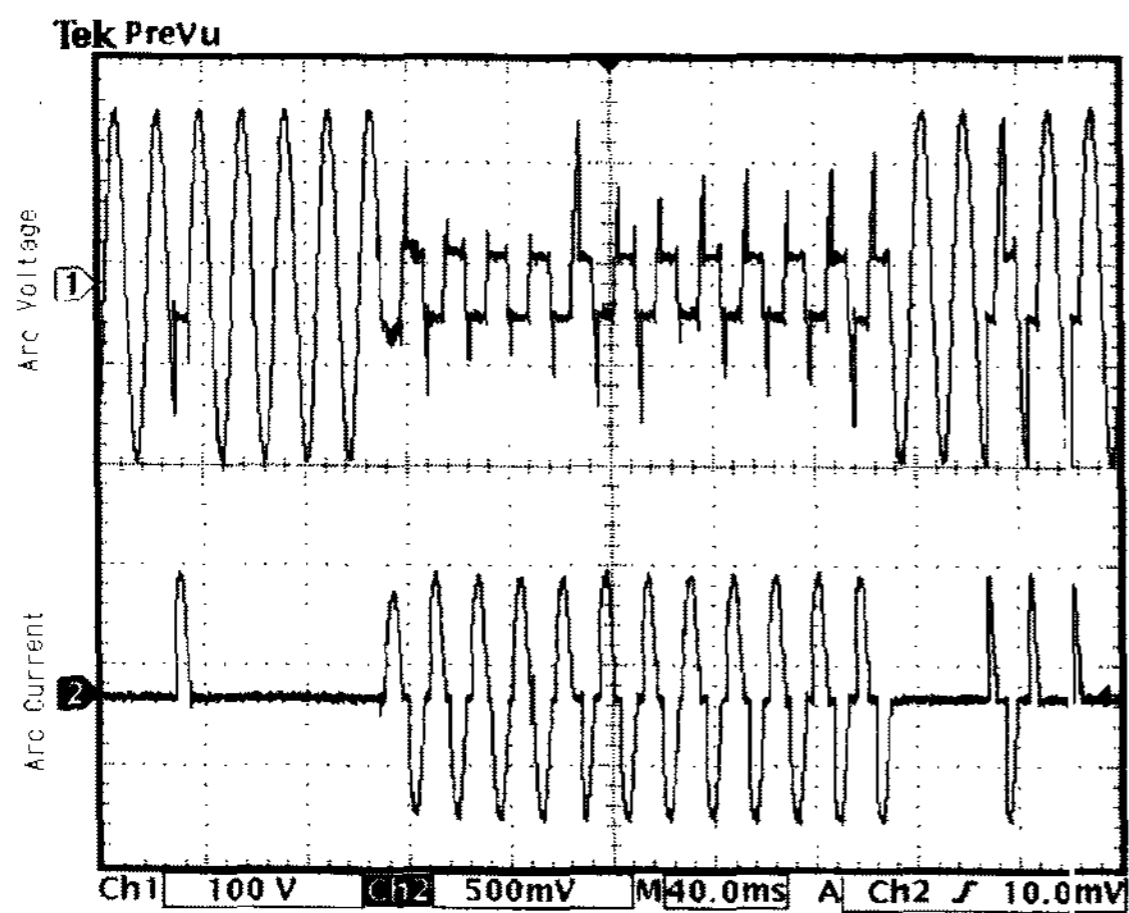


그림 9. 일반 제어기의 전류 전압 파형(120A)
Fig. 9. Current & Voltage properties of General controller(120A).

때 아크 발생장치의 두 전극 사이에서 나타나는 아크 전류와 전압 파형을 나타낸다.

그림 8과 9에서는 일반 제어기에 전류를 인가하고 점접촉 아크를 발생시켰을 때 아크의 발생을 보여준다. 그림에서는 연속적으로 아크를 발생시켜도 전류의 차단이 이루어지지 않고 있다.

그림 10과 그림 11은 본 논문에서 설계한 제어기를 적용하고 아크전류를 인가하였을 때의 출력을 보여준다. 전압과 전류 파형은 부하에 전류 공급이 중단됨으로써 0의 값을 가진다.

그림 10에서 아크 전류가 발생한 시간은 32ms 이며 아크 발생후 32ms 이후 부하전류가 차단됨을 보여준다. 그림 11에서는 아크 전류가 발생하기 시작하여

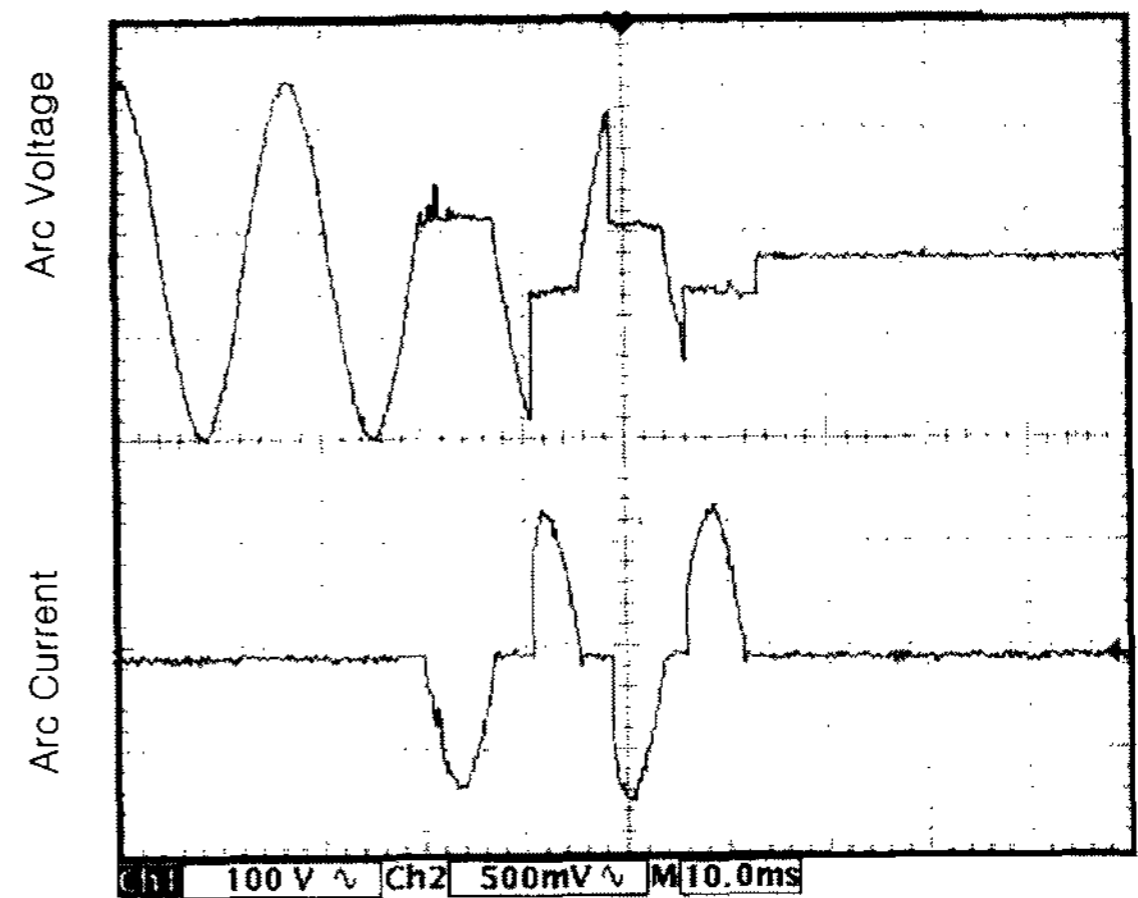


그림 10. 아크 제어기에 의한 아크 전류, 전압 파형 (120A 부하)
Fig. 10. Current & Voltage properties of Arc Controller(120A).

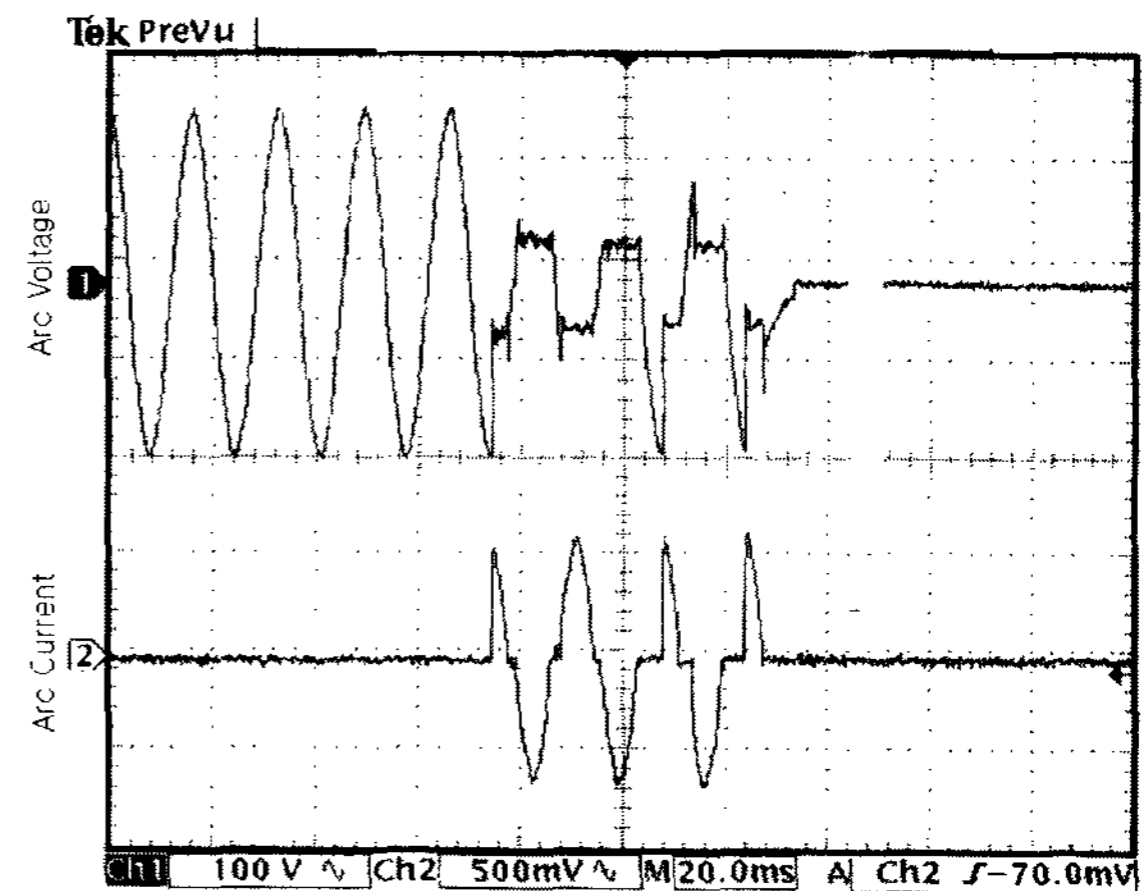


그림 11. 아크 제어기에 의한 아크 전류, 전압 파형 (120A 부하)
Fig. 11. Current & Voltage properties of Arc Controller(120A).

표 1. 제어기에 의한 아크차단 시간
Table 1. Interruption time of arc controller.

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

54ms만에 전류가 차단되었다.

그림 10과 11에서 아크전압은 아크 전류의 차단과 동시에 전류가 소멸되므로 0의 값을 갖는다. 실험에 사용한 부하전류는 5~100A 까지는 저항 부하를 이용하였고, 100A 이상에서는 전기 도선 의 저항으로 전류를 계산하여 부하로 사용하였다. 또한 설계한 아크전류 제어기는 병렬 아크인 경우 아크 전류 파형이 8개의 반파가 발생하기 이전에 차단할 수 있음을 확인하였다.

V. 결 론

본 연구에서 설계한 아크 전류 제어기에서는 기존 전류 차단기가 가지고 있지 않은 아크 전류에 대한 제어를 할 수 있는 제어기 설계를 통하여, 일반적인 환경에서 사용되는 저전류, 저전압의 전원에서 발생하는 아크 전류를 제어할 수 있도록 하였으며, 아크 전류가 발생할 수 있는 여러 가지 전기 환경에서의 아크 전류 제어 실험을 통하여, 전기 배선상에서 발생하는 이상전류를 검출하고 부하를 제어할 수 있도록 하였다.

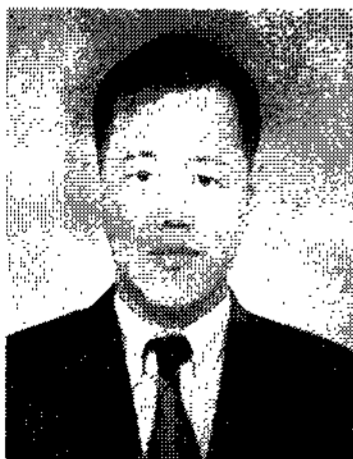
또한, 본 연구를 통하여 산업용의 대전류 및 기타 플랜트 산업등에서의 전기로 인한 재해를 줄일 수 있는 방법으로 발전시킬 수 있다. 본 실험에서, 기존 전류 차단기의 경우에 아크 전류가 연속적으로 발생해도 아크 전류에 대한 검출 및 제어가 불가능 하다. 본 논문에서 제시한 아크 전류 제어기를 이용 하였을 때 아크 전류

의 차단시간은 24ms ~ 66ms 이내에 아크 전류를 차단시킴으로 UL1669에서 규정한 아크 발생시 8개의 반파 이내에 부하전류를 차단할 수 있는 성능을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] NEC(National Electric Code) : Article 210-Branch Circuits 210-12, (2003 Edition)
- [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", (1995), pp. 369-377
- [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, (1988), pp. 24-30.
- [4] 한국전기연구소, " 개폐장치 설계기술 개발을 위한 대전류 아크 특성에 관한 연구", 1991. 7. 12.
- [5] 이세현, "아크 용접에 있어서의 아크의 특성과 응용", 대한 용접학회, 제 10권, 1호, 1992.3
- [6] Underwriters Laboratories Inc. UL1699 ISBN 0-7629-0401-1 "Arc-Fault Circuit-Interrupters", December 1, 2000.
- [7] Cullity, "Introduction to magnetic materials", Addison-Wesley, 1972.
- [8] Snelling, "Soft Ferrites: Properties and Applications", Butterworths, 1993.
- [9] B. Lax, "Microwave Ferrites and Ferrimagnetics", McGraw-Hill Book Company, 1962.

저 자 소 개



반기종(정회원)
1995년 호서대학교 제어계측 공학과 학사 졸업.
1998년 건국대학교 전기공학과 석사 졸업.
2003년 건국대학교 전기공학과 박사 수료.

2005년 현재 부천대학 전자과 겸임교수
<주관심분야 : Fuzzy, Neural Network, AI , Robust Control >

원영진(정회원)
TE편 41권 2호 참조

임승하(정회원)
TE편 40권 3호 참조