

저압 배전선로의 누전 및 배선용 차단기의 오동작 방지를 위한 고속형 전기안전 보호장치

論 文

56-11-8

Electric Safety Protection Device of High Speed for Incapable Operation of ELB and MCCB Using the Low Voltage Distribution Line

郭東杰[†] · 鄭道永^{*}

(Dong-Kurl Kwak · Do-Young Jung)

Abstract - This paper is studied on a novel Electric Safety Protection Device (ESPD) of high speed for incapable operation of Earth Leakage Circuit Breaker (ELB) and Molded_case Circuit Breaker (MCCB) using the low voltage distribution line. 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), that is ELB and MCCB, 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 research development is proposed to a novel ESPD of high speed to trip of distribution line on electric arc or spark due to electrical fire. Some experimental results of the proposed ESPD are confirmed to the validity of the analytical results.

Key Words : ESPD, Electrical fire, ELB, MCCB, KS C 4613, RCDs, Electric arc and spark

1. 서 론

오늘날 전기제품의 다양화와 전기설비의 대용량화에 따른 전기재해로 인한 인명 및 재산피해도 증가하고 있는 실정이다. 최근 5년간 발생한 화재를 기준하여, 연평균 3만2천여건 중 전기화재가 차지한 비중이 8천5백여건으로 27%를 차지하고 있다[1]. 전기화재의 주된 원인은 단락 및 과부하 사고, 누전 및 접촉불량 사고로 크게 구분되며, 화재의 발생형태는 주위환경과 설비노후 등에 의해 매우 다양하게 나타난다. 전기화재의 원인별 비율을 분석해보면, 표 1과 같이 단락, 과부하, 누전, 접촉불량의 순으로 나타난다[2].

전기화재의 위험성은 이러한 1차적인 원인보다는 이들 사고에서 동반되는 아크(electric arc)나 스파크(spark)에 의한 주변 가연물질로 확대되는 2차적 영향에 의한 화재가 대다수이다[3,4]. 가정이나 산업현장 등의 저압배전계통에 있어, 단락사고와 누전사고를 예방하기 위해 배선용차단기 및 누전차단기를 설치하도록 전기설비기술기준으로 정하고 있다[5]. 최근에는 단락 및 과부하 보호를 겸한 고감도형 누전차단기(RCD)들이 개발되어 사용된다. RCD는 누전과 과부하 사고를 감지하여 차단하는 장점은 있으나, 전기화재의 직접적인 위험요소인 순간단락사고에 의한 전기아크나 스파크 현상에 대한 차단 기능이 미미한 것으로 분석된다[6,7].

표 1 전기화재의 원인별 분석결과

Table 1 Analysis results of electrical fire

(2005년도 기준)

구분	단락	과부하	누전	접촉불량	기타	계
건수	6,449	858	430	402	1,852	9,991
비율(%)	64.6	8.6	4.3	4.0	18.5	100

이것은 분전반에 적용되는 누전차단기의 경우 정격차단시간이 30ms(국내, KS C 4613)로 정해져 있어, 기존 차단기의 감지 범위를 벗어난 전기아크나 스파크를 감지하지 못하기 때문이다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여, 전기화재에 기인되는 아크나 스파크 그리고 순간단락사고에 대해 고속 고정밀로 트립 차단하는 전기안전 보호장치를 제안하고 제안된 장치의 이론적 해석과 실험측정을 통해 그 타당성을 입증하고자 한다.

2. 기존 차단기의 동작성능 분석

2.1 전기아크 및 스파크의 고찰

전기화재에 주요소인 전기아크와 스파크의 발생과 온도특성을 살펴보면, 이들 아크와 스파크의 발생은 전도도체가 단선(breaking of wire) 또는 순간단락(circuit short)될 경우나 절연된 두 전극사이의 상승된 전계로 인한 절연파괴의 경우 그리고 도체의 접속·접촉불량의 경우에 발생하는 불꽃방전(spark discharge) 현상으로써, 일반적으로 아크는 연속적인

[†] 교신저자, 正會員 : 江原大 防災技術專門大學院 助教授 · 工博

E-mail : dkkwak@kangwon.ac.kr

^{*} 正會員 : 江原大 防災技術專門大學院 教授 · 工博

接受日字 : 2007年 8月 15日

最終完了 : 2007年 9月 27日

불꽃방전에 대한 용어이며, 스파크는 일시적 또는 불연속적 불꽃방전을 의미한다. 아크나 스파크는 매우 짧은 시간에 매우 큰 값의 전기에너지를 가지고 있으며, 대부분 불꽃방전은 전기에너지를 열에너지로 소모되는 특징이 있다. 아크발생시 아크전류가 가지는 온도를 측정해보면, 그림 1과 같은 온도특성을 보인다[3].

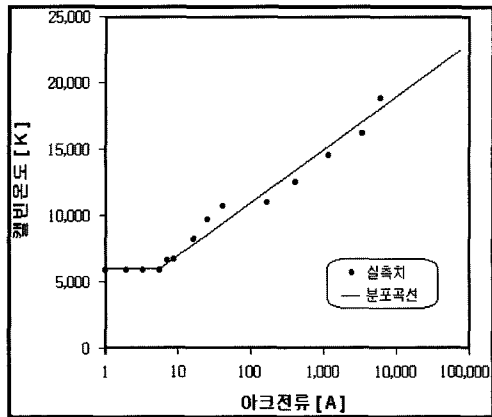


그림 1 전기아크의 온도특성
Fig. 1 Temperature characteristic of an electric arc

전도성 도체로써 많이 사용되는 동(copper)의 용융온도가 1083℃이며 알루미늄이 660℃인 점을 고려하면, 아크나 스파크 발생시 도체의 고열로 인한 피복이나 주위에 발화물질로의 화재사고 위험성은 클 것으로 예측된다.

2.2 기존 차단기의 동작성능 분석

저압배전계통에서 단락사고나 과부하 사고에 대해 계통을 보호하기위한 많은 차단장치(누전 및 배선용차단기)와 보호기기(과전압·과전류릴레이)가 보급되고 있지만, 빈번한 오동작과 비신뢰성, 저조한 응답특성 등으로 인해 많은 피해사례들이 보고된다[7-9]. 또한 이들 보호장치들은 일반적으로 옥내 전기공급의 전단 인입선에 설치되어 있어 복잡한 배전계통 중단부에서의 전기사고에 대해서는 정확히 감지가 되지 않아 피해를 증대시키는 문제점이 발생한다. 누전차단기의 내부구조는 지락 검출장치, 트립장치, 개폐기구로 구성되어 있으며, 지락 검출장치로 사용되는 영상변류기(ZCT)는 고정밀로 제작되어 그 신뢰성이 우수하고 저압배전계통에서 정격감도전류가 15mA/30mA로 정해져 사용된다[5]. 그림 2는 기존 누전차단기의 정상상태와 사고발생시에 대한 전기적 동작원리를 보인다. 계통의 정상상태에서는 그림 2(a)와 같이 선전류 I_1 과 I_2 가 같은 크기이므로 ZCT에 유입과 유출이 이루어지고 자속 Φ_1 과 Φ_2 의 상쇄로 인한 기전력이 발생하지 않는다. 그러나 계통의 누전사고시는 그림 2(b)와 같이 누전전류 I_g 로 인한 ZCT에 Φ_g 만큼의 자속쇄효수가 발생된다. 발생된 자속은 트립코일에 기전력을 발생시키고 전자개폐기(Electro magnetic contactor)의 동작에 의한 배전선로를 차단시키는 일련의 동작원리를 가진다.

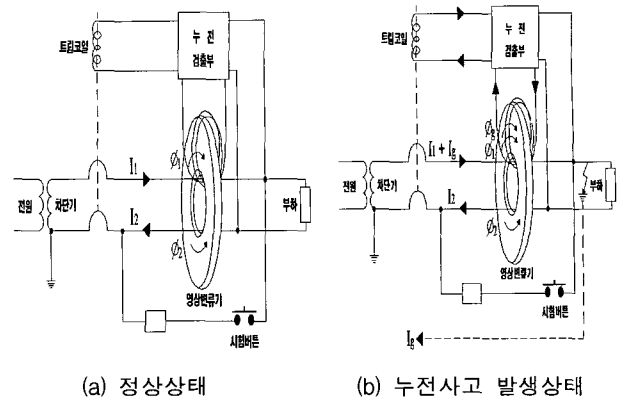


그림 2 누전차단기의 전기적 원리
Fig. 2 Electrical principle of ELB

최근에는 단락(과부하) 보호를 겸한 누전차단기(RCD)가 보편적으로 사용되고 있으며, 구조적으로는 기존의 누전차단기에 단락(과부하)사고를 검출 차단하는 제어회로부를 추가한 구조로써, 배선계통의 단락사고에 대해서도 보호기능을 가지게 된다. 그러나 전기화재의 위험요소인 아크나 스파크 현상에 대해서는 그 발생주기(과장)가 매우 짧아 30ms의 차단동작시간으로 규정된 상용 누전차단기로는 차단기능을 발휘하지 못하는 문제점이 있다. 이러한 전기화재의 요인이 되는 아크나 스파크에 대해 누전차단기의 성능을 분석하기 위하여 그림 3에 성능분석 블록도를 나타낸다.

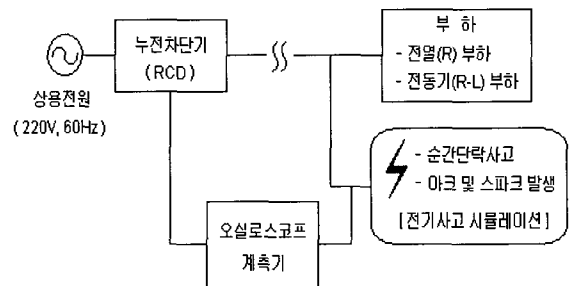
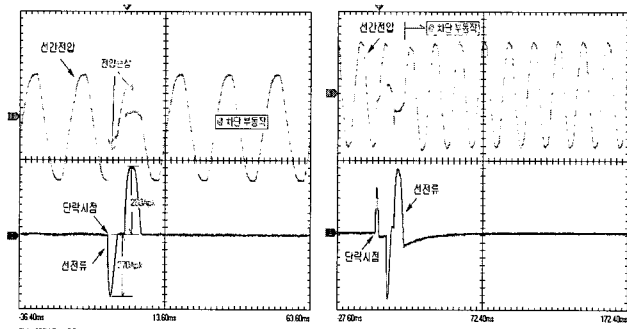


그림 3 RCD의 성능분석을 위한 블록도
Fig. 3 Block diagram for performance analysis of RCD

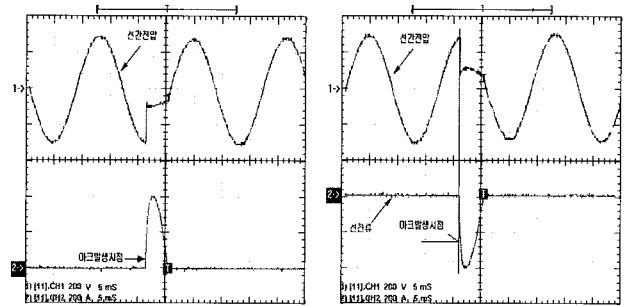
그림 4는 인위적인 순간단락사고 시뮬레이터를 통한 아크전류에 대한 누전차단기의 동작유무를 확인하기위한 측정과형이다. 실측에 사용된 누전차단기(RCD)는 한국산업규격(KSC 4613)에 준해 제작된 인증제품으로 단상 2선식 110/220V, 정격전류 30A, 정격감도전류 30mA, 정격동작시간 30ms, 정격차단용량 2.5kA의 단락(과부하)보호겸용 고감도형 누전차단기를 사용하였다. 그림 4(a), (b)는 순간단락사고에 의한 두 세개의 높은 아크전류가 발생한 경우이고, 그림 4(c), (d)는 한 개의 높은 아크전류가 발생한 경우이다. 기존 차단기의 성능결과를 검토해보면, 네 경우 모두 약 5.0~10.5ms 동안 아크전류 최대치 270~400A의 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

고장전류들을 분석해보면, 고장전류의 순시최대치는 크나 그 실효치가 적으며, 생성 주기가 매우 짧아 차단기의 차단기능이 상실되는 결과를 가져온다.

그리고 저압배전계통에 사용되는 차단기의 전기적 제어방식은 열동식, 전자식 또는 열동전자식 구조로 설계된다. 먼저 열동식의 경우는 사고발생에 대한 고장전류의 실효치가 적으면 발열량($H = 0.24 I^2 R t$)이 적어 차단동작이 실패되고, 전자식의 경우는 이상전류의 주기가 짧으면 트립코일의 여자 불가능하여 차단기능이 상실되는 문제점이 발생된다.



(a) Case 1 (b) Case 2



(c) Case 3 (d) Case 4

그림 4 기존 차단기의 순간단락사고시의 동작특성 파형
Fig. 4 Operation performance waveforms for momentary short circuit fault of conventional RCD

3. 제안된 고속형 전기안전 보호장치 해석 및 검토

3.1 회로구성 및 동작원리

본 논문에서 제안한 고속 고감도형의 전기안전 보호장치(ESPD)의 회로도를 그림 5에 나타낸다. 제안한 전기안전 보호장치의 회로구성은 교류전원 공급단자 T1과 T2, 부하단 출력단자 T3과 T4, 회로의 직류전원 공급을 위한 다이오드 정류회로부, 부하전류 차단용 릴레이 RL1과 접점 P1, 릴레이 구동용 반도체 스위치 SCR과 TR, 그리고 고장전류 검출용 전류센서부 RL2/P2 (고정밀 reed switch)로 구성된다.

제안한 ESPD의 동작원리를 보면, 먼저 초기상태로 브릿지 다이오드를 통한 직류전원이 제어시스템에 공급되고 있다. 평상시 정상상태의 경우, 반도체 스위치 SCR은 오프(off)된 상태이고 TR은 온(on)으로 되어 릴레이 RL1과 접점 P1이 동작하여 교류입력전원이 부하단으로 공급되는 정상상

태를 유지한다. 그러나 부하단에서 계통사고(단락사고, 과부하사고 등)가 발생할 경우, 이러한 사고에 의한 임펄스성의 과전류가 발생하여 전류센서인 리드스위치 RL2의 코일에 자속이 발생하여 리드스위치 접점 P2가 온되고 구동용 스위치 SCR을 턴-온시킨다. SCR의 온동작에 의해 릴레이 RL1의 제어용 스위치로 사용된 TR이 오프상태로 된다. TR의 오프에 의해 릴레이 RL1이 자기 소세되고 접점 P1이 턴-오프되어 부하단의 전원공급을 차단시키는 일련의 동작원리를 가진다. 그 결과 전기사고로부터 계통을 보호하여 기설치된 차단기의 오동작에 의한 전기화재 및 전기제해의 문제점을 해결시키는 장점이 주어진다.

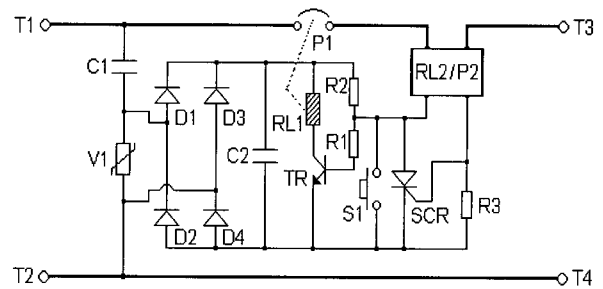


그림 5 제안한 고속 고감도형 전기안전 보호장치
Fig. 5 A proposed ESPD of high speed and high sensitivity

여기서 리셋스위치 S1은 보호장치의 동작유무 확인 및 고장수리 복구를 위한 시스템의 초기화 리셋용으로 사용된다. 리셋스위치 S1의 동작에 의해 반도체 스위치 SCR은 강제적으로 소호되어 초기화 된다. 표 2는 제안된 보호장치의 설계에 사용된 소자부품의 회로 정수값을 나타낸다.

표 2 회로 정수

Table 2 Circuit parameters

공급전압	AC220V, 60Hz	다이오드 D1~D4	Vrr=600V, 20W
커패시터 C1	470nF/AC250V	릴레이 RL1/P1	12V, 12W, 1a
커패시터 C2	47μF/25V, 전해질	리드스위치 RL2/P2	200~500AT
배리스터 V1	18V, 20W	구동용 스위치 SCR	12V, 5W

제안한 전기안전 보호장치의 고장전류 검출센서(RL2/P2)로 이용된 리드스위치(reed switch)의 내부구조를 그림 6에 나타낸다.

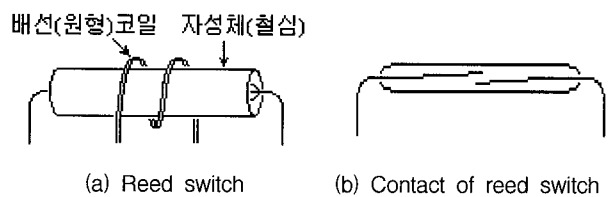


그림 6 리드스위치의 구성도
Fig. 6 Construction figure of reed switch

리드스위치는 선로전류의 크기에 대한 자속을 검출하여 특정치 이상의 자속에 대해 접점을 동작시키는 원리를 가지며, 접점의 응답속도가 수 μ s~수ms로 매우 양호한 특성을 가진다. 리드스위치의 내부자속은 배선코일의 권선수, 전류, 철심의 크기와 투자율에 의해 정해진다. 자속의 세기는 식 (1)의 비오-샤바르(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, θ 는 전류의 방향과 임의의 한점과 이루는 각도이다. 위 식을 이용하여 리드스위치의 자계의 세기는 다음 식으로 주어진다.

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

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

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

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

여기서, μ 는 투자율(permeability)이다. 만약 자성체 내부의 매질이 공기인 경우 투자율은 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ 로 주어진다. 위 식들을 이용하여 리드스위치의 선정과 감도전류 설정 및 배선코일의 권선수를 결정할 수 있다.

3.2 제안된 전기안전 보호장치의 동작성능 분석

그림 7은 제안한 전기안전 보호장치의 실제 외형도를 나타내며, 회로구성이 간단하여 소형·경량으로 제작이 가능한 장점이 있다.

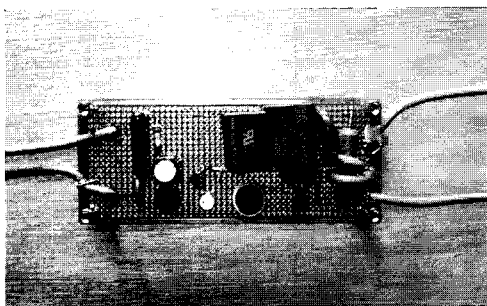


그림 7 제작된 전기안전 보호장치 외형도
Fig. 7 Photograph of a manufactured ESPD

또한 제안된 보호장치는 제어원리가 간단하고 고속의 반도체소자와 리드스위치의 고정밀 응답특성을 이용한 구조로 설계되어 그 신뢰성이 증대된다.

고장전류 센서로 사용된 리드스위치는 외부 자계의 간섭을 없애기 위해 원통형 PVC 자성체를 적용시켰고, 리드스

위치 감도전류 설정은 고장전류의 크기를 감안하여 약 100 AT을 기준해서 2 turn으로 설계하였다. 그리고 화재의 위험성이 저조한 유도성부하의 개폐시나 뇌임펄성 서어지(충격파) 등 주기가 2ms 이하의 속류성 전기신호에 대해서 제안한 보호장치의 차단동작을 방지하기위해서 릴레이 RL1을 동작시간이 3ms~5ms인 소자로 선정하였다.

제안한 ESPD는 자체 차단기능을 가지고 있어 매입형 콘센트나 외부의 멀티콘센트 또는 각종 전기전자기기 및 통신기기에 내장되어 각종 전기사고에 대해 신속하고 정확히 회로를 차단시켜 전기화재 및 전기재해를 예방할 수 있는 효과가 기대된다. 그림 8은 본 연구에서 제안한 ESPD를 기존에 주로 사용되는 멀티콘센트에 내장한 외형도를 나타낸다.

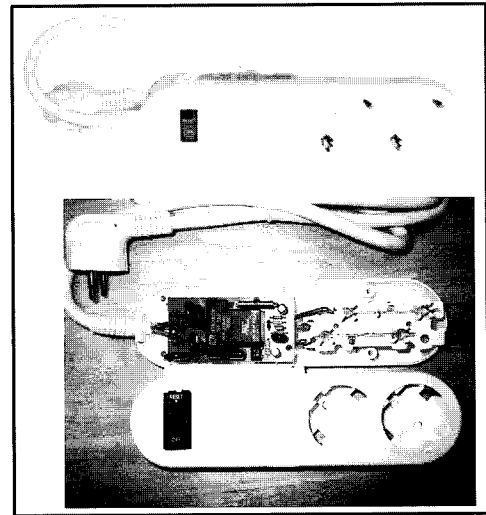


그림 8 ESPD가 내장된 멀티콘센트의 외형도
Fig. 8 Photograph of a multi plug-in containing ESPD

그림 9는 순간단락사고에 의한 아크전류에 대한 제안된 전기안전 보호장치의 동작성능을 확인하기위한 특성분석 파형으로써 인위적인 사고발생 시뮬레이터를 통해 측정된 결과이다. 본 실험을 위한 인위적인 아크발생 시뮬레이터는 AC220V 부하단 선간에 탄소저항(색 저항) 6.8k Ω /0.25W를 순간단락시켜 저항체의 순간적인 폭발로 인해 발생하는 불꽃방전으로 유도하였다.

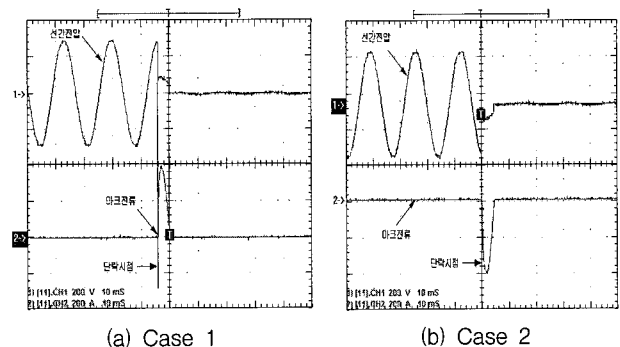


그림 9 제안된 ESPD의 동작특성 파형 (순간단락사고)
Fig. 9 Operation performance waveforms of the proposed ESPD (Momentary short circuit fault)

그림 9의 순간단락사고에 대한 동작특성 분석파형을 보면, 순간 단락전류 최대치 약 380~400A, 주기 5~8ms의 임펄스성 아크전류에 대해 제안된 전기안전 보호장치는 각 경우 모두 고속, 고정밀로 회로를 차단시키는 우수한 동작특성을 보였다.

그림 10은 접촉불량사고에 의한 스파크 발생시에 대한 동작성능을 확인하기 위한 분석파형이다. 인위적인 접촉불량사고는 AC 220V 부하선로 말단의 두 나선을 접촉시키고 그 사이에 염수(鹽水)에 적신 종이를 끼워 넣어 순간적인 접촉불량을 유도하여 사고 시뮬레이터를 실행하였다.

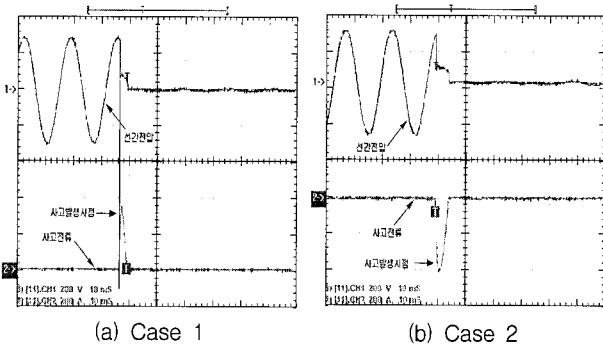


그림 10 제안된 ESPD의 동작특성 파형 (접촉불량사고)
 Fig. 10 Operation performance waveforms of the proposed ESPD (Electric contact wickedness failure)

그림 10의 접촉불량사고에 대한 동작특성 분석파형에서 순간 접촉불량에 의한 전류 최대치 약 350~410A, 주기 3~5ms의 임펄스성 스파크전류에 대해 제안된 전기안전 보호장치는 각 경우 모두 고속, 고정밀로 회로를 차단시키는 우수한 동작특성을 보였다. 그 외 수 차례에 걸친 다양한 실측분석을 통해서도 제안된 보호장치는 매우 우수한 동작성능을 가졌다.

4. 결 론

본 논문에서는 제어원리가 간단하고 고속의 반도체소자들과 리드스위치의 고정밀 응답특성을 이용한 전기안전 보호장치에 대해 연구되었다. 제안된 전기안전 보호장치는 전기화재의 주요원인이 되는 순간단락사고, 선로노후 및 접촉접촉불량에 의한 아크 및 스파크발생에 대해 기존의 차단기로는 차단이 불가능한 문제점들을 개선하는 특징이 있었다.

제안한 시스템의 고장전류 검출센서로 응답특성과 내구력이 우수한 리드스위치를 사용하였으며, 그 결과 실측분석을 통해 보호장치의 속응성과 신뢰성이 증대되었다. 또한 제안된 전기안전 보호장치는 차단동작시간이 약 3ms~10ms로 기존의 RCDs보다 아주 빠른 동작시간을 가졌으며, 사고발생 시뮬레이터에 의한 실측 특성분석을 통해 그 실용성이 입증되었다. 또한 보호장치의 구조와 제어방식이 간단하여 소형경량으로 설계제작이 가능하였고 자체 차단기능을 가지고 있어 매입형 콘센트나 외부 멀티콘센트 또는 각종 전기전자기기 및 통신기기 등에 내장되어 각종 전기사고에 대해 신속하고 정확히 전기회로를 차단시켜 전기화재 및 전기자해를 예방할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 행정자치부, "2006년도 화재통계연보", 2006
- [2] 한국전기안전공사, "전기화재 통계분석", 2005
- [3] R. N. Anderson, "What Came First? The Arc Bead or the Fire?", EC&M 100, pp.20-21, 2001
- [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] 한국공업규격, KS C 4613, 한국표준협회
- [6] 새턴정보통신 부설연구소, "부하별 아크, 스파크 사고 데이터 및 분석 보고서", 2002
- [7] 광동걸, 정도영, 신미영, "아크 및 스파크 재해에 대한 누전차단기 트립을 위한 보조제어 전기안전장치에 관한 연구", 한국화재소방학회논문지, Vol. 20, No. 1, pp. 71-76, 2006
- [8] 최충석 외, "고감도형 누전차단기 접점의 스위칭에 따른 아크 비산 특성", 한국화재소방학회논문지, Vol. 19, No. 2, pp. 63-68, 2005
- [9] 최규하 외, "차단기류 오동작 분석을 위한 전원왜형장치 설계 및 개발", 전력전자학회논문지, Vol. 11, No. 5, pp. 480-488, 2006

저 자 소 개



곽 동 걸 (郭 東 杰)

1964년 11월 11일생. 1990년 경남대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년 한국전기연구소 기술원. 1997년 거창기능대학 전기계측제어과 전임강사. 1998~2007년 한중대 전기전자공학과 조교수, 2007~현재 강원대 방재기술전문대학원 조교수
 Tel : 033-570-6823
 Fax : 033-570-6389
 E-mail : dkkwak@kangwon.ac.kr



정 도 영 (鄭 道 永)

1956년 8월 13일생. 1981년 영남대 전기공학과 졸업. 1984년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1983~현재 강원대 방재기술전문대학원 교수
 Tel : 033-570-6383
 Fax : 033-570-6389
 E-mail : dyjung@kangwon.ac.kr