

아크 및 스파크 재해에 대한 누전차단기 트립을 위한  
보조제어 전기안전장치에 관한 연구  
- 전력용 반도체 스위칭 소자 적용 및 응용 -

A Study on Auxiliary Control Safety Apparatus for RCD Trip  
on Electric Arc and Spark Disasters  
- Using by Power Semiconductor Switching Device -

곽동걸 · 신미영\* · 정도영\*†

Dong-Kurl Kwak · Mi-Young Shin\* · Do-Young Jung\*†

한중대학교 전기전자공학과, \*강원대학교 방재기술전문대학원  
(2006. 1. 19. 접수/2006. 2. 28. 채택)

요 약

전기화재의 주된 원인은 단락 및 과부하 사고, 누전 및 접촉불량 등으로 구분되며, 화재의 발생요인은 이들 사고에서 동반되는 아크나 스파크로 인한 화재가 대다수이다. 저압배전선로에 사용되는 고감도형 누전차단기는 누전과 과부하를 검출하여 차단하는 기능은 있으나, 전기화재의 직접적인 위험요소인 아크나 스파크 현상에 대한 차단기능은 없는 것으로 분석된다. 이것은 저압 분전반에 적용되는 누전차단기의 경우 정격차단시간이 30[ms](KS C 4613)로 정해져 있어, 더욱 낮은 레벨로 주기적으로 발생하는 아크나 스파크를 감지하지 못하기 때문이다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 본 논문에서는 전기화재에 기인되는 아크나 스파크에 대해 누전차단기를 트립시키는 보조제어장치를 제안하고, 제안된 보조제어장치의 이론적 해석과 실험측정을 통해 그 타당성을 입증시킨다.

ABSTRACT

The major causes of electrical fire are classified to short circuit fault, overload fault, electric leakage and electric contact failure. The occurrence factor of the fire is electric arc or spark accompanied with electrical faults. Residual Current Protective Device(RCD) of high sensitivity type used at low voltage wiring cuts off earth leakage and overload, but the RCD can't cut off electric arc or spark to be a major factor of electrical fire. As the RCDs which are applied low voltage distribution panel are prescribed to rated breaking time about 30[ms](KS C 4613), the RCDs can't perceive to the periodic electric arc or spark of more short wavelength level. To be improved on such problem, this paper is proposed to a auxiliary control apparatus for RCD trip on electric arc or spark due to electrical fire. Some experimental results of the proposed apparatus is confirmed to the validity of the analytical results.

**Keywords :** RCD, Earth leakage current, KS C 4613, Arc and Spark, Electrical fire

1. 서 론

오늘날 전기제품들의 다양화와 전기설비의 대용량화에 따른 전기재해로 인한 인명 및 재산피해도 증가하고 있는 실정이다. 최근 5년간 발생한 화재를 기준으로, 연평균 32,737건 중 전기화재가 차지한 비중이 8,863

건으로 27.1%를 차지하고 있다.<sup>1)</sup> 전기화재의 주된 원인은 단락 및 과부하 사고, 누전 및 접촉불량 사고로 크게 구분되며, 화재의 발생형태는 주위환경과 설비노후 등에 의해 매우 다양하게 나타난다.<sup>2)</sup> 전기화재의 원인별 비율을 분석해보면, Table 1과 같이 단락, 과부하, 누전, 접촉불량의 순으로 나타난다.<sup>3)</sup>

전기화재의 위험성은 이러한 1차적인 원인보다는 이들 사고에서 동반되는 아크(electric arc)나 스파크(spark)

† E-mail: dyjung@kangwon.ac.kr

**Table 1.** Analysis results of electrical fire

(2003년도 기준)

구분	단락	과부하	누전	접촉 불량	기타	계
건수	6,994	952	633	369	1,722	10,670
비율(%)	65.6	8.9	5.9	3.5	16.1	100

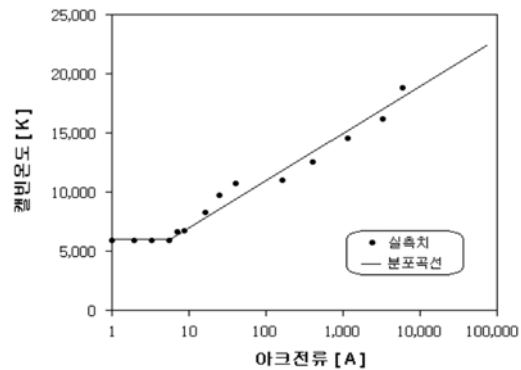
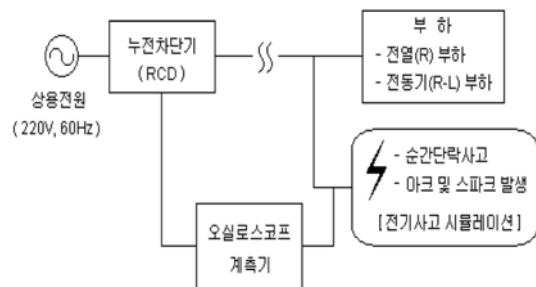
에 의한 주변 가연물질로 확대되는 2차적 영향에 의한 화재가 대다수이다.<sup>45)</sup> 가정이나 산업현장 등의 저압배선계통에 있어, 단락사고와 누전사고를 방지하기위해 배선용차단기 및 누전차단기를 사용하여 방지하도록 전기설비기술기준으로 정하고 있다. 최근에는 단락(과부하)보호를 겸한 고감도형 누전차단기(RCD)들이 개발되어 사용된다.<sup>6)</sup> RCD는 누전과 단락사고를 감지하여 차단하는 장점은 있으나, 직접적인 전기화재의 위험요소인 아크나 스파크 현상에 대한 차단 기능은 없는 것으로 분석된다. 이것은 분전반에 적용되는 누전차단기의 경우 정격차단시간이 30[ms](국내, KS C 4613)로 정해져 있어, 더욱 낮은 레벨로 주기적으로 발생하는 아크나 스파크를 감지하지 못하기 때문이다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기위하여, 전기화재에 기인되는 아크나 스파크에 대해 누전차단기를 트립(trip)시키는 보조제어장치를 제안하고, 이론적 해석과 실험측정을 통해 그 타당성을 입증하고자 한다.

## 2. 아크에 대한 누전차단기 성능분석

저압배선계통에 사용되는 누전차단기의 내부구조는 지락검출장치, 트립장치, 개폐기구로 구성되어 있으며, 지락검출장치로 사용되는 영상변류기(ZCT)는 고정밀로 제작되어 그 신뢰성이 우수하여 저압 배선계통에서 정격감도전류가 15[mA] 또는 30[mA]로 정해져 사용된다. 최근에는 단락(과부하)보호를 겸한 누전차단기가 보편적으로 사용되고 있으며, 구조적으로는 기존의 누전차단기에 단락(과부하)사고를 검출 차단하는 제어회로를 부가한 구조로써, 배선계통의 단락사고에 대해서도 보호기능을 가지게 된다. 그러나 전기화재의 위험요소인 아크나 스파크 현상에 대해서는 그 발생주기(과장)가 매우 짧아 30[ms]의 차단동작시간으로 규정된 상용의 누전차단기로는 차단기능을 발휘하지 못하는 문제점이 있다.

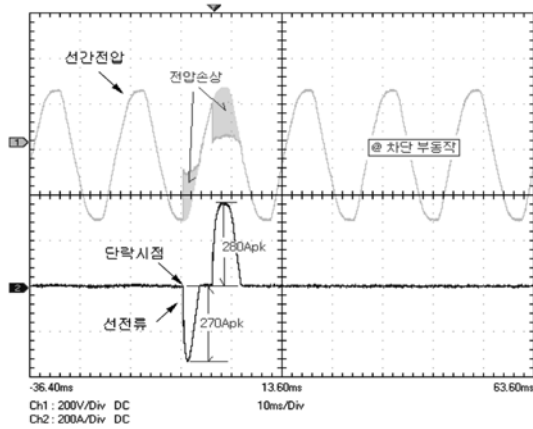
또한 전기화재에 주요소인 아크와 스파크의 발생과 온도특성을 살펴보면, 아크와 스파크의 발생은 전도체가 단선(breaking of wire) 또는 순간단락(short)될 경

**Fig. 1.** Temperature of an electric arc.**Fig. 2.** Block diagram for performance analysis of RCD.

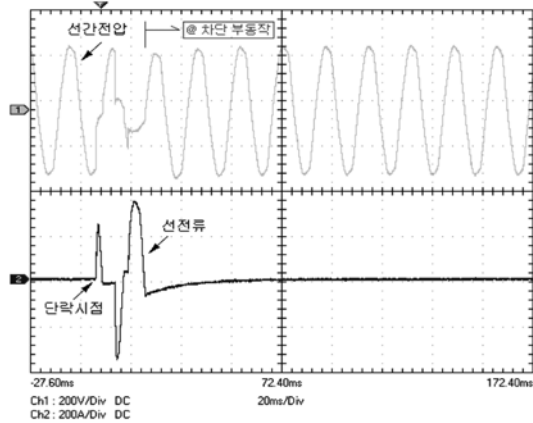
우나 절연된 두 전극사이의 상승된 전계로 인한 절연 파괴의 경우 그리고 도체의 접속·접촉불량의 경우에 발생하는 불꽃방전(spark discharge) 현상으로써, 일반적으로 아크는 연속적인 불꽃방전에 대한 용어이며, 스파크는 일시적 또는 불연속적 불꽃방전을 의미한다. 아크나 스파크는 매우 짧은 시간에 매우 큰 값의 전기에너지에너지를 가지고 있으며, 대부분 불꽃방전은 이 전기에너지를 열에너지로 소모되는 특징이 있다. 아크발생시 아크전류가 가지는 온도를 측정해보면, Fig. 1과 같은 온도특성을 보인다.<sup>4)</sup>

도체로써 많이 사용되는 동(copper)의 용융온도가 1085°C이며 알루미늄이 660°C인 점을 고려하면, 아크나 스파크 발생시 도체의 높은 열의 발생으로 인한 피복이나 주위의 발화물질로의 화재사고의 위험성은 클 것으로 예측된다. 이러한 전기화재의 요인이 되는 아크나 스파크에 대해 누전차단기의 성능을 분석하기위하여 Fig. 2에 성능분석 블록도를 나타낸다.

Fig. 3은 아크에 대한 누전차단기의 동작유무를 확인하기위한 분석과형으로써 인위적인 사고발생 시뮬레이터를 통해 측정된 결과이다. 실측에 사용된 누전차단기(RCD)는 한국산업규격(KS C 4613)에 준하여 제



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 3. Operation waveforms for momentary short circuit of RCD.

작된 인증제품으로, 단상 2선식 110/220[V], 정격전류 30[A], 정격감도전류 30[mA], 정격동작시간 30[ms]의 단락(과부하)보호겸용 고감도형 누전차단기를 사용하였다. Fig. 3의 아크발생에 대한 RCD의 성능분석결과에서 두 경우 모두 약 11[ms]동안 순간 아크전류 최대치 280[A]의 매우 큰 전류가 흘렀으나 RCD의 차단이 불가능하였다. 이것은 RCD의 차단동작시간(30ms)보다 더욱 짧은 주기의 아크전류에 대해서 RCD는 차단기능을 감지하지 못한 결과이다.

또한 전기사고에 대한 이상전류(고장전류)들을 분석해보면, 고장전류의 순시최대치는 크나 그 실효치가 적으며, 생성 주기가 매우 짧아 차단기의 차단기능이 상실되는 결과를 가져온다. 저압배전계통에 사용되는 차단기들은 제어방식이 열동식 또는 전자식 구조로 설계

되어 열동식의 경우 이상전류의 실효치가 적으면 발열량( $H = 0.24I^2Rt$ )이 적어 차단동작이 실패되고, 전자식의 경우 이상전류의 주기가 짧으면 트립코일의 여자가 불가능하여 차단기능이 상실된다.<sup>5)</sup>

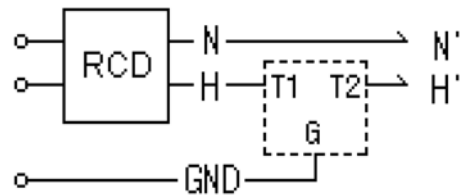
### 3. 누전차단기의 보조제어장치

#### 3.1 회로구성 및 동작원리

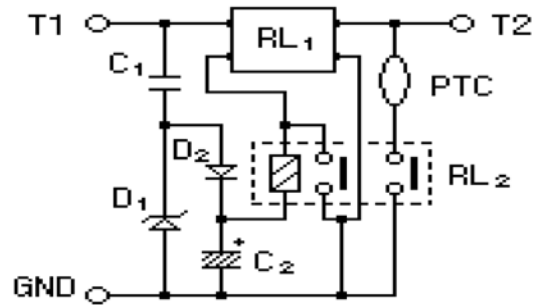
본 논문에서는 전기화재의 요인이 되는 아크나 스파크를 감지하여 누전차단기를 트립시키게 하는 보조제어장치를 개발하여 기존 누전차단기의 문제점을 개선하고자 한다. 단상 저압배전계통에 대한 제한된 누전차단기 보조제어장치를 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4(a)는 누전차단기와 보조제어장치의 결선도를 나타내며, Fig. 4(b)는 보조제어장치의 회로도를 나타낸다.

누전차단기와 3단자의 보조제어장치는 Fig. 4(a)와 같이 높은 전압선(H)과 접지(GND) 선간에 결선되며, 각종 전기사고 발생시에 보조제어장치는 이상전류를 검출하고 접지를 통해 큰 전류를 흘려 보내 누전차단기로 하여금 누전으로 인식시켜 차단기를 트립(trip)시키게 된다.

보조제어장치의 회로구성은 Fig. 4(b)와 같이 이상전류를 검출하는 전류형 리드스위치(reed switch) RL<sub>1</sub>, 누전차단기를 동작시키기 위한 릴레이 RL<sub>2</sub>, 릴레이 접점



(a) Wiring connection diagram



(b) Auxiliary control apparatus

Fig. 4. Auxiliary control apparatus of RCD.

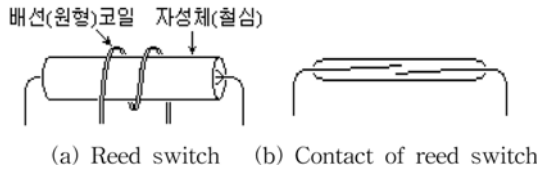


Fig. 5. Construction figure of reed switch.

보호용 저항 PTC\_서미스터, 제어회로 정전압 공급회로  $C_1$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  그리고 릴레이의 전원 및 자기유지용 커패시터  $C_2$ 로 구성된다.

보조제어장치의 동작원리를 살펴보면, 순간단락사고 및 아크발생 등의 이상전류가 발생하면 리드스위치  $RL_1$ 의 코일에 자속이 발생하여 리드스위치 접점이 온(on)되고 릴레이  $RL_2$ 가 여자(excitation)된다. 릴레이  $RL_2$  접점의 턴-온에 의해 전압 선로(H)와 접지(GND)간에 강제적인 단락회로를 형성시켜 누전차단기를 신속히 동작시키게 한다.

여기서, 정저항특성을 가지는 PTC(Positive Temperature Coefficient)서미스터(thermistor)는 단락전류에 의한 릴레이  $RL_2$ 의 접점을 보호하기 위해 사용된다.<sup>7)</sup> 또한 커패시터  $C_2$ 는 매우 짧은 주기를 가진 이상전류로 인해  $RL_1$ 과  $RL_2$  접점의 자동복귀에 따른 누전차단기의 부동작을 방지하기 위한 목적으로 릴레이의 자기유지를 지속시키기 위해 사용되는 소자이다.

본 제안회로의 주요 소자로 사용된 리드스위치의 구조를 Fig. 5에 나타낸다.

리드스위치는 선로전류의 크기에 대한 자속을 검출하여 특정치 이상의 자속에 대해 접점을 동작시키는 구조이며, 스위치의 응답속도가 수[ $\mu$ s]~수[ms]로 매우 양호한 특성을 가진다. 리드스위치의 내부자속은 배선 코일의 권선수, 전류, 철심의 크기와 투자율에 의해 정해진다. 자속의 세기는 식 (1)의 비오-사바르(Biot-Savart) 법칙을 이용하여 구할 수 있다.

$$dH = \frac{Idl \sin\theta}{4\pi r^2} [AT/m] \quad (1)$$

여기서,  $dH$ 는 자계의 세기,  $I$ 는 선로의 전류,  $dl$ 은 도체의 미소길이,  $r$ 는 임의의 한점과의 거리,  $\theta$ 는 전류의 방향과 임의의 한점과 이루는 각도이다. 위 식을 이용하여 리드스위치의 자계의 세기는 다음 식으로 구해진다.

$$H = \int_0^{2\pi a} \frac{NI dl \sin\theta}{4\pi a^2} = \frac{NI}{4\pi a^2} \int_0^{2\pi a} dl$$

$$= \frac{NI}{2a} [AT/m] \quad (2)$$



Fig. 6. Photograph of auxiliary control apparatus.

여기서,  $N$ 는 권선수이고  $a$ 는 원형코일의 반경이다. 또한 리드스위치의 자속밀도  $B$ 는 다음으로 주어진다.

$$B = \mu H = \frac{\mu NI}{2a} [Wb/m^2] \quad (3)$$

여기서,  $\mu$ 는 투자율(permeability)이다. 만약 자성체 내부의 매질이 공기인 경우 공기의 투자율  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  [H/m]로 주어진다.

위 식들을 이용하여 이상전류의 크기에 따른 리드스위치의 선정과 감도전류 설정 및 배선코일의 권선수를 결정할 수 있다.

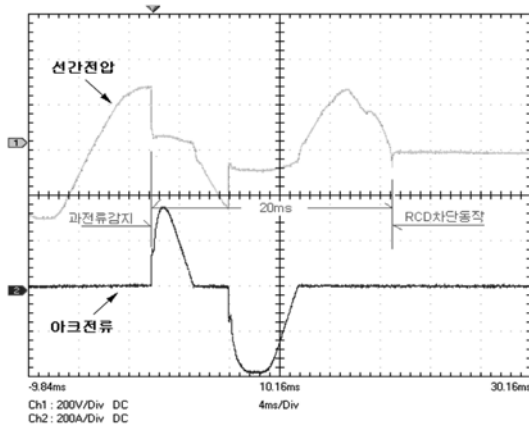
Fig. 6은 제안된 보조제어장치의 외형을 나타내며, 회로구성이 간단하여 소형·경량으로 제작이 가능한 장점이 있다. 또한 제안된 보조제어장치는 제어원리가 간단하며 리드스위치의 고속·고정밀 응답특성을 이용한 구조로 설계되어 신뢰성이 증대된다.

### 3.2 누전차단기 보조제어장치의 특성분석

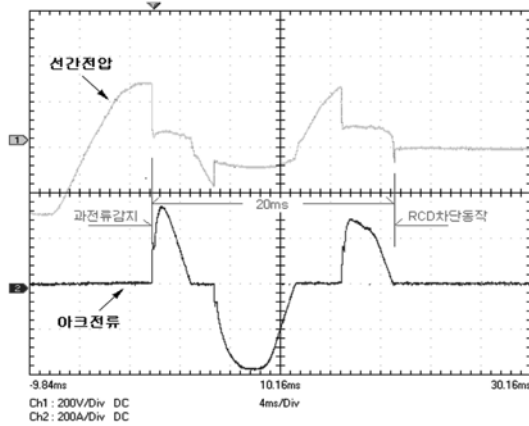
제안된 누전차단기 보조제어장치에 사용된 소자들의 회로정수를 Table 2에 주어진다. 또한 실험에 사용된 고감도형 누전차단기는 저압배전계통에 일반적으로 사용되는 단락(과부하)보호 겸용(단상 220V, 정격전류 30A, 정격감도전류 30mA, 동작시간 30ms, 정격차단 용량 1.5kA)을 사용하였다.

Table 2. Circuit parameters

공급전압	AC220V, 60Hz	커패시터 $C_2$	47 $\mu$ F/18V, 전해질
커패시터 $C_1$	10nF/AC250V	릴레이 $RL_1$	200~500AT
다이오드 $D_1$	18V, 0.5W	릴레이 $RL_2$	12V, 12W
다이오드 $D_2$	$V_{rr}=600V$ , 20W	PTC 서미스터	1.5 k $\Omega$

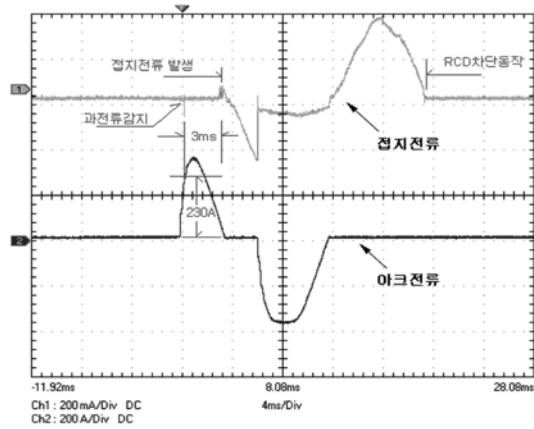


(a) Case 1

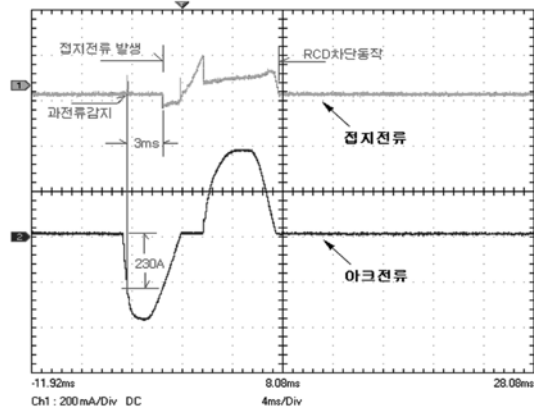


(b) Case 2

Fig. 7. Operation waveforms of proposed apparatus.



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 8. Operation waveforms of proposed apparatus.

리드스위치는 외부 자계의 간섭을 없애기 위해 원통형 PVC 자성체를 적용시켰고, 리드스위치 감도전류 설정값은 이상전류의 크기를 감안하여 약 250 AT을 기준하고 1[turn]으로 설계하였다. 또한, 커패시터 C<sub>2</sub>와 릴레이 RL<sub>2</sub>는 누전차단기를 동작시키는 목적으로 방전 시정수를 30[ms] 이상 200[ms] 이하로 설정하였다. 그리고 화재의 위험성이 저조한 유도성부하의 개폐시나 뇌임펄스 서어지(충격파) 등, 주기가 2[ms] 이하의 속류성 전기신호에 대해서 누전차단기의 오동작을 방지하기 위해, 릴레이 RL<sub>2</sub>의 동작시간이 3[ms]~5[ms]인 소자로 선정하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 아크전류에 대한 제안된 보조제어장치의 동작성능을 확인하기 위한 분석파형으로써 인위적인 사고발생 시뮬레이터를 통해 측정된 결과이다.

본 실험을 위한 인위적인 아크발생 시뮬레이터는 AC 220V 선간에 탄소저항(색저항) 6.8 [kΩ]/0.25[W]를 순간단락시켜 저항체의 순간적인 파손에 의해 발생되는 불꽃방전으로 유도하였다.

Fig. 7은 선간전압과 아크전류에 대한 동작파형을 나타낸다. Fig. 7(a)는 최대치 360[A], 주기 11[ms]의 아크전류에 대한 분석파형이고 Fig. 7(b)는 최대치 380[A], 주기 12[ms]의 아크전류에 대한 분석파형으로써, 두 경우 모두 보조제어장치의 고속, 고정밀의 동작에 의해 누전차단기의 양호한 차단동작을 보였다.

Fig. 8은 접지전류와 아크전류에 대한 동작파형을 나타낸다. 제안된 보조제어장치는 아크전류를 감지하고 접지를 통해 큰 전류를 흘려 누전차단기를 누전으로 인식시켜 차단기를 트립시켰다. 또한 Fig. 8에서 보조

제어장치의 리드스위치는 감도전류 설정값인 250[A]내외에서 동작됨을 보이며, 이상전류를 감지하여 누전차단기 트립용 릴레이 RL<sub>2</sub>의 동작까지 소요된 시간은 약 3[ms]로 매우 우수한 특성을 보였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 저압배선계통의 전기화재의 주요원인이 되는 순간단락사고, 선로노후 및 접속·접촉불량에 의한 아크 및 스파크발생에 대해 기존의 차단기로는 차단이 불가능한 문제점을 해결하기 위한 보조제어장치를 개발하여 제안하였다.

제안된 보조제어장치는 배선선로에 발생한 이상전류를 검출하고 접지를 통해 단락전류를 흘러 보내어 기존의 누전차단기로 하여금 누전으로 인식시켜 차단기를 트립시키는 구조로 설계되었다. 이상전류의 검출에는 응답특성과 내구력이 우수한 리드스위치를 사용하여 보조장치의 신뢰성을 증가시켰다. 또한 제안된 보조제어장치는 사고발생 시뮬레이터에 의한 실측 특성 분석을 통해 그 실용성이 입증되었으며, 제어장치의 구조와 제어방식이 간단하여 소형경량으로 설계제작이 가능하였고 이에 따른 제작비용의 감소와 설치의 용이

한 장점이 부여되었다. 향후 제안된 보조제어장치가 각종 전기사고를 예방하여 인명 및 재산피해를 최소화할 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. 한국전기안전공사, “전기화재 통계분석”,(2005).
2. R. N. Anderson, “What Came First? The Arc Bead or the Fire?”, EC&M 100, pp.20-21(2001).
3. 행정자치부, “2003년도 화재통계연보”,(2003).
4. V. Babrauskas, “Fire due to Electric Arcing: Can ‘Cause’ Beads Be Distinguished from ‘Victim’ Beads by Physical or Chemical Testing?”, Fire and Materials 2003, Interscience Communications Ltd., pp.189-201(2003).
5. 새턴정보통신 부설연구소, “부하별 아크, 스파크 사고 데이터 및 분석 보고서”,(2002).
6. 최충석 외, “고감도형 누전차단기 접점의 스위칭에 따른 아크 비산 특성”, 한국화재소방학회 논문지, Vol. 19, No. 2, pp.63-68(2005).
7. 추순남, 백동현, “화재감지센서 활용을 위한 적층형 PTC 서미스터의 특성에 관한 연구”, 한국화재소방학회논문지, Vol. 19, No. 2, pp.75-80(2005).