論 文
53D-3-5

아크 전류 차단을 위한 제어알고리즘 개발

Control Algorithm Development for an Arc Current Interruption

潘 基 宗* · 金 洛 敎**
(Gi Jong Ban, Lark Kyo Kim)

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 low voltage 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 control algorithm does not have the arc current interrupt function. Hence, Control algorithm of arc current is designed for the interruption of arc fault current which has the modified arc characteristics.

Key Words : Arc, Interrupter, Sensor, Arc Fault

1. 서 론

본 논문에서 설계한 아크전류 제어알고리즘은 정격전압 120V에서 250V, 정격전류 5~150A의 전류에서 발생하는 아크를 대상으로 하였다. 아크 전류는 전원선 및 중성선 사이에서 발생하는 병렬 아크, 전원선이 단선 되거나 전기 기구에 느슨하게 연결되어 있는 경우에 다수 발생하는 직렬 아크, 중성선과 접지 사이에서 발생하는 접지 아크로 구분한다. 이러한 아크는 전기 화재로 전이될 수 있는 원인으로 분석되어 있으며, 국내의 경우에는 전기합선으로 판명이 되며, 미국의 경우에는 아크현상으로 표현한다. 또한 미국에서 발생하는 전기화재의 경우 소비자제품안전위원회(Consumer Product Safety Commission)의 분석에 의하면 전체 전기화재의 40%를 차지하고 있다[1]. 국내에서는 저 전압, 저 전류에서 발생하는 아크에 대한 연구가 전무한 실정이다. 현재까지는 전기화재의 경우 누전에 의한 것으로 연구되어 왔으며, 누전전류를 검출 및 차단에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔으며, 최근에 와서 화재의 주요 원인이 아크 전류에 의한 것임이 판명됨으로써 이에 따라 아크전류를 처리할 수 있는 연구가 시작되었다. 그러나 기존의 센서를 이용하여 아크 전류를 검출함으로써 여러 가지 전기 기기들을 사용할 때 발생하는 아크성 신호를 검출 할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서, 아크 전류 성분을 검출하기 위해서는 기존의 검출 방법으로는 불가능하며 새로운 검출 방법을 채택하여야 한다. 아크전류 센서는 전기회로 계의 주파수와 동일한 60Hz의 값을 갖도록 설계되어야 한다. 2.3절에서는 아크전류를 검출 하기 위한 전류 센서를 설계하였다.

또한 센서의 임피던스는 적절한 값을 가지도록 설계되어야 한다[2][3]. 본 논문의 2장에서는 제어알고리즘을 설계하기 위한 아크의 특성을 수학적으로 모델링 하였고, 3장에서는 아크 전류 제어를 위한 제어기를 설계하였다. 4장에서는 제안한 전류 제어기의 제어 알고리즘을 설명하였고, 5장에서는 제안한 전류 알고리즘에 의한 아크 전류제어 실험을 통하여 제어기 성능을 입증하고, 기존 전류 제어기와 착안한 알고리즘을 적용한 제어기의 비교를 통하여 본 논문에서 제안한 제어알고리즘의 우수성을 확인하였다.

2. Arc 전류의 특성

2.1 Arc 모델링

아크란 전기 배선등 두 개의 전극사이에 존재하는 기체가 전압강하에 의하여 전기적으로 방전되어 전류가 흐르는 것이다. 이때, 두 전극 사이에는 주울열이 발생하며 i^2Rt의 식으로 표현된다. 주울열의 식에서 R은 1[Ω]으로 나타내는 경우 i^2t으로 나타낸다. 이렇게 발생한 주울열은 발화점 이상의 높은 열을 발생시키고 이러한 열은 전기화재의 원인이 된다. 또한 아크전류에 의해 발생하는 방전 에너지를 수식으로 표현하면 방전에너지 E_a는 방전 전류 I_a와 아크 전압 V_a의 곱의 시간 적분으로 구한다. 여기서 아크전류가 반주기 사이에 발생하는 일회성 아크인 경우 t을 아크 개시시간, t_2를 아크 종료시간으로 하면 아크전류에 의한 방전 에너지 E_a는 식 (1)과 같다.

* 正 會 員 : 建國大 工大 電氣工學科 博士課程
** 正 會 員 : 建國大 工大 電氣工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 2004年 1月 2日
最終完了 : 2004年 1月 27日

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

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

$$P_{\text{arc}} = \frac{E_a}{\pi}$$

$$= \frac{2V_p V_a}{\pi R}\sqrt{1-(\frac{V_a}{V_p})^2} - \frac{V_a}{2V_p}(\pi - 2\sin^{-1}\frac{V_a}{V_p}) \quad (2)$$

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 전자가 한 전극에서 다른 전극으로 흘러들어가는 구조로 되어 있으며 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 구할 수 있다.

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

일반적으로 아크 발생부분에서의 온도가 급격히 증가하며 이 부분을 제외하고는 열의 전도 효과를 무시할 수 있다.

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.

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

(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 [4][5][6][7].

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

2.2 Arc 전류 및 전압 특성

전기계에서 발생하는 아크 전류는 일반적으로 3가지 형태로 나타낸다. 아크 발생 위치에 따라 직렬 아크, 병렬 아크, 접지 아크로 나타내며 그림 1의 (a), (b), (c)는 아크 전류의 3가지 형태를 보여준다.

그림 1의 (a)는 직렬 아크를 나타내는 것으로 하나의 도선에서 발생한다.

그림 1의 (b)는 두 개의 도선에서 발생하는 아크를 그림 (c)는 접지와 전원선과 중성선의 두 도선중 하나와의 결함에 의해 발생하는 아크를 나타낸다.

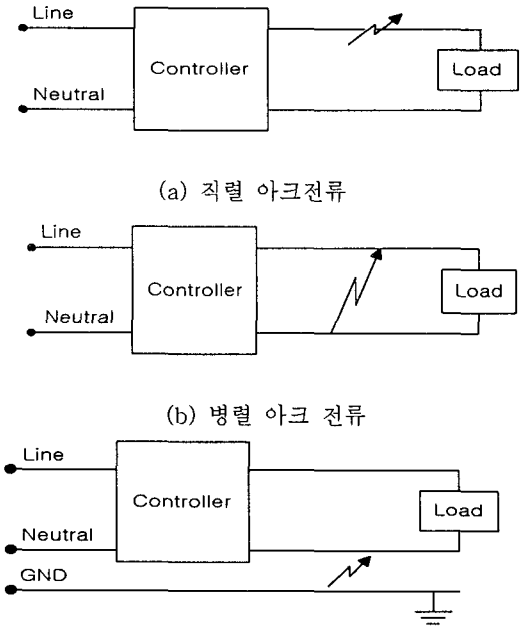


그림 1. 아크전류의 발생 형태에 의한 분류
Fig. 1. Type classification of Arc generation

그림 1에서 발생빈도가 높은 아크는 병렬 아크이며 병렬 아크에 의한 화재의 위험성이 가장 높다. 또한 위의 3가지 아크 발행 형태에 따라 서로 다른 특성을 가지고 있다.

그림 2와 그림 3은 일반적으로 나타날 수 있는 형태의 아크 파형으로, 직렬로 연결된 전기 도선에 저항 부하를 연결하고 아크 발생기에 의해 아크 전류를 발생시켰을 때나타나는 파형이다. 그림2와 그림 3에서 전압 파형은 일그러짐을 갖는 형태로 나타나며 전류 파형은 전압파형이 일그러지는 부분에서 나타난다.

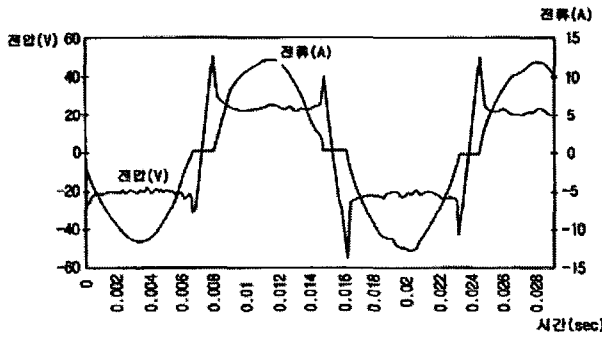


그림 2. 저항 부하일때의 아크에 의한 전류 특성
Fig. 2. Current characteristics of arc occurred at the resistive load

아크 전류는 정상 파형이 일그러지는 점에서 발생한다. 이때를 shoulder라고 하며 이 shoulder가 발생하는 점에서 아크가 발생한다.

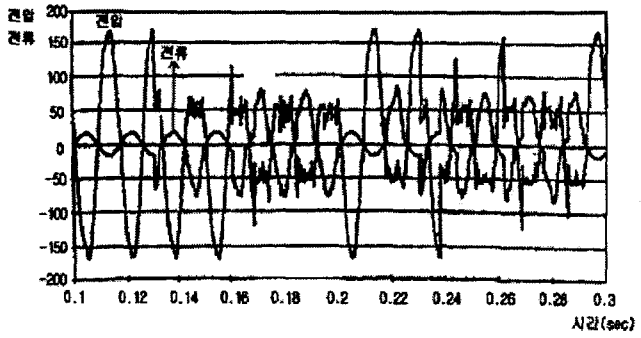


그림 3. Sputtering 아크에 의한 전압, 전류 특성
Fig. 3. Voltage and current characteristics due to sputtering arc

그림 3은 sputtering 아크 발생시의 전압, 전류 파형을 나타낸 것이다. sputtering 아크는 코드의 연결 부분에서 자주 발생하는 것을 볼 수 있다.

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

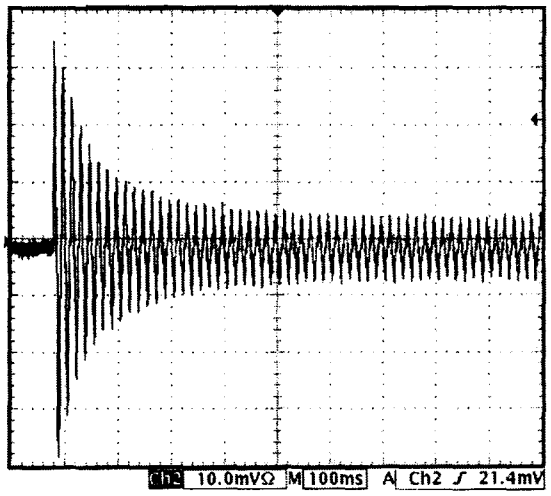


그림 4. 전기드릴의 기동시 파형
Fig. 4. Starting current characteristics of electric drill

그림 4는 정격 5A의 전기드릴을 기동시킬 때 발생하는 파형을 나타낸다. 전기드릴을 비롯한 전기기구들은 제어기에서 전류 검출시에 arc 전류 파형과 유사한 형태를 가지고 있다.

그림 5는 기동전류가 120A인 컴프레서의 기동시에 나타나는 전류 파형을 나타낸 것이다.

일반적인 전기 기구들의 경우에 기동전류가 발생하게 되고 이 기동전류는 짧은 시간에 큰 전류를 갖고 있으며 아크가 갖는 shoulder는 없으나 아크 신호와 혼동을 줄 수 있는 임펄스성 신호 성분을 가지고 있다. 따라서 전기 기구들과 아크 신호를 같이 분석할 필요가 있다.

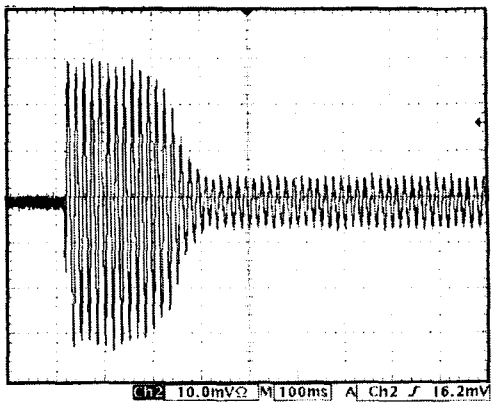


그림 5. 컴프레서의 기동시 파형
Fig. 5. Waveform of starting current of a compressor

그림 6은 1,000W 형광램프의 전원을 on off 할때 나타나는 기동파형을 보여준다. 첫 과도상태에서 임펄스성 피크 전압이 나타남으로써 아크신호와 혼동 될 수 있다.

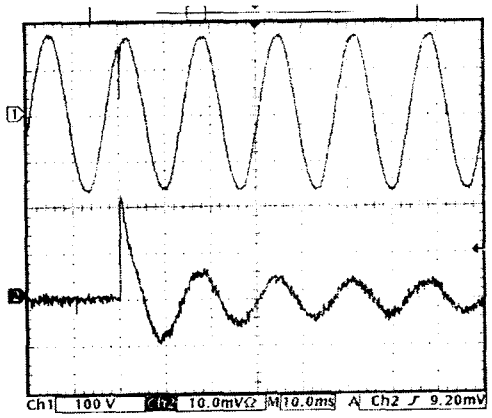


그림 6. 1000W 형광램프의 기동시 전류파형
Fig. 6. Waveform of starting current of the 1,000W flourescent lamp

2.3 전류 센서 설계

검출 센서로는 일반적으로 영전류를 검출 할 수 있는 ZCT(Zero Current Transformer)를 사용한다. 이는 코아에 코일을 환상형으로 권선하는 형태가 사용된다. 일반적으로 금속의 투자율은 300~10,000 사이의 제품을 사용한다. 정밀한 누설 전류를 검출하기 위해서는 일정한 부하 임피던스를 가지며 누설 자속이 0이 되어야 한다. 또한 여자전류가 작아야 하며 무한대의 자속밀도 등의 특성을 갖는 센서를 설계하여야 한다.

부하의 임피던스가 증가하면 철심의 자속이 증가하여 여자 전류가 증가하는 특성을 갖는다.

전류센서는 실험에 적합한 성능을 갖도록 정밀도와 크기 및 가격을 고려하여 설계하였다. 일반적으로 철심의 재료는 50%의 포화자속밀도보다 낮은 곳에서 좋은 정밀도를 갖는다. 센서는 1차측은 적게 감고, 2차측은 많은 횟수를 감는 형태로 하며 높은 권수의 비율은 많은 누설자속을 발생

시킨다. 누설 자속을 줄이기 위해 환형 형태의 높은 투자율을 갖는 재료를 사용하여 밀접한 철심 결합을 하고 두 권선을 결합시키면 누설 자속을 최소화 할 수 있다. 여자 전류는 센서의 정밀도를 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.

센서의 설계는 부하조건을 고려하여 설계하고, 부하는 저항과 최대 출력의 전류로 결정한다. 2차측의 부하전류는 부하저항과 결합하여 2차 전압을 형성한다.

2차 전압은 식 (6)으로 나타낸다.

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

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

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

대부분의 경우 1차측은 1회이므로 1차 전류는

$I_P = I_S \times N_S$이 된다.

1차측에서 사용되는 권선의 단면적은 식 (8)에 의해 결정된다.

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

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.

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

(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[2][9][10][11].

본 실험에서는 1차 측은 1회의 권선을 하고 2차측은 300회의 권선을 한 센서를 사용하였다.

3. Arc 전류 제어기 및 제어 알고리즘 설계

3.1 Arc 전류 제어기설계

전기 회로계에는 여러 가지 아크성 신호가 혼재한다. 일반적으로 아날로그회로를 이용하여 아크전류 신호를 검출할 때는 일회성 아크, 아크성 신호 및 전기 화재의 원인이 될 수 있는 아크신호 등을 구분하기가 쉽지 않다. 따라서 아크전류를 검출하기 위해서는 아크전류와 혼동되는 많은 신호들을 분석할 필요가 있다.

기존에 사용하고 있는 전류 제어기는 누설 전류나, 전기에 의한 인체에의 감전 등을 제어하기 위한 목적으로 설계되어 있다. 이러한 제어기를 이용해서는 아크 전류를 제어할 수 없는 한계를 가지고 있다. 이것은 누설 전류나 서지 전류가 갖는 특성이 아크 전류 특성과 확연히 다르기 때문이다.

따라서, 아크 전류 제어를 위해서는 새로운 개념에서 제어기를 설계하여야 한다. 또한, 일반적으로 사용되어지는 전기 드릴, 진공 청소기등 각종 전기 기구에서 발생하는 아크 형태의 노이즈와 전기 도선에서 발생하는 아크 전류를 식별할 수 있어야 한다. 본 아크 전류 제어기는 이러한 전기 기구에서 발생하는 노이즈와 전기 도선에서 발생한 아크 전류를 식별하여 전기 도선에서 발생하는 아크 전류만을 검출 차단할 수 있는 제어기를 설계하였다. 그림 7은 제어기 실험을 위한 아크 발생 장치의 구성을 나타낸다. 아크 발생 장치는 직렬 아크 발생을 위한 연결을 나타내며 전기 회로의 변경에 의하여 병렬 아크와 ground 아크를 발생 시킬 수 있도록 설계하였다. 또한 아크 발생 장치는 UL 규정에 의해 제작하였다[3].

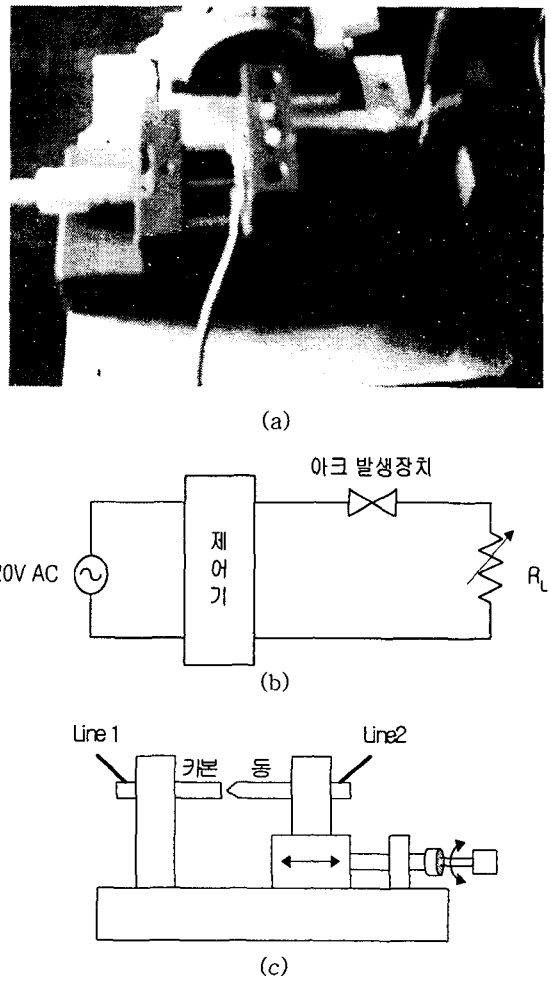


그림 7. 아크 발생 장치(UL1699 규정)

Fig. 7. Arc generating apparatus

그림 8은 아크 전류 발생 장치에 의한 아크 발생을 보여준다. 그림에서와 같이 점접촉에 의하여 아크 발화가 되는 것을 볼 수 있다.

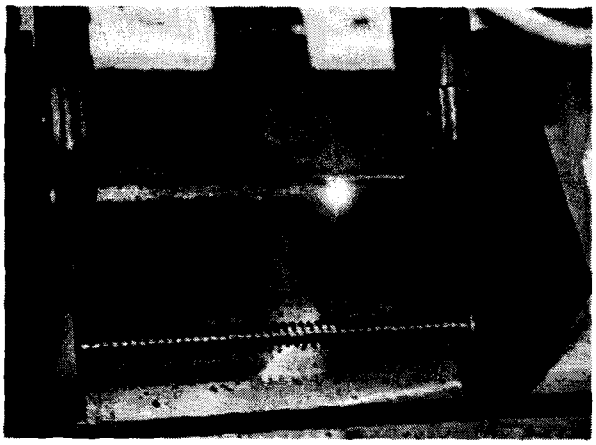


그림 8. 아크 발생장치에 의한 아크 현상
Fig. 8. Arc phenomenon of arc generating apparatus

아크전류 차단제어기는 전류가 인입되는 입력부와 기구적으로 전류를 차단할 수 있는 차단부, 아크전류를 검출하는 검출부 및 검출된 데이터를 받아 처리하는 프로세서부분으로 구성되어 있다. 그림 9은 아크 전류 제어기의 전체 구성도를 나타낸다. 입력부를 통해 전류가 인가되면 전류 차단부를 거쳐 아크 검출부를 관통해서 출력된다.

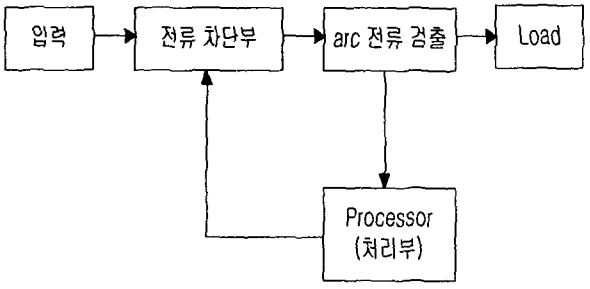


그림 9. 아크 전류 제어기 블록도
Fig. 9. Block diagram of arc current interrupter

아크 전류 검출부에서는 실시간으로 전류를 모니터링하며 모니터링중 이상 전류가 발생했을 경우 아크전류로 인식이 되면 프로세서에 신호를 송출하게 된다. 이때 검출되는 신호는 아날로그 신호이므로 처리부에서 처리할 수 있는 디지털 신호로 변환하여 처리부의 입력부로 신호를 전달한다. 디지털 신호를 받은 처리부에서는 신호를 분석하여 출력신호를 발생시키고 발생된 신호는 아날로그 신호로 바뀌어 트립부로 신호가 전달되므로써 트립부에서 전류를 차단할 수 있는 구조로 구성되어 있다.

3.2. Arc 전류 알고리즘 설계

3.1 장에서 나타낸 제어기의 프로세서부에서 처리하는 알고리즘의 블록도는 그림 10과 같이 구성된다. 제어 알고리즘은 기준 전압을 발생 시켜주는 부분, 입력 신호를 받아들이는 부분, 두개의 신호를 비교하는 부분, 신호의 비교에 의하여 부하전류를 차단할 수 있는 신호를 발생시키는 부분 등으로 구성된다. 그림 10의 알고리즘에서 전원전압이 인가되고 난후 초기 화 과정을 통하여 프로세서의 상태를 결정한다. 프로세서는 전원이 차단되었다가 다시 투입될 때 초기화 과정을 거치게 된다. 프로세서의 상태가 초기화 되면 센서에서 검출하는 신호를 모니터링 하게 된다. 프로세서에서는 센서로부터 검출된 신호를 입력 받아 기준 전압과 비교를 할 수 있는 상태가 되도록 한다. 프로세서는 기준 전압을 발생하고, 센서의 입력 신호와 비료를 통하여 기준 전압보다 크거나 같아질 때 아크 전류로 판단을 하며 부하전류를 차단할 수 있는 신호를 발생하게 된다. 입력 신호 레벨이 기준 전압보다 작아질 때는 차단 신호를 발생하지 않으며 신호 발생 시간은 0이 된다. 차단 발생신호가 입력 기준 전압보다 크거나 같은 신호를 발생하면 전류를 차단할 수 있는 차단 신호를 발생한다. 이 신호가 없을 때에는 다시 초기화 상태로 되어 항상 부하 전류를 감시할 수 있다.

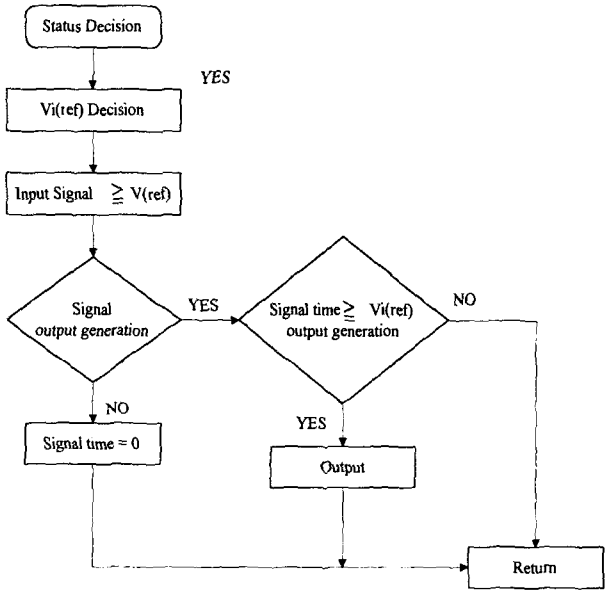


그림 10. arc 전류 처리 순서도
Fig. 10. Flow chart for an arc current detection

4.. 실험결과 및 고찰

4.1 실험 결과

본 논문에서는 위에서 제시한 제어기를 설계하여 실제 아크 전류를 인가하여 실험을 하였다.

아크 전류는 5A ~ 150A 까지의 범위에서 일정한 간격으로 샘플링하여 실험하였다.

그림 11은 제어기에서 검출한 아크 전류를 보여준다. 아크 전류는 상용 주파수와 동일한 60Hz로서 검출되며 그림에서와 같이 각 검출 전류의 전압레벨로 확인할 수 있다.

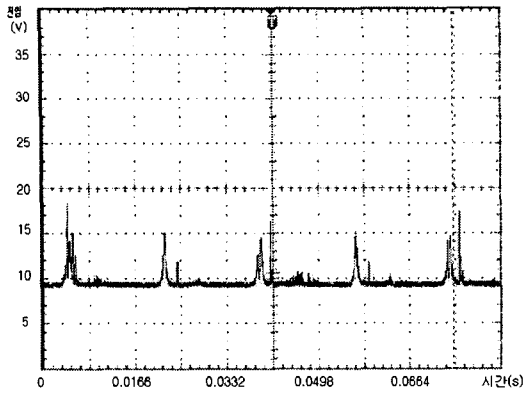
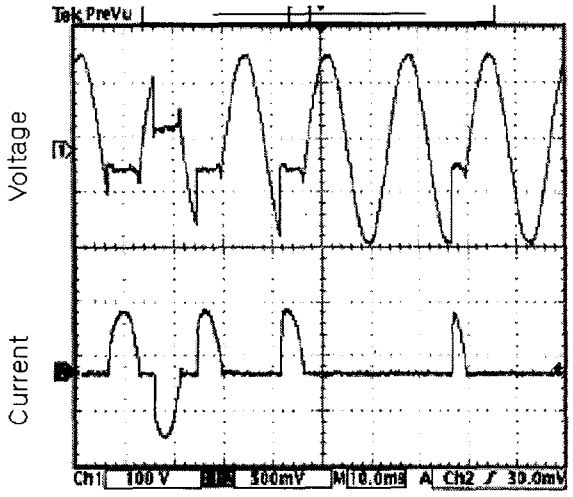


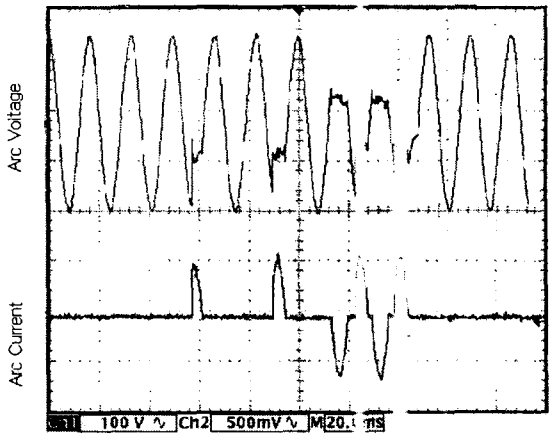
그림 11. 아크전류 제어기에서 검출된 아크 전류파형

Fig. 11. Arc waveform detecting from the arc current interrupter

그림 12(a), (b)는 120A의 부하를 인가했을 때 두 전극 사이에서 나타나는 아크 전류와 전압 파형을 나타낸다.



(a)



(b)

그림 12. 아크전류 제어기 적용전의 전류 전압 파형

Fig. 12. Voltage-current waveform without an arc current interrupter

그림 12 (a)와 (b)에서 전류 파형은 전류 프로브를 이용하여100A/div으로 측정한 파형으로 아크 전류가 발생한 점에서는 전압 파형의 일그러짐이 발생함을 알 수 있다.

그림 12 (a)에서는 아크전류가 5개의 반파로 나타났으며 그림 12(b)에서는 아크전류가 6개의 반파로 나타났으나, 아크전류 발생에 따른 부하전류의 변화가 없음을 알 수 있다.

아크 전류가 발생한 시간은 90ms 이며 현재의 전류 제어기를 이용하여 검출된 파형이다. 여기서는 아크 전류가 발생함에도 불구하고 아크 전류가 차단되지 않음을 보여준다.

그림 12(a)와 (b)에서는 전압파형에 아크 현상이 발생하여 아크 전류가 발생하나 전류가 차단되지 않으므로 전압이 인가되어 있는 상태를 나타낸다.

4.2 결과 고찰

그림 13와 14은 본 논문에서 제안한 아크전류 제어기를 이용하여 검출한 전류, 전압 파형을 나타낸다. 그림 13에서는 아크 전류가 발생하기 시작하여 54ms만에 전류가 차단되었으며, 그림 14에서는 아크전류가 발생하고 32ms만에 부하전류를 차단하였다. 실험에서는 부하전류를 5~150A 범위로 하였으며 전류 용량에 따라 20ms~0.5s 이내에 차단시킴을 볼 수 있었다. 실험에 사용한 부하전류는 5~100A 까지는 저항 부하를 이용하였고, 100A 이상에서는 전기 도선을 사용하였다. 또한 설계한 아크전류 제어기는 병렬성 아크인 경우 아크 전류 파형이 8개의 반파가 발생하기 이전에 차단할 수 있었다.

현재 국내에서 시판되고 있는 기존 누전차단기는 아크전류가 연속적으로 발생해도 아크전류의 검출 및 차단이 불가능하였다. 그러나, 실험결과분석을 통하여 본 연구에서 제안한 아크전류차단제어 알고리즘을 탑재한 아크전류 차단제어기를 사용하면 이러한 문제점을 해소할 수 있음을 확인하였다.

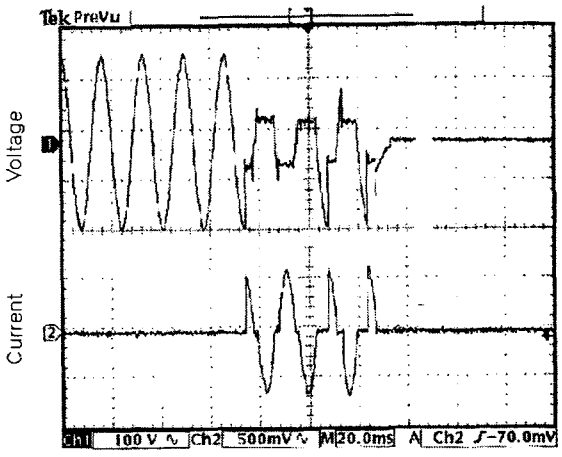


그림 13. 제안한 아크전류 차단제어기에 의한 아크 전류, 전압 파형(120A 부하)

Fig. 13. Arc current and voltage waveform of an arc current interrupter

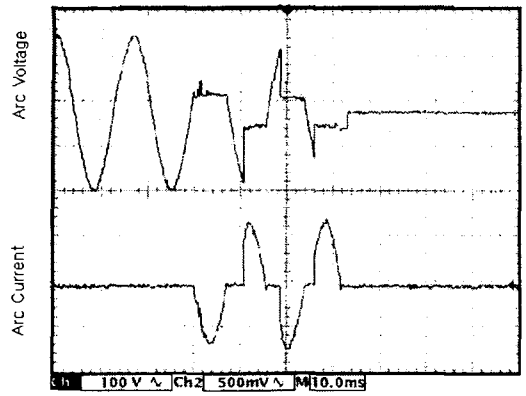


그림 14. 제안한 아크전류 차단 제어기에 의한 아크 전 류, 전압 파형(150A 부하)

Fig. 14. Arc current and voltage waveform of an arc current controller

5. 결 론

아크전류 차단제어 알고리즘을 이용하여 기존 전류 제어기가 가지고 있지 않은 아크 전류에 대한 차단제어를 할 수 있는 아크전류 차단제어기를 설계하여, 일반적인 환경에서 사용되는 저전류, 저전압의 전원에서 발생하는 아크 전류를 제어하였으며, 아크 전류가 발생할 수 있는 여러 가지 환경에서의 아크 전류 제어 실험을 통하여, 전기배선상에서 이루어지는 이상전류를 차단제어할 수 있다.

본 논문을 통하여 지금까지 이루어지지 않았던 저전류에서의 아크 전류 제어를 함으로써 산업용의 대전류 및 기타 산업에서의 전기로 인한 재해를 줄일 수 있는 방법으로 발전될 수 있다.

본 실험에서, 기존 전류 제어기의 경우에 아크 전류가 연속적으로 발생해도 아크 전류에 대한 검출 및 제어가 불가능 하였다. 이러한 아크 전류가 발생할 경우에 발생하는 다량의 열에 의해 전기 배선의 피복이 열화되는 현상을 볼 수 있었다.

본 논문에서 제시한 아크전류 차단제어 알고리즘을 탑재한 아크전류 차단제어기는, 아크 전류의 용량에 따라 아크 전류의 발생시에 20ms ~ 0.5s 이내에 아크 전류를 차단할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 기존 전류 제어기가 가지지 않는 아크 전류 제어성능을 확인하였다.

감사의 글

"이 논문은 2003년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문임 "

참 고 문 헌

[1]. NEC(National Electric Code) : Article 210-Branch Circuits 210-12, (1999 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]. 김상현, 김해조, 마대영, 신태민, " 방전가공기용 액체 절연재료의 아크 방전 특성 연구 ", The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 8, No. 5, pp. 564, 1995

[6]. 이세헌, "아크 용접에 있어서의 아크의 특성과 응용", 대한 용접학회, 제 10권, 1호, 1992. 3.

[7]. 김상택, "GMAW 공정에서 아크 안정성의 실시간 측정", 한국과학기술원, 생산공학과 석사논문, 1989

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

[9]. Cullity, "Introduction to Magnetic Materials", Addison-Wesley, 1972.

[10]. Snelling, "Soft Ferrites : Properties and Applications", Butterworths, 1993.

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

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 : skv@skylogo.org

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. 1978-80한국원자력 연구소 선임연구원. 1980-현재 건국 대학교 전기공학과 교수

Tel : 02) 450-3485, Fax : 02) 447-9186

E-mail : lkkim@konkuk.ac.kr