사고전압 감지형 아크차단 제어회로 개발

곽동걸 · 변재기* · 이봉섭**†

강원대학교 방재전문대학원, *고려대학교 기계공학부, **강원대학교 제어계측공학과

Development of Arc Fault Interruption Control Circuit of Fault Voltage Sensing Type

Dong-Kurl Kwak · Jae-Ki Byun* · Bong-Seob Lee**†

Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon Univ.

*Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

**Dept. of Control Instrumentation Engineering, Kangwon Univ.

(Received November 8, 2012; Revised March 25, 2013; Accepted April 5, 2013)

요 약

본 논문은 사고전압 감지형의 아크차단 제어회로에 대한 연구로써, 전기사고 발생 시 순간전압의 순간적인 전압감쇠를 감지하여 기존 차단기를 동작시키는 전압감지형 전기화재 예방장치이다. 현재 저압배전 계통에 사용중인 누전차단기, 배선용차단기 그리고 RCD 등은 전기화재의 주요 요인인 아크사고에 대해 보호능력이 없는 것으로 분석된다. 본 논문에서는 이러한 문제점들을 개선하기위하여 이전의 전류감지에 의한 아크사고 차단방식이 아닌 사고발생 시 전압파형의 왜곡을 이용한 새로운 전압감지형 아크차단 제어회로를 개발하여 전기화재를 예방하고자 한다. 제안한 아크차단 제어회로는 소형 · 경량으로 제작되는 장점과 다양한 동작분석을 통하여 그 실용성을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper studies on an arc fault interruption control circuit (AFICC) of fault voltage sensing type. The proposed voltage sensing type AFICC (VST_AFICC) is an electrical fire prevention apparatus that operates the existing circuit breaker with sensing the instantaneous voltage drop of line voltage when occurs electrical faults. The existing Earth Leakage Circuit Breaker (ELB), Molded_case Circuit Breaker (MCCB), and Residual Current Protective Devices (RCDs) used in low voltage distributing system don't have protective capability from electric arc faults to be a major factor of electrical fire. In this paper to improve such problems, a new VST_AFICC using the distortion of voltage waveform when occurs electrical faults is proposed to prevent electrical fire. There is characteristic that the control method of proposed apparatus is different from previous current sensing type. The proposed AFICC has merit that is manufactured by small size and light weight. The practicality of a new VST_AFICC is also verified through various operation analysis.

Keywords : RCDs, Electrical faults, Voltage sensing type, Electric arc or spark, KSC4613

1. 서 론

2011년도 전기발화 요인별 내역을 살펴보면, 미확인 단락을 포함한 단락사고가 71.5 %로 가장 많았고 다음으로 과부하 · 과전류 12.6 %, 누전 · 지락 5.1 %, 반단선 1.7 % 등으로 분석되었다^(1,2). 특히 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). 이러한 전기화재를 예방하여 전체 화재건수를 줄이는 것이 화재로부터 국민을 보호하는 중요한 정책수단이 됨을 알 수 있다. 미국

방화협회(NFPA)의 발표에 의하면 전기화재의 약 80 %가 아크로 인해 발생되었다고 보고하고 있으며, 이에 미국의 전기안전규정(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 아크 사고에 대한 정부나 소방 관련기관의 관련 법규나 규정이 없어 사용자 스스로 전기화재 예방을 위해 노력해야 하는 실정으로 아쉬운 점이 있다. 그리고 국내의 전기화재와 관련한 소방관련 규정이나 소방산업은 자동화재탐지설비나 화재감지설비, 화재진압

† Corresponding Author, E-Mail: mirine@kangwon.ac.kr
TEL: +82-33-570-6385, FAX: +82-33-570-6389

용 스프링클러, 가스감지설비 등 피상적인 대책 마련에만 국한된 실정으로 전기화재를 사전에 방지하기 위한 장치 개발 등 근본적인 해결 방안에는 매우 미흡한 실정이다.

가정이나 산업현장 등의 저압 배전계통에 있어, 단락사고와 누전사고를 방지하기 위해 배선용차단기(MCCB) 및 누전차단기(ELB)를 사용하여 방지하도록 전기설비기술기준으로 정하고 있으며⁽⁵⁾, 최근에는 “과부하검용 누전차단기(RCD)”가 대중화되어 사용되고 있다. 그러나 이러한 MCCB, ELB, 그리고 RCD들은 누전사고나 과부하사고에는 우수한 성능을 가지나, 순간단락사고나 접촉·접속불량사고 등 전기화재와 밀접한 아크발생 사고에 대해서는 거의 보호능력이 없는 것으로 분석된다⁽⁶⁻⁹⁾. 이는 순간단락사고나 접촉·접속불량사고 등에 의한 아크전류 파형을 분석해 보면, 아크의 폭이 약 5~10 ms, 진폭은 약 50~250 A로 추정되고 있어 이는 국내 규정으로 정해진 차단 동작시간으로는 사고전류를 감지하기는 불가능한 이유이다.

최근 이러한 기존 차단기들의 문제점들을 해결하기 위하여 아크사고 발생 시 아크전류를 감지하여 계통을 보호하는 전류감지형 아크차단기들이 개발되어 보급되고 있다⁽¹⁰⁾. 그러나 분전반에 사용되는 전류감지형 아크차단기들은 부하측 사고 시 선로가 긴 경우에는 선로저항의 증대와 더불어 사고전류의 감소로 인해 차단능력이 저하되는 문제점이 있으며, 그리고 각종 전기, 전자통신기기 및 제품들 내에 사용된 전원 입력부 커패시터, 서지(surge) 흡수용 배리스터 등에 의해 아크전류가 흡수되어 사고전류를 감지하지 못하는 문제점들이 주어진다.

본 논문에서는 이러한 기존 차단기와 전류감지형 아크차단기의 문제점들을 해결하고 전기화재를 폭 넓게 방지하기 위하여, 전기사고 발생 시 순간전압의 순간적인 전압감쇠를 감지하는 전압감지형 아크차단 제어회로(VST_AFICC)를 개발하여 제안하고자 한다.

제안한 전압감지형 아크차단 제어회로는 이전의 전류감지에 의한 아크사고 차단방식이 아닌 사고발생 시 왜곡된 전압파형을 신속히 감지하여 계통을 보호하는 새로운 전압감지형 아크차단 방식이 적용되는 특징이 있다. 또한 제안한 VST_AFICC는 소수의 수동소자와 고정밀의 반도체 소자들을 이용한 제어회로 토폴로지로 설계되어 속응성이 우수하고 고신뢰성의 특징이 주어진다. 특히 제어회로 내에 사고전압 감지용으로 사용한 센서는 반도체 프로그램형 트랜지스터인 PUT(programmable unijunction transistor)를 적용하여 제어회로의 안정성과 신뢰성이 확보된다.

2. 사고전압 감지형 아크차단 제어회로

2.1 전압감지형 아크차단 제어회로의 회로구성 및 동작원리

저압 배전계통의 아크사고에 의한 전기화재를 예방하기 위한 제안한 전압감지형 아크차단 제어회로를 Figure 1에

Figure 1. Proposed voltage sensing type AFICC.

나타낸다. 제안한 전압감지형 아크차단 제어회로는 순간단락사고나 접촉·접속불량사고 등에 의한 아크발생 시 순간전압의 왜곡된 전압파형을 감지하는 전압센싱 회로부와 사고 감지 후 기존 차단기를 신속히 동작시키기 위한 강제적인 누전전류 발생부로 구성된다. 누전전류 발생부는 누전사고에 대해 우수한 동작특성을 가지는 기존 RCD를 최대한 활용하기 위한 것으로, 제안한 아크차단기에 별도의 차단장치를 설치할 필요가 없는 장점이 주어진다. 또한 제안한 제어회로의 회로구성에는 아크사고 발생 시 왜곡된 전압파형의 순간적인 전압감쇠를 감지하기 위하여 고정밀의 프로그램형 트랜지스터 PUT가 사용된 특징이 있다.

제안한 전압감지형 아크차단 제어회로의 구성은 Figure 1과 같이 직류전원 공급을 위한 정류용 브릿지 다이오드 $D_1 \sim D_4$, 평활용 커패시터 C_1 , 전원측 서지(surge)발생에 대한 제어회로의 보호를 위한 배리스터(varistor) V_1 , 분압용 저항 R_1 , R_2 , 그리고 사고전압 감지용 센서인 프로그램형 트랜지스터 PUT, 사고전압의 전압감쇠분 설정을 위한 제너다이오드 D_z , 누설 접지전류 발생을 위한 단락용 스위칭 소자 SCR 및 SCR 구동용 적분기 R_4 , C_4 , 그 외 회로 정수용 수동소자와 반도체 제어소자 등으로 구성된다. 또한 전기사고 발생에 따른 제어회로의 동작유무를 표시하기 위한 LED와 아크사고 발생 시 배전선로와 접지선(G) 간의 강제적인 단락회로 형성에 의한 단락전류와 선로의 과열을 감소시키기 위한 PTC 서미스터(thermistor)를 적용하였다.

제안한 전압감지형 아크차단 제어회로 동작원리를 살펴보면, 초기상태로 브릿지 다이오드를 통하여 직류전원이 제어시스템에 공급되고 있으며 커패시터 C_2 와 C_3 은 저항 R_2 의 분압에 의한 제너다이오드 D_z 의 제너전압 V_z (약 35 V)로 충전되어 있다.

또한 프로그램형 트랜지스터 PUT는 게이트(gate) 전압(C_2 의 전압)이 아노드(anode) 전압(C_3 의 전압)보다 낮을 경우 아노드와 캐소드(cathode)가 도통(턴-온)되는 반도체 스위칭 소자이므로, 계통이 정상상태인 경우는 게이트 전압과 아노드 전압은 다이오드 D_5 에 의해 전위차가 발생하지 않으므로 PUT는 턴-오프를 유지한다. PUT의 턴-오프에 의해 SCR 또한 턴-오프 상태로써 제어회로는 대기상태로 지속된다.

그러나 단락사고 등 전기사고가 발생할 경우, 순간전압의 순간적인 전압감쇠(감쇠량, 약 50 V 이상)에 의해 커패시터 C_2 의 전압은 제너다이오드의 제너전압(약 35 V) 이하로 강하하게 되고, PUT의 아노드 전압(C_3 의 충전전압, 약 35 V)이 게이트 전압(C_2 의 전압)보다 크게 되므로 PUT가 턴-온된다. PUT의 턴-온에 의해 SCR이 턴-온되고 배전선로와 접지(G)간에 강제적인 단락회로가 형성되어, 기존의 RCD로 하여금 누전으로 인식시켜 신속히 RCD를 차단시키는 일련의 동작원리를 가진다. 또한 단락전류의 상승은 PTC 서미스터에 의해 감쇠되므로 제어소자들의 소손을 방지하게 된다.

상기의 결과로부터 전기사고로부터 계통을 보호하여 기 설치된 차단기의 오동작에 의한 전기화재 및 전기재해의 문제점을 해결시킨다.

Figure 1에서 제너다이오드 D_z 의 제너전압 선정은 저압 배전선로 AC220 V, 60 Hz에서 전기화재의 위험요소가 가장 큰 단락사고 발생 시 아크 및 스파크 전류에 의한 순간전압의 전압감쇠량이 통상 일반적인 통계에 의거하여 50 V 이상인 점과 주위환경 등을 고려하여, 제너전압을 30 V~50 V로 선정할 수 있다. 이에 따른 저항 R_1 과 R_2 는 커패시터 C_1 의 충전전압에 포함된 평균전압(직류성분)이 AC220 V에 대해 약 198 V인 점을 감안하여 R_1 과 R_2 의 비율을 약 3 : 1로 산정한다.

2.2 전압감지형 아크차단 제어회로의 동작특성 분석

제안한 전압감지형 아크차단 제어회로에 사용된 주요 소자들의 회로정수를 Table 1에 주어진다. 또한 본 실험에 사용된 기존의 RCD는 KSC4613에 의거하여 설계된 과부하겸용 고감도형 누전차단기를 사용하였다⁽¹¹⁾. 사용된 RCD의 주요 사양을 Table 2에 나타낸다.

제안한 전압감지형 아크차단 제어회로의 PCB 외형도를 Figure 2(a)에 나타낸다. 제안한 아크차단 제어회로의 회로 구성은 Figure 2(a)와 같이 소형·경량으로 제작이 가능하여 옥내에 설치된 매입형 콘센트나 구내에 사용하는 멀티

(a) Photograph of proposed VST_AFICC

(b) VST_AFICC contained in multi-outlet

Figure 2. Photograph of the manufactured VST_AFICC.

콘센트 등에 장착되는 특징으로 아크사고에 의한 전기화재를 예방하는데 기여도가 클 것으로 고려된다. Figure 2(b)는 우리 주변에 많이 사용되는 멀티 콘센트 내부에 제안한 아크차단 제어회로를 내장시킨 외형도를 보인다.

Figure 3은 제안한 전압감지형 아크차단 제어회로의 동작특성을 분석하기 위한 실험장치를 나타낸다.

Figure 4와 Figure 5는 순간단락사고와 접촉불량사고에 의한 아크전류 발생에 대한 제안한 전압감지형 아크차단 제어회로의 동작성능을 확인하기 위한 분석파형으로써 인

Table 1. Circuit Parameters of Principal Devices

Power source	AC220V/60 Hz	Capacitor C_2	4.7 nF/AC250 V
Varistor V_1	470 V, 60 W	PUT	$V_{AK}=50$ V, 0.5 W
Diode $D_1 \sim D_5$	1A, $V_{BR}=600$ V	SCR	0.8 A, $V_{BR}=600$ V
Capacitor C_1	2.2 nF/AC250V	Capacitor C_3, C_4	10 μ F/50 V, Electrolyte
Zener diode D_z	$V_z=35$ V, 0.5 A	PTC_thermistor	1.5 k Ω , 10 W

Table 2. Principal Specification of Conventional RCD

Rated voltage [V]	110/220	Rated breaking current [kA]	1.5/2.5
Rated current [A]	15/30	Rated sensitivity current [mA]	15/30
Operating time [sec]	0.03	Trip method	Electromagnetic/thermal method
Protective ability	Earth leakage and overload	Acquisition standard	KSC4613

Figure 3. Experiment set for operation performance analysis of proposed VST_AFICC.

(a) Line voltage and arc current (case 1)

(b) Line voltage and arc current (case 2)

Figure 4. Operation performance waveforms of proposed VST_AFICC (I).

위적인 사고발생 시뮬레이터를 통해 측정한 결과이다.

Figure 4는 순간단락에 의한 아크사고 발생 시의 선간전

[Line voltage and ground current]

Figure 5. Operation performance waveforms of proposed VST_AFICC (II).

압과 아크전류에 대한 분석파형을 나타낸다. 본 실험을 위한 인위적인 순간단락사고 시뮬레이터는 실제 전기화재에 기인되는 아크사고를 고려하여, 저압배전선로(AC220 V) 양단에 탄소저항($5.8 \text{ k}\Omega/0.25 \text{ W}$)을 연결시켜 저항 소자의 파손에 의한 순간적인 불꽃방전을 이용하였다.

제안한 아크차단 제어회로는 Figure 4에서와 같이 아크 사고 발생 시에 나타나는 왜곡된 선간전압 파형의 감쇠된 전압을 프로그램형 트랜지스터 PUT에 의해 센싱되고, 기존에 설치된 RCD를 동작시키기 위하여 배전선로와 접지 간의 단락용 스위칭 소자 SCR의 턴-온으로 인해 강제적으로 누전전류를 발생시키는 제어기법을 가졌다.

Figure 4(a)는 아크전류 최대치 약 195 A, 아크 폭 6 ms의 아크사고에 대한 분석파형이고, Figure 4(b)는 아크전류 최대치 약 150 A, 아크 폭 7 ms의 아크사고에 대한 분석파형이다. 두 경우 모두 순간단락사고에 의한 임펄스성 아크 전류에 대해 제안한 아크차단 보호장치는 약 23~37 ms의 차단동작시간으로 계통을 차단시키는 우수한 동작특성을 보였다.

제안한 아크차단 제어회로의 접촉불량사고에 대한 동작 성능을 분석하기 위하여, Figure 5에 접촉불량사고 발생 시의 선간전압과 접지전류에 대한 특성파형을 나타낸다. 본 실험을 위한 접촉불량사고 시뮬레이터는 부하측 전력선로 양단에 사각형 동판전극 두 개를 1 mm 공극을 두고 그 사이에 흑연가루를 뿌려 실시하였다.

제안한 아크차단 제어회로는 접촉불량사고 발생 시에 사고전압을 감지하여 단락용 스위칭 소자 SCR에 의한 강제적인 누전전류를 발생시켜 약 700 mA의 접지전류가 발생한 경우로써, 약 45 ms의 차단동작시간으로 기존의 RCD를 동작시키는 양호한 동작특성을 보였다.

이는 기존 RCD의 동작감도전류가 30 mA인 점을 감안

할 때 제안한 아크차단 제어장치는 더욱 큰 접지전류를 흘러 보내어 차단기를 신속히 차단시키는 특징을 보인다.

이상과 같이 전기화재의 주요 요인인 아크사고에 대해서 기존의 차단기로는 차단보호 능력이 불가능한 문제점을 제안한 전압감지형 아크차단 장치의 개발로 인하여 전기화재를 감소시키고 전력계통을 보호하는 신뢰성과 실용성을 보였다.

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 차단기로는 차단보호 능력이 불가능한 아크사고에 대해 우수한 동작특성을 가지는 사고전압 감지형의 아크차단 제어회로를 제안하였다. 제안한 아크차단 제어회로는 전기사고 발생 시에 왜곡된 선간전압의 순간적인 전압감쇠를 감지하여 기존 차단기를 동작시키는 새로운 제어기법으로 설계되었다. 또한 제안한 제어회로의 회로구성은 소수의 수동소자와 고정밀의 반도체 소자를 이용한 제어회로 토폴로지로 설계되어 속응성이 우수하고 신뢰성이 높은 특징이 주어졌다. 특히 아크사고 발생 시 사고전압 감지용으로 사용된 PUT는 빠른 응답속도와 내구성이 우수하여 제안한 보호장치의 신뢰성을 높였다. 그리고 제안한 아크차단 제어회로는 회로구성이 간단하여 소형·경량으로 설계제작이 가능한 장점으로, 매입형 콘센트나 멀티 콘센트 등에 내장되어 각종 전기화재를 예방하는데 기여도가 클 것으로 고려된다.

참고문헌

1. NEMA, "2011 National Fire Statistics Analyses" (2011).

2. KESCO, "2011 Electric Disaster Statistics Analyses" (2011).

3. R. N. Anderson, "What Came First? The Arc Bead or the Fire?", EC&M100, 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. Technical Regulation in Electricity Business Act, and KSC 4613 (2011).

6. 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).

7. 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).

8. 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).

9. 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", The Trans. of KIEE, Vol. 61, No. 12, pp. 1953-1958 (2012).

10. Hetko Inc., "Earth Leakage Circuit Breaker with Arc Fault Protection" (2010).

11. LSIS co., "Technical Data of ELB and MCCB" (2010).