

## 누전차단기의 트립 동작시간 분석을 통한 전류 · 시간적(積) 개선

(Improvement of Circuit-Time Product through Analysis of Operating Time of Earth Leakage Circuit-Breakers)

김주철\* · 이상중\*\*

(Ju-Chul Kim · Sang-Joong Lee)

### Abstract

The earth leakage circuit-breakers installed to protect the human body against electrical shock have conventionally had a sensitivity current of 30 mA and an operating time of 30 ms or less. No reviews are found, however, on the operating time of the current conducting through the human body due to the electrical shock or ground fault. This paper measures the trip-operating time against the earth leakage under the condition of increased current as well as under the condition of rated sensitivity current of the earth leakage circuit-breakers. Further measurement with a prototype model showed an improved operating time of 16 ms or less under the condition of rated sensitivity current. It is expected that development of circuit-breakers with higher safety is possible if the performance of the electronic circuit can be improved.

Key Words : Rated Sensitivity Current, Trip Operating Time, Electrical Shock, Ventricular Fibrillation

### 1. 서 론

경제발전과 더불어 전기에너지의 사용량이 급속도로 증가하고 있지만 이에 따른 전기감전 사고의 증가

- 
- \* 주저자 : 상도전기통신(주) 부설연구소 소장
  - \*\* 교신저자 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수
  - \* Main author : Sangdo E&GC Co., Ltd, Corporate R&D Institutes, Chief Technology Officer
  - \*\* Corresponding author : Seoul National University of Science and Technology, Department of Electrical Engineering, Professor, Ph.D, PE
- Tel : 02-990-5539, Fax : 02-906-0228  
E-mail : sjlee@seoultech.ac.kr  
접수일자 : 2012년 9월 18일  
1차심사 : 2012년 9월 20일, 2차심사 : 2012년 10월 15일  
심사완료 : 2012년 10월 24일

와 정전 또는 전기화재로 인한 물적 피해는 감소되지 않고 있다. 한국전기안전공사 전기재해 통계자료에 의하면 2010년 전기감전 사고로 인한 감전사상자 수가 사망 46명과 부상 535명으로 집계되었다. 이중 총 전부 직접접촉에 의한 감전사고가 298명(51.3%)으로 전체사고의 절반에 가까운 사고형태를 나타내고 있다. 전기감전 사고를 전압별로 구분하여 검토 시, 고압보다는 저압에서 가장 많은 사고가 발생되며 사망자 또한 많은 것으로 나타나고 있다[1]. 이러한 사고 중 인체감전으로 인한 전기사고는 감전전류의 크기와 시간에 따라 인체에 미치는 생리학적 영향이 다르게 나타난다. 본 논문은 제조사별 30AF(Ampere Frame) 누전차단기의 누전동작감지전류와 증가되는 누설전류조

건하에서의 트립(Trip) 동작시간을 측정하였다. 또한 이를 토대로 인체감전이나 누전사고 시, 누전차단기의 동작시간을 빠르게 하기위한 시제품을 제작 후 동작시간을 측정하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 누전차단기의 동작 및 회로도

누전차단기는 ZCT(Zero Current Transformer)에서 검출된 누설전류량이 IC에 입력되면 IC내부의 차동증폭회로에 의해 누전검출신호가 증폭된다. 증폭된 신호는 IC내부의 기준전위와 비교하여 누전여부를 판단하고 이를 출력하여 Latch회로가 동작한다. 이때 Latch의 출력레벨을 판단(Δt), 확인 후 SCR-Gate에 Trigger 신호가 전달되고 SCR은 즉시 Turn-on되어 트립 코일에 전류가 흐른다. 코일에 흐르는 전류에 의해 발생된 자력은 누전차단기 내부의 트립바(Trip-bar)를 구동함으로써 자동으로 차단동작을 하게 된다. 그림 1은 누전차단기의 전자회로도이다.

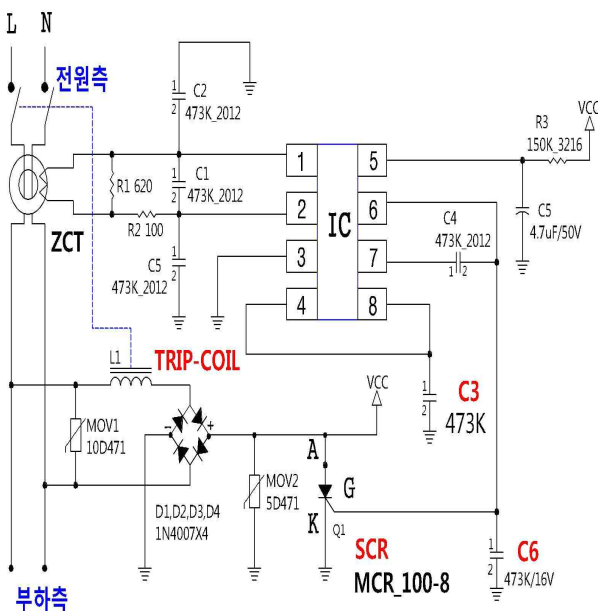


그림 1. 누전차단기의 전자회로도  
Fig. 1. Circuit of earth leakage CB

### 2.2 심실세동 전류

인체통과전류가 수십 mA일 경우 심근이 경련을 일으켜 사망할 수 있다. 다이젤(Dalziel) 식에서 체중 50kg인 남자의 경우 심실세동(Ventricular Fibrillation) 전류는 통과시간의 제곱근에 반비례하며 식 1과 같다[2].

$$I = \frac{165}{\sqrt{T}} \text{ mA} \quad (1)$$

이 식의 적용범위는 8ms~5s의 범위이고 5초 통전한 경우의 심실세동 전류한계치는 52mA를 나타낸다. 또한 5초 이상 연속통전의 경우는 확인되고 있지 않다[2]. 쾨펜(Koeppen)에 의한 것은 전류·시간적(積)을 50mA·s로 일정하게 하고 1초를 초과하는 영역에서도 50mA로 하고 있다. 단 50mA를 연속 통전한 경우의 영향에 대한 보고서는 없다. 서유럽에서는 쾨펜의 한계치 50mA·s에 대해 1.67의 안전율을 고려한 30mA·s를 실용상의 허용전류·시간적(積)으로 보호대책을 운영하고 있다[2]. 국내의 경우 안전율을 고려한 30mA·s를 심실세동이 일어나지 않는 허용 값으로 하여 전원자동차단기에 의한 보호수단(누전차단기 등)의 근거로 제시하였다[3]. 누전차단기가 설치된 장소에서 인체가 물에 젖을 수 있는 조건(500Ω)으로 충전부 접촉 시 인체에 유입되는 전류의 크기는 아래의 식 2와 같고 전류·시간적(積)은 식 3 및 식 4와 같이 30mA·s를 초과하지 않는다.

$$I = \frac{220 \text{ V}}{500 \Omega} = 440 \text{ mA} \quad (2)$$

$$440 \text{ mA} \times 0.03 \text{ s} = 13.2 \text{ mA} \cdot \text{s} \quad (3)$$

$$13.2 \text{ mA} \cdot \text{s} < 30 \text{ mA} \cdot \text{s} \quad (4)$$

인체감전 조건에서 누전차단기의 최대동작 시간은 일반적으로 20ms를 초과하여 동작함으로써 한주기 반에 해당되는 시간만큼 인체에 전류가 통과되어 위험

이 증가된다. 따라서 동작시간을 빠르게 해서 인체에 유입되는 전류량을 줄이면 감전의 위험성을 낮출 수 있다.

### 2.3 누전차단기의 동작시간 시험방법

누전차단기의 동작시간을 측정하기 위해 누전차단기 동작시험 검사장비(Earth Leakage Tester)와 시료가 사용되었다. 시험시료는 30A, 2.5kA 제품으로서 정격감도전류는 30mA이고 동작시간은 0.03초 이내의 제품으로 KS C 4613(2002) 표준의 제품을 사용하여 측정하였다[4]. 각 제조사별 시험시료 3대로 누전동작감지전류를 측정된 후 전류 값을 조정하면서 테스트버튼을 눌러 각각의 측정값을 기록하였다. 일반적으로 사용되는 누전차단기 동작시험 검사장비와 오실로스코프(Oscilloscopes)에서 측정되는 동작시간의 차이는 최대 0.4ms가 발생되었다. 그림 2는 누전차단기의 동작시험을 나타낸 개략도이다.

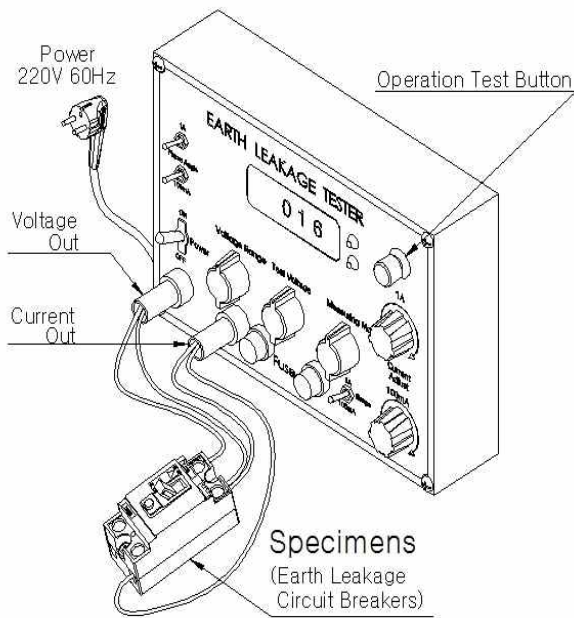


그림 2. 누전차단기 동작시간 측정  
Fig. 2. Operating time measurement of earth leakage CB

### 2.4 누전차단기의 동작시간 결과 및 분석

KS C 4613 표준 및 전기용품안전기준에 따른 누전차단기의 동작시간과 증가되는 전류조건을 기준으로 동작시간에 대한 시험을 진행하였다. 각각의 시료에 동작시간 최대치를 측정하였고 30회 시험동작 중 가장 동작시간이 긴 데이터를 표기하였다. 표 1은 제조사별 시험전류에 의한 누전차단기의 동작시간을 측정 한 자료이다.

표 1. 시험전류에 의한 누전차단기의 동작시간  
Table 1. Operating time of earth leakage CB by test current

제조사	시료	누전 동작 감지 전류 (mA)	누전동작 시험전류(mA)						
			30	60	90	120	150	180	440
			동작시간(ms)						
A	#1	23.2	19	17	16	16	17	16	16
	#2	23.5	20	18	17	16	16	17	16
	#3	23.7	20	18	17	17	16	16	16
B	#1	22.5	20	17	17	16	16	17	16
	#2	25.2	21	17	17	17	17	17	17
	#3	22.7	20	17	17	17	16	16	16
C	#1	23.5	19	17	17	17	16	16	16
	#2	23.4	18	17	16	17	17	16	16
	#3	24.2	21	18	17	17	16	16	16
D	#1	23.2	21	18	17	19	17	17	17
	#2	24.0	21	19	17	17	18	17	17
	#3	24.0	21	18	17	18	18	18	17
E	#1	21.6	25	23	22	23	23	23	23
	#2	22.5	26	23	23	23	23	23	23
	#3	21.1	21	19	18	17	17	17	16
$\bar{X}$	-	23.22	20.87	18.40	17.67	17.80	17.53	17.47	17.20

시험결과 제조사별 누전동작 감지전류는 21.1~25.2mA에서 동작을 시작(감지구간)하였고 동일제품의 최소 및 최대감지전류는 기준전위에서 동작을 시작하므로 측정값이 일정하다. 정격감도전류 30mA 조건에서의 동작시간은 18~26ms사이에 동작하였다. 또한 동작시간은 시험전류의 증가에 따라 감소하였고 210~440mA까지는 누전차단기의 동작시간이 일정하게 측정되었다.

### 2.5 시제품 누전차단기의 동작시간 결과 및 분석

인체감전시 발생하는 위해를 최소화하기 위하여 전류 · 시간 적(積)을 감소시킬 필요가 있다. 또한 인체 및 주변 환경조건에 따라 인체의 저항값도 변한다는 점을 고려해야 한다. 따라서 누전차단기의 트립 동작시간을 빠르게 하기 위해 자체지연시간(IC 내부)을 제외하고 즉시 Turn-on되어 동작할 수 있도록 콘덴서 용량을 변경하였다. 일반적으로 사용되는 IC 내부의 전위(구동시)는 12V이고, 이때 흐르는 전류가 400 $\mu$ A이며 473K를 적용한 출력지연시간(그림 1의 C3)은 식 5와 같다.

$$t = \frac{CV}{I} = \frac{0.047 \times 10^{-6} \times 12}{400 \times 10^{-6}} = 1.41ms \quad (5)$$

또한 IC에서 Trigger 출력신호 시 전압은 16V이고 전류는 300 $\mu$ A이다. 지연시간(그림 1의 C6)을 수식으로 정리하면 식 6과 같다.

$$t = \frac{0.047 \times 10^{-6} \times 16}{300 \times 10^{-6}} = 2.5ms \quad (6)$$

IC의 출력에 따른 1차 지연시간과 SCR 동작이전의 2차 지연시간을 더할 경우 약 3.8~4ms가 지연된다. 따라서 이러한 지연시간을 감소시키기 위해 콘덴서 용량을 103K로 변경한 경우 식 7 및 식 8의 결과를 얻을 수 있다.

$$t = \frac{0.01 \times 10^{-6} \times 12}{400 \times 10^{-6}} = 0.3ms \quad (7)$$

$$t = \frac{0.01 \times 10^{-6} \times 16}{300 \times 10^{-6}} = 0.53ms \quad (8)$$

지연시간은 1ms이하로 변경전에 비해 약 3ms가 빠르게 계산되었다. 콘덴서용량을 추가로 변경할 경우 기본특성에 의한 자체지연시간이 존재하여 추가적인 용량변경에도 감소되지 않았다. 그림 1의 C3 및 C6의 콘덴서용량을 473K에서 103K로 변경 후 측정하였고 결과는 표 2와 같다.

표 2. 시험전류에 의한 시제품의 동작시간  
Table 2. Operating time of prototype by test current

시 료	누 전 동작 감지 전류 (mA)	누전동작 시험전류(mA)						
		30	60	90	120	150	180	440
		동작시간(ms)						
#1	22.6	16	15	15	14	15	14	14
#2	22.7	16	15	15	15	15	15	14
#3	21.2	17	16	13	14	14	14	13
#4	20.9	17	16	15	14	13	15	14
$\bar{X}$	21.85	16.50	15.50	14.50	14.25	14.25	14.50	13.75

누전차단기의 트립 동작시간을 빠르게 하기 위하여 전자회로부의 정수 값을 조정된 결과, 개선 전의 동작시간보다 최대 4.37ms가 빠르게 측정되었다. 시험결과를 토대로 인체감전보호용 누전차단기의 동작시간 0.03초 이하와 0.02초 이하를 비교해보면 인체에 미치는 전류 · 시간적(積)의 값이 감소됨을 식 9와 식 10을 통해 알 수 있다.

$$440mA \times 0.03s = 13.2mA \cdot s \quad (9)$$

$$440mA \times 0.02s = 8.8mA \cdot s \quad (10)$$

시제품누전차단기의 경우 기존제품보다  $4.4\text{mA} \cdot \text{s}$ 가 적은 전류·시간 적(積) 값을 갖게 된다. 또한 정격감도전류  $15\text{mA}$ 이하 제품의 경우 정격조건에서  $21 \sim 24\text{ms}$ 로 동작하였다. 따라서  $15\text{mA}$ 와  $30\text{mA}$ 의 제품은 정격감도전류가 다르지만 동작시간은 일정한 값을 가진다.

### 2.6 시제품 누전차단기의 내성시험

시제품누전차단기의 오동작 특성여부를 확인하기 위하여 차단기에 정격전압  $220\text{V}$ 를 인가한 뒤 전압의 위상각( $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ )별로 정방향(2회) 및 역방향(2회)으로 서지( $4\text{kV}, 1.2/50\mu\text{s}$ )를 총 16회 시험하여 누전차단기의 트립 여부를 확인하였다 [5-6]. 또한 차단기에 버스트시험(전압 첨두값  $4\text{kV}$ , 반복율  $5\text{kHz}, 5/50\text{ns}$ )을 정방향으로 1분을 가한 뒤 역방향으로도 동일하게 인가하여 시험을 진행하였다 [6-7]. 그림 3은 서지 및 버스트 테스트 시험사진이다.

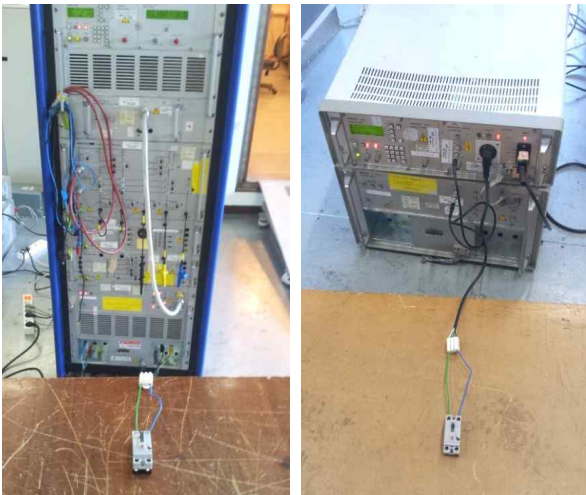


그림 3. 누전차단기 내성시험  
Fig. 3. Earth leakage CB immunity tests

시험결과 서지인가 총 16회 시험 중 차단기 트립이나 기타 오동작은 발생되지 않았고 버스트 시험에서도 트립은 발생되지 않았다.

### 3. 결 론

인체가 물에 젖어있는 상태에서 물을 사용하는 장소에 콘센트를 시설할 경우 전기용품안전관리법의 적용을 받는 인체감전보호용 누전차단기(전기용품안전기준 또는 KS C 4613의 표준에 적합한 정격감도전류  $15\text{mA}$ 이하, 동작시간  $0.03\text{초}$  이하의 전류동작형의 것에 한한다) 또는 절연변압기(정격용량  $3\text{kVA}$ 이하인 것에 한한다)로 보호된 전로에 접촉하거나, 인체감전보호용 누전차단기가 부착된 콘센트를 시설하여야 한다[8]. 물을 사용하는 장소의 전원은 정격감도전류  $15\text{mA}$  제품을 별도로 사용하도록 지정하고 있으나 실제로 동작시간의 차이는 없으므로 안전성을 개선할 필요가 있다. 본 논문은 누전차단기의 트립 동작시간을 빠르게 하기 위하여 전자회로부의 정수 값을 조정하여 시험하였다. 그 결과 시험 전 누전차단기의 동작시간보다  $2.9 \sim 4.37\text{ms}$ 가 빠르게 측정되었다. 따라서 인체감전사고 시 누전차단기의 동작시간이 빠를 경우 인체에 미치는 영향은 최소화된다. 이러한 점을 충분히 고려한 후 동작시간에 관한 연구를 지속한다면 안전성이 향상된 누전차단기의 개발이 가능할 것으로 사료된다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2012년도 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

**Acknowledgement**  
This study was financially supported by Seoul National University of Science & Technology.

**References**

- [1] A Statistical Analysis on the Electric Accident, No.20, Korea Electrical Safety Corporation, Ministry of Knowledge Economy, 2011.
- [2] Technical guideline on the Low-voltage electric circuit ground fault protection, Korea Electric Technology Standards Committee, Korea Electric Association, KEEG 9101-2003, pp.34-36, 2003.

- [3] A study on the Installation Guide of the Residual Current Protective Devices for Protection Against Electric Shock on the Human Body, Seoul National University of Science and Technology, Korea Electric Association, Ministry of Knowledge Economy, pp.67-68, 2002.
- [4] KS C 4613 : Residual current protective devices, Korean Standards Association, 2002.
- [5] KS C IEC 61000-4-5 : Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4 : Testing and measurement techniques-Section 5 : Surge immunity test, Korean Standards Association, 2008.
- [6] KS C IEC 60947-2 : Low-voltage switchgear and controlgear - Part 2: Circuit-breakers, Korean Standards Association, 2009.
- [7] KS C IEC 61000-4-4 : Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4 : Testing and measurement techniques-Section 4 : Electrical fast transient/burst immunity test. Basic EMC Publication , Korean Standards Association, 2009.
- [8] The Guide to Korea Electrotechnical Regulation, Korea Electric Association, pp.458, 2009.

◆ 저자소개 ◆



**김주철 (金柱鐵)**

1974년 1월 20일생. 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업. 2009년 서울과학기술대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 서울특별시 기능경기대회 옥내 배선 입상. 1991년 전국기능경기대회 옥내 배선 입상. 전기기능장, 중소기업우수 기능인, 우수숙련기술자. 한국제품안전협회 배선기구 협의회 기술분과위원, 중소기업기술개발지원사업 R&D 평가위원, 지식경제 기술혁신 평가단위원, 서울특별시 북부기술교육원 강사. 한국표준협회 국제인증본부/인증 심사원. 2002년~ 현재 상도전기통신(주) 부설연구소장



**이상중 (李尙中)**

1955년생. 부산공업고등전문학교 전기과 5년 졸업. 성균관대학교 전기공학과 졸업. 충남대학교 대학원 졸업(박사). 1987~1988년 PSEC 수료(Power System Engineering Course, GE Research Center in Schenectady, NY). 1976년 한국전력 입사. 1988~1996년 한전전력연구원 계통 연구실. 1995년 한전전력연구원 수화력발전연구실 부장. 1996년 한전보령화력본부 복합시운전, 제어계측부장. 1998년~현재 서울과학기술대학교 전기공학과 교수.