

아크사고 발생 시 전압 왜형파를 이용한 아크차단기 개발

Development of Arc Fault Circuit Interrupter Using the Distorted Voltage Wave in Electric Arc Faults

곽 동 결*
 (Dong-Kurl Kwak)

Abstract - The major causes of electrical fire are classified to short circuit fault, overload fault, electric leakage and electric contact failure. The principal factor of the fire is electric arc or spark accompanied with such electric faults. Earth Leakage Circuit Breaker (ELB) and Molded Case Circuit Breaker (MCCB), that is, Residual Current Protective Devices (RCDs) used on low voltage distribution lines cut off earth leakage and overload, but the RCD can not cut off electric arc or spark to be a major factor of electrical fire. As the RCDs which are applied in 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 improve such problems, this paper studies on an arc fault circuit interrupter (AFCI) using the distorted voltage wave in electric arc faults. The proposed voltage sensing type AFCI is an electrical fire prevention apparatus of new conception that operates a circuit breaker with sensing the instantaneous voltage drop of line voltage at electrical faults occurrence. The proposed AFCI is composed of control circuit topology using some semiconductor switching devices. Some experimental tests of the proposed AFCI confirm practicality and the validity of the analytical results.

Key Words : AFCI, RCDs, Electrical fire, Electric arc or spark, KS C 4613

1. 서 론

최근 전기사용의 증대와 더불어 무분별한 전기사용과 노후 건물의 옥내 및 건물외벽의 그물망식 전기배선은 항상 전기사고의 위험에 무방비한 상태로 놓여져 있는 실정으로서 이에 대한 해결방안의 시급성이 인식된다. 또한 국민들의 전기사고에 대한 안전불감증은 직접 전기재해를 접하기 전에는 그 심각성을 인식하지 못하는 실정으로서, 소방방재청의 2011년도 화재통계 분석에 의하면 그림 1과 같이 원인별 화재발생 상황 중 전기화재가 전체 화재의 24% 이상을 차지하고, 매년 재산피해액이 가장 높은 것으로 분석하였다[1]. 그리고 2011년도 전기재해 통계분석에서 전기발화 요인별 내역을 보면 그림 2와 같이 미확인 단락을 포함한 단락사고가 71.5%로 가장 많았고 다음으로 과부하·과전류 12.6%, 누전·지락 5.1%, 반단선 1.7% 등으로 분석되었다[2].

특히 전기화재의 위험성은 이러한 1차적인 원인보다는 순간적인 단락사고에서 동반되는 아크(electric arc)나 스파크(spark)에 의한 주변 가연물질로 확대되는 2차적 영향에 의한 화재가 대다수이다[3, 4]. 이러한 전기화재를 예방하여 전체 화재건수를 줄이는 것이 화재로부터 국민을 보호하는 중요한 정책수단이 됨을 알 수 있다. 미국방화협회(NFPA)의 발표에 의하면 전기화재의 약 80%가 단락사고에 의한 아크로 인해 발생되었다고 보고하고 있으며, 이에 미국의 전기안

전규정(NEC)에는 2002년 1월 1일 이후 신축되는 모든 건물의 침실 배선에는 아크차단기(AFCI ; Arc Fault Circuit Interrupter)를 의무적으로 설치하도록 명문화하여 모든 가정의 전기회로에 아크차단기를 설치하도록 규정하고 있다. 우리나라의 경우 아크사고에 대한 정부나 소방관련기관의 관련 법규나 규정이 없어 사용자 스스로 전기화재 예방을 위해 노력해야 하는 실정으로서 아쉬운 점이 있다. 더욱이 국내 소방분야는 소방전기설비의 화재감지설비와 소방기계설비의 화재진압설비에만 중점적으로 다루고 있어 전기화재를 사전에 방지하기 위한 장치개발 등 근본적 대책 강구에는 크게 미흡한 실정이다.

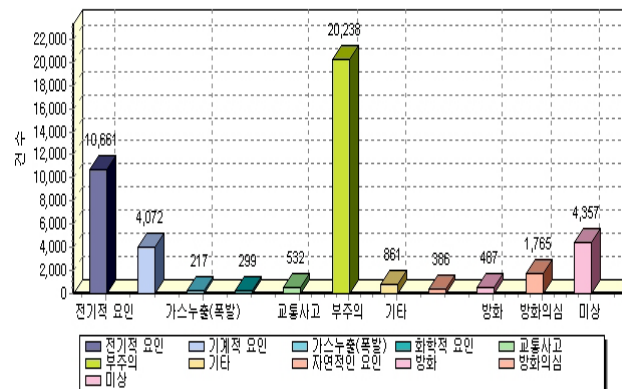


그림 1 2011년도 화재통계 분석
 Fig. 1 Analyses of fire statistics in 2011

* Corresponding Author : Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon Univ., Korea

E-mail : dkkwak@kangwon.ac.kr

Received : March 28, 2013; Accepted : May 15, 2013

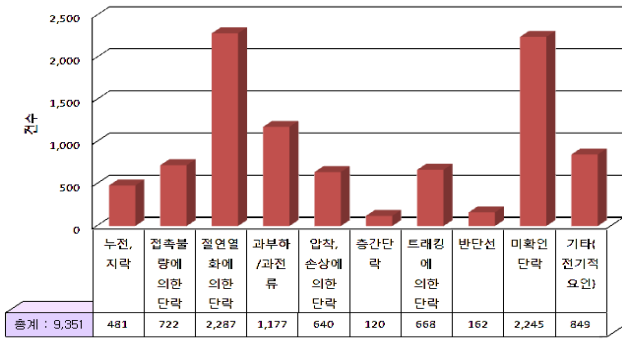


그림 2 2011년도 전기화재 요인별 분석 결과
Fig. 2 Analysis results of electrical fire factors in 2011

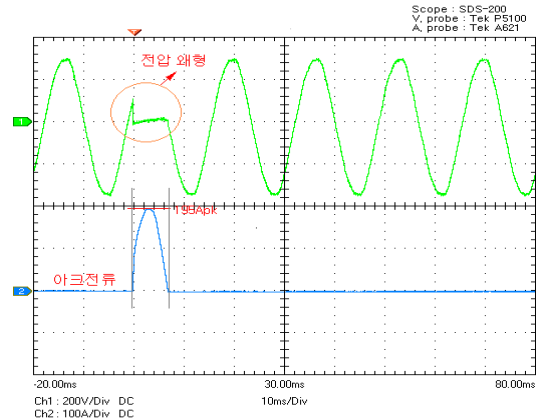
가정이나 산업현장 등의 저압 배전계통에 있어, 단락사고와 누전사고를 방지하기위해 배선용차단기(MCCB) 및 누전차단기(ELB)를 사용하여 방지하도록 전기설비기술기준으로 정하고 있으며, 최근에 기준화된 “과부하검용 누전차단기(RCD)의 설치”가 대중화되어 있다[5]. 이들 RCDs는 누전과 과전류사고를 감지하여 차단하는 성능은 우수하나, 직접적인 전기화재의 위험요소인 단락 및 접촉·접촉불량 사고에 의한 아크나 스파크 현상에 대한 차단기능은 거의 없는 것으로 분석되었다[6, 7]. 이것은 분전반에 적용되는 각종 차단기 및 RCD의 경우 정격차단시간이 30ms (국내, KS C 4613)로 정해져 있어, 더욱 짧은 폭의 레벨로 주기적으로 발생하는 아크나 스파크를 감지하지 못하기 때문이다. 또한 기존 차단기들의 동작메커니즘이 과전류트립 전자(electromagnetic) 방식이나 바이메탈(bimetal) 열동방식 구조에 의해 동작되므로 그 동작 속성과 신뢰성에 문제점을 가진다.

이러한 문제점들을 개선하기위해 본 논문에서는 전기사고 발생 시 순간전압의 순간적인 전압감쇠에 의한 전압 왜형파를 감지하여 차단기를 동작시키는 새로운 전압파형 감지형 아크차단기를 제안한다. 제안한 전압파형 감지형 아크차단기는 내구성이 우수한 반도체 스위칭 소자들을 이용한 제어회로 토폴로지로 설계되어 속응성이 우수하고 고신뢰성의 특징이 주어진다. 또한 제안한 아크차단기는 전기사고 발생 시 전압선로와 접지간의 강제적인 단락회로를 형성시켜[7], 누전사고에 대해 우수한 성능이 있는 기존의 RCD를 누전으로 인식시켜 신속히 RCD를 차단시키는 제어기법이 적용된다. 제안한 아크차단기는 회로구성과 제어방식이 간단하여 소형·경량으로 설계제작이 가능하여 매입형 콘센트나 외부의 멀티 콘센트 내부 또는 옥내의 각종 분전반에 용이하게 장착할 수 있는 장점으로 전기화재 및 전기사고를 예방할 것으로 기대된다.

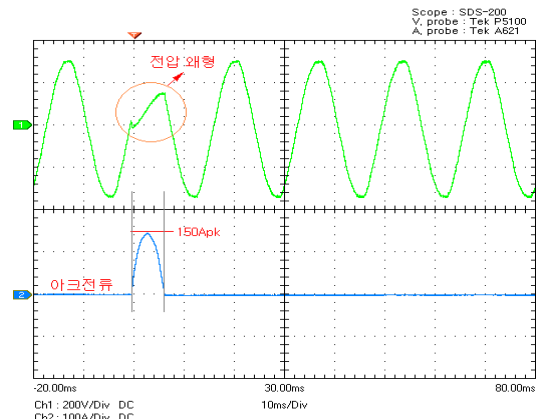
2. 사고전압 왜형파를 이용한 아크차단기

2.1 제안한 아크차단기의 회로구성 및 동작원리

아크사고 발생 시의 전압파형을 분석하기위하여 아크발생 모의실험을 통한 전압파형을 그림 3에 나타낸다. 아크발생 모의실험은 AC 220V 선간에 탄소저항(색저항) 5.8kΩ/0.25W를 순간 단락시켜 저항체의 순간적인 파손에 의해 발생하는 불꽃방전으로 유도하였다.



(a) Case 1 (아크전류 최대치 195A, 아크 폭 8ms)



(b) Case 2 (아크전류 최대치 150A, 아크 폭 6ms)

그림 3 아크사고에 대한 전압파형 분석
Fig. 3 Voltage waveform analyses of electric arc faults

그림 3에서와 같이 순간 단락사고에 의해 아크전류는 최대치 195A, 150A 등의 매우 큰 전류가 흘렀으며, 이 때 순간전압 파형은 전압감쇠를 동반한 왜형파의 형태를 가진다. 이러한 전압파형의 왜곡된 현상은 아크사고 발생 시에 나타나는 일반적인 형태라 할 수 있다. 또한 전기화재는 하나의 불꽃방전(스파크: spark)에서 보다는 연속적인 불꽃방전(트래킹: tracking)에서 발생하는 경우가 대다수로써, 초기 하나의 아크전류가 감지되었을 때 계통을 보호하여 전기장해를 예방하는 제어장치의 필요성이 중요한 것으로 인식된다. 본 논문에서는 이러한 아크사고 발생 시에 나타나는 전압 왜형파를 신속히 감지하여 계통을 차단시키는 고신뢰, 고속응성의 제어장치를 개발하고자 한다.

제안한 전압파형 감지형 아크차단기의 제어회로 구성도를 그림 4에 나타낸다. 제어회로는 속응성과 내구성이 우수한 전력용 반도체 스위칭소자들과 다소의 수동소자들로 구성되어, 제어회로의 신뢰성이 우수하고 회로구성이 간단하여 소형·경량으로 제작되는 특징이 있다. 또한 제안한 아크차단기는 전기사고 발생 시 배전선로와 접지(G) 간에 강제적인 단락회로를 형성시켜, 누전사고에 대해 우수한 성능을 가지는 기 설치된 RCD를 누전으로 인식시켜 신속히 RCD를 차단시키는 제어기법으로 별도의 차단장치가 필요치 않는 장점이 주어진다.

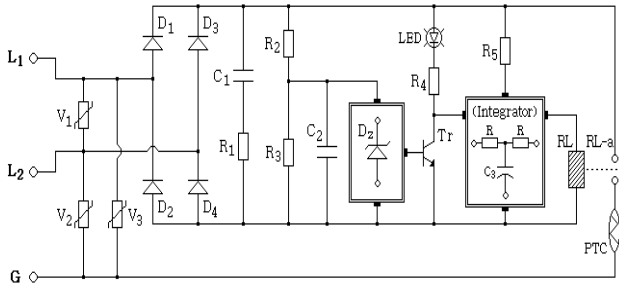


그림 4 제안한 전압파형 감지형 아크차단기 구성도
 Fig. 4 Configuration diagram of proposed voltage waveform sensing type AFCI

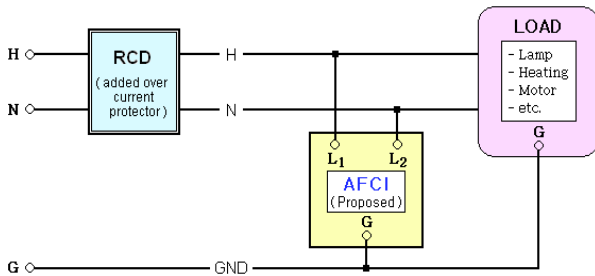


그림 5 제안한 아크차단기의 설치 결선도
 Fig. 5 Installation wiring connection diagram of proposed AFCI

제안한 전압파형 감지형 아크차단기의 제어회로 구성은 그림 4와 같이 전원 서지(surge) 보호용 배리스터(varistor) $V_1 \sim V_3$, 직류전원 공급을 위한 정류용 브릿지 다이오드 $D_1 \sim D_4$, 평활용 커패시터 C_1 , 그리고 리플(ripple) 발생용 저항 R_1 , 분압용 저항 R_2, R_3 , 사고전압의 전압감쇠분 설정용 제너다이오드 D_z , 반도체 릴레이(SSR; solid state relay) RL의 구동용 트랜지스터 T_r , 누설 접지전류 발생을 위한 단락용 접점 RL-a, 그 외 회로정수용 수동소자 등으로 구성된다. 여기서 적분기(integrator)는 적분된 출력전압을 릴레이 SSR에 공급하는 목적이 있으며, 이는 화재의 위험성이 저조한 유도성 부하의 개폐시나 뇌임펄스성 썬더(충격파) 등 주기가 2ms이하의 속류성 전기신호에 대해서 제어장치의 오동작을 방지하기 위해 설계하였다. 또한 전기사고 발생 시 단락회로에 의한 접지전류 상승 억제 및 과열방지를 위해 PTC 서미스터(thermistor)를 사용하였으며, 제어회로의 동작유무를 표시하기 위한 LED를 적용시켰다.

그림 5는 기존의 RCD와 제안한 아크차단기와의 설치 결선도를 나타낸다. 제안한 전압파형 감지형 아크차단기는 배전선로 양단(H, N)과 접지선(G)에 설치되어 전기화재의 주요 요인인 아크사고를 감지하여 전기화재를 감소시키는 역할을 한다.

제안한 전압파형 감지형 아크차단기의 제어회로 동작원리를 살펴보면, 초기상태로 브릿지 다이오드를 통하여 직류전원이 제어시스템에 공급되며, 사고전압의 신속한 감지를 위하여 리플성분이 포함된 직류전원이 공급된다. 정상상태에서는 저항 R_3 의 양단전압이 제너다이오드의 제너전압보다 크게 설정되어 제너다이오드는 도통하고 이에 따른 트랜지스터 T_r 은 턴-온 모드를 가진다. 트랜지스터의 도통에 의해

SSR RL은 무여자 상태로 정상상태를 유지하게 된다.

그러나 순간 단락사고 등 아크사고가 발생할 경우, 입력단 리플전압의 급속한 감쇠에 따른 저항 R_3 의 전압이 제너다이오드 D_z 의 제너전압보다 적게 되어 제너다이오드는 오프(off)로 되고 트랜지스터 T_r 또한 턴-오프된다. 트랜지스터 T_r 의 오프에 의해 SSR RL은 여자되고 RL의 접점 RL-a가 동작하여 배전선로와 접지(G) 간에 강제적인 단락회로를 형성시킨다. 접지전류의 발생에 의해 기존의 RCD로 하여금 누전으로 인식시켜 신속히 RCD를 차단시키는 일련의 동작원리를 가진다. 또한 단락전류의 상승은 PTC 서미스터에 의해 감쇠되어 제어소자들의 소손을 방지하고, 또한 누전전류의 상승에 따른 계통 피해를 예방한다.

여기서 사고전압의 전압감쇠분 설정용으로 사용된 제너다이오드 D_z 의 제너전압 선정은 저압 배전선로 AC 220V, 60Hz에서 전기화재의 위험요소가 높은 단락사고 발생 시 아크 및 스파크 전류에 의한 선간전압의 전압강하가 통상 일반적인 통계에 의거하여 50V 이상인 점과 주위환경 등을 고려하여, 제너전압을 25V~35V로 선정할 수 있다. 이에 따른 저항 R_2 와 R_3 은 커패시터 C_1 의 충전전압에 포함된 평균전압(직류성분)이 AC 220V에 대해 약 198V인 점을 감안하여 R_2 와 R_3 의 비율을 약 4:1로 산정한다.

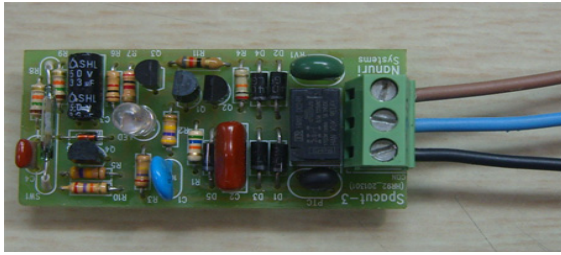
2.2 제안한 아크차단기의 동작특성 분석

제안한 전압파형 감지형 아크차단기에 사용된 주요 소자들의 회로정수를 표 1에 주어진다. 또한 실측 분석에 사용된 RCD는 저압 배전계통에 일반적으로 사용되는 KS C 4613에 준하여 제작된 단상 2선식 110/220V, 정격전류 30A, 정격감도전류 30mA, 정격동작시간 30ms, 정격차단용량 1.5kA의 과부하검용 고감도형 누전차단기를 사용하였다[5].

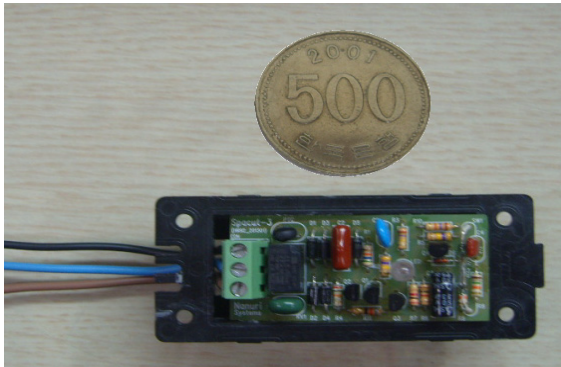
표 1 제안한 아크차단기의 주요 회로정수
 Table 1 Principal circuit parameters of proposed AFCI

다이오드 $D_1 \sim D_4$	$V_{rr}=600V, 50W$	트랜지스터 T_r	NPN, 0.4W
배리스터 $V_1 \sim V_3$	470V, 60W	커패시터 C_3	10 μ F / DC 50V
커패시터 C_1	2.2nF / AC 250V	반도체 릴레이 SSR	24V, 3A
제너다이오드 D_z	30V, 0.5A	PTC서미스터	1.0k Ω , 10W
커패시터 C_2	4.7nF / AC 250V	$R_2 : R_3$	4 : 1

그림 6(a)는 제작한 전압파형 감지형 아크차단기의 PCB 외형도를 나타낸다. 회로구성이 간단하여 소형·경량으로 제작되고 설치의 용이한 장점이 있어, 그림 6(b)와 같이 옥내에 설치된 매입형 콘센트나 주변에 많이 사용하는 멀티 콘센트 등에 직접 연결할 수 있는 구조로 제작이 가능하다. 또한 각종 전기·전자기기 및 통신기기의 내부에 설치하여 각종 전기사고를 예방할 것으로 기대된다. 또한 제안한 아크차단기는 기술적 제어원리가 간단하며 반도체 제어소자들의 고속 고정밀 응답특성을 이용한 구조로 설계되어 신뢰성이 증대된다.



(a) 제안한 아크차단기의 내부 회로도



(b) 내장된 아크차단기 외형도

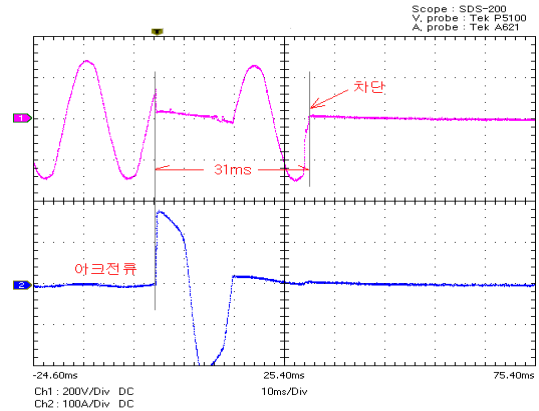
그림 6 제작한 아크차단기의 외형도

Fig. 6 Photograph of manufactured AFCI

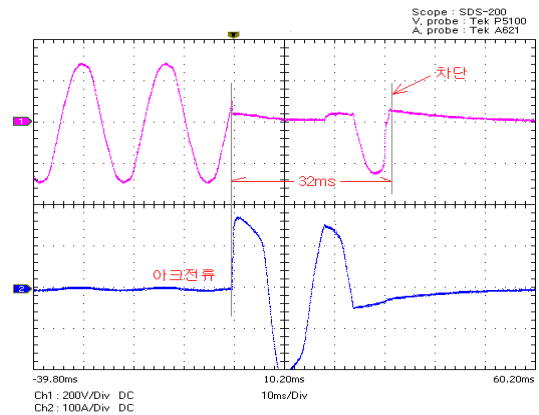
그림 7은 병렬아크 즉, 선간 단락사고에 의한 아크전류 발생에 대한 제안한 아크차단기의 동작성능을 확인하기 위한 분석파형으로써 인위적인 사고발생 모의실험을 통해 측정된 결과이다. 본 실험을 위한 인위적인 병렬아크 사고는 실제 전기화재에 기인되는 아크사고를 고려하여, 저압배전선로(AC 220V) 양단에 탄소저항(5.8kΩ/0.25W)을 연결시켜 저항 소자의 파손에 의한 순간적인 불꽃방전을 이용하였다.

병렬아크 사고에 대한 제안한 아크차단기는 그림 7에서와 같이 아크사고 발생 시에 나타나는 왜곡된 선간전압 파형의 감소된 전압을 감지하여 반도체 스위칭소자들이 동작하고, 릴레이 SSR에 의한 강제적인 단락 접지전류를 발생시켜 기존의 RCD를 차단시키는 제어기법을 가졌다. 그림 7(a)는 아크전류 최대치 약 180A, 아크 폭 16ms의 아크사고에 대한 분석파형이고, 그림 7(b)는 아크전류 최대치 약 175A, 아크 폭 24ms의 아크사고에 대한 분석파형이다. 두 경우 모두 순간 단락사고에 의한 임펄스성 아크전류에 대해 제안한 아크차단기는 약 31~32ms의 차단 동작시간으로 계통을 차단시키는 우수한 동작특성을 보였다.

그림 8은 직렬아크 사고에 대한 제안한 아크차단기의 동작성능을 확인하기 위한 분석파형을 나타낸다. 본 실험을 위한 직렬아크 사고는 1kW의 전열기를 부하단에 연결한 상태에서 배전선로 한 가닥을 단선시켜 단선된 양단에 사각형 동판전극을 각각 접속시킨 후 동판전극을 1mm 공극을 두고 그 사이에 흑연가루를 뿌려 실시하였다. 이는 직렬아크 사고에 기인한 접촉불량사고에 대해서도 그 특성분석을 검증하기 위해 설계하였다. 그림 9는 제안한 아크차단기의 직렬아크 사고에 대한 동작특성을 검증하기 위한 실험장치를 나타낸다.



(a) 선간전압과 아크전류 (case 1)

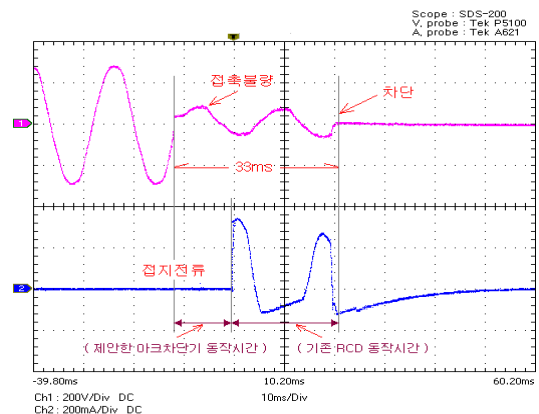


(b) 선간전압과 아크전류 (case 2)

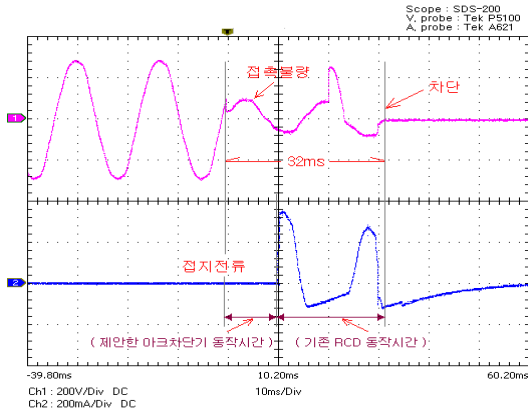
그림 7 동작성능 분석파형 (병렬아크 사고)

Fig. 7 Operation performance waveforms (Parallel arc fault)

그림 8의 직렬아크 사고 발생 시의 선간전압과 접지전류에 대한 특성파형을 분석해 보면, 제안한 아크차단기는 아크 사고 발생에서 사고전압을 감지하여 단락용 릴레이 SSR에 의한 강제적인 접지전류를 발생시킨 경우으로써, 그림 8(a)는 접지전류 최대치 약 360mA를 발생하여 32ms의 차단동작시간으로 기존의 RCD를 동작시켰으며 그림 8(b)는 접지전류 최대치 약 340mA를 발생하여 33ms의 차단동작시간으로 기존의 RCD를 동작시키는 양호한 동작특성을 보였다.



(a) 선간전압과 접지전류 (case 1)



(b) 선간전압과 접지전류 (case 2)

그림 8 동작성능 분석파형 (직렬아크 사고)

Fig. 8 Operation performance waveforms (Series arc fault)

이는 기존 RCD의 동작감도전류가 30mA인 점을 감안할 때 제안한 아크차단기는 더욱 큰 접지전류를 흘려 보내어 차단기를 신속히 차단시키는 특징을 가진다. 여러 차례의 사고발생 시뮬레이터에 의한 동작특성 분석을 통하여 제안한 전압파형 감지형 아크차단기는 우수한 동작성능을 보였다. 그 결과 전기화재의 주요 요인인 아크사고에 대해서 기존의 차단기로는 차단보호 능력이 불가능한 문제점을 제안한 아크차단기의 개발로 인하여 전기화재를 감소시키고 전력계통을 보호하는데 효과가 클 것으로 기대된다.

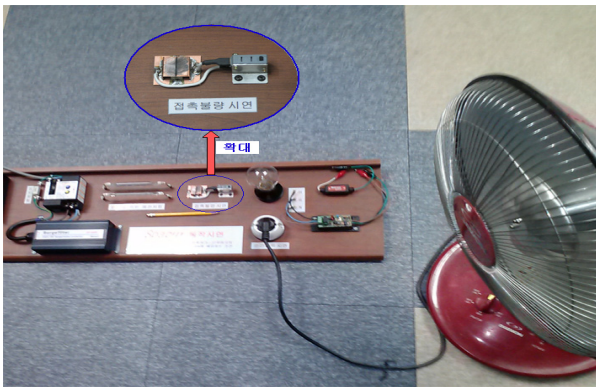


그림 9 직렬아크 사고 실험장치

Fig. 9 Experimental set for series arc fault

3. 결론

본 논문에서는 저압 배전계통의 전기화재의 주요 원인이 되는 단락 및 접촉·접촉불량 사고에 의한 아크 및 스파크 발생에 대해 기존의 차단기로는 차단이 불가능한 문제점을 해결하기 위해, 전기사고 발생 시 선간전압의 순간적인 전압 왜형파를 감지하여 차단기를 동작시키는 새로운 전압파형 감지형 아크차단기에 대해 제안하였다. 제안한 전압파형 감지형 아크차단기는 고성능 고정밀의 반도체 스위칭 소자들을 이용한 제어회로 토폴로지로 설계되어 속응성이 우수하고 고신뢰성의 특징이 주어졌다. 또한 제안한 제어장치는

전기사고 발생 시 전압선로와 접지간의 강제적인 단락회로를 형성시켜, 누전사고에 대해 우수한 성능이 있는 기존의 RCD를 누전으로 인식시켜 신속히 RCD를 차단시키는 제어 기법이 적용되었다. 제안한 아크차단기는 회로구성과 제어 방식이 간단하여 소형·경량으로 설계제작이 가능하며, 매입형 콘센트나 외부의 멀티 콘센트 또는 각종 전기·전자기기 및 통신기기 등에 용이하게 장착할 수 있는 장점으로 전기화재 및 전기사고를 예방할 것으로 기대된다. 제안한 아크차단기는 다양한 사고발생 시뮬레이터에 의한 동작특성 분석을 통해 그 우수성과 실용성이 입증되었다.

References

- [1] NEMA, "National Fire Statistics Analyses", 2011.
- [2] KESCO, "Electric Disaster Statistics Analyses", 2011.
- [3] D. K. Kwak, "Development of RCD Auxiliary Trip Device by using High Precision Current Sensor", Trans. of KIEE, Vol. 58, No. 8, pp. 1532-1537, 2009.
- [4] S. I. Lee, J. G. Yoo, J. C. Park, and G. H. Choe, "Design and Development of Distorted Source Device for Circuit Breakers Failure Analysis", Trans. of KIPE, Vol. 11, No. 5, pp. 480-488, 2006.
- [5] LSIS co., and Cheil Electric co., "Technical Data of ELB and MCCB", 2010.
- [6] K. W. Kang, M. O. Yoon, S. H. Gu, and Y. J. Song, "A Study on the Reliability Improvement Plan on Electric Leakage & Ground Fault of Low-voltage Electrical Line", Journal of Korea Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 25, No. 6, pp. 136-145, 2011.
- [7] D. K. Kwak, J. H. Kim, and B. S. Lee, "Development of Prevention Apparatus for Short-Circuit Faults Using the Line Voltage Drop of Neutral Wire", Trans. of KIEE, Vol. 61, No. 12, pp. 1953-1958, 2012.

저 자 소 개



곽 동걸 (郭東杰)

1964년 11월 11일생, 1990년 경남대 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1991년 한국전기연구소 기술원, 1998~2007년 한중대 전기전자공학과 조교수, 2007~현재 강원대 방재전문대학원 부교수.

Tel : 033-570-6823

E-mail : dkkwak@kangwon.ac.kr