

전기설비의 저항성 누설전류 검출 및 특성 해석에 관한 연구

최충석*, 한송업**

* 전주대학교 소방안전공학과, ** 주식회사 에렐

Study on the Resistivity Leakage Current Detection and Properties Analysis of Electrical Installation

Chung-Seog Choi*, Song-Yop Hahn**

* Dept. of Fire Safety Engineering, Jeonju University, ** Love Life co.

Abstract - In this paper, we study form of flowing leakage current in electrical installation. Leakage current is expressed by a resistivity leakage current (I_{gr}), a capacitive leakage current (I_{gc}), an inductivity leakage current (I_{gl}). General Zero Phase Current Transformer (ZCT) detect a leakage current (I_g) that are conjoined resistivity leakage current and capacitive leakage current. In case I_{gr} is big than I_{gc} , there is no singular problem in leakage current detection of system. But, in case I_{gc} is big than I_{gr} , earth leakage breaker can not prevent accident effectively. Can lower electric leakage perception current to 5 mA if apply resistivity leakage current detecting circuit. We can achieve prevention of electricity disaster spontaneously.

기재해 예방의 가장 중요한 인자이다. 즉 전기설비의 회로에 이상이 발생하여 누설되는 전체 누설전류(I_g)는 저항성 누설전류(I_{gr}), 용량성 누설전류(I_{gc}), 유도성 누설전류(I_{gl})의 벡터합(vector sum)으로 나타난다. 그런데 전기화재 발생의 실질적 요소는 저항성 누설전류(I_{gr})이며, 용량성 누설전류(I_{gc})는 회로 및 시스템의 오동작을 유발시키는 성분으로 작용하여 기기나 장치의 신뢰성 저하는 물론 생산성 향상에도 장애 요인이 된다.

오동작을 유발시키는 용량성 누설전류(I_{gc})는 컴퓨터, 냉장고, 세탁기, 가로등, 인버터, 형광등, 전동기, 용접기 등의 기기에서 필연적으로 발생하므로 회로에 특별한 이상이 없는데도 불구하고 누전차단기가 빈번히 꺼짐(OFF)으로 전환되는 일이 발생하는 경우 사용자는 누전차단기를 제거하거나 직결(by pass)하여 사용하다가 화재의 발생은 물론 인명과 재산의 손실이 발생되는 것이다.

따라서 본 논문에서는 전기설비에 발생하는 누설전류의 검출 원리 및 각각에 대한 해석 내용을 제시하여 향후 전기설비의 점검 및 검사에 적용하기 위한 효율적 기술을 제공하여 생산적 설비 진단에 기여하고자 한다.

1. 서 론

전기에너지는 사용이 편리하고 에너지 변환 효율 및 환경 친화력 등이 매우 우수하다. 이와 같이 우수한 에너지라 하더라도 활용되는 기기나 설비가 부적절하게 설계되어 설치하는 경우 감전 및 화재 사고 등으로 인명의 사상은 물론 경제적 손실이 발생한다[1,2].

전기화재 예방을 위해 설치하는 누전차단기의 표기는 한국; RCD (Residual Current Protective Device), 일본; ELB (Earth Leakage Breaker), 미국과 캐나다; GFCI 또는 GFIC(Ground Fault Circuit Interrupter), 영국; ELCB 또는 ELB(Earth Leakage Circuit Breaker), 유럽; RCCB 또는 RCB(Residual Current Protective Device) 등으로 표시한다.

누전차단기는 누전에 의한 감전재해 및 전기 화재, 아크 지락에 의한 전기설비 사고를 방지할 목적으로 사용하는 차단기로서 1928년 서독에서 충전부에 접촉된 인체에 흐르는 전류를 영상변류기로 검출하여 피해 발생 전에 고속차단으로 보호하는 방법으로 최초 적용하였다[3]. 그 당시에는 인체 통전 전류의 한계치를 50 [mA·sec]로 설정하고, 10배의 안전율을 취하여 정격동작전류 50 [mA]인 누전차단기가 0.1 [sec] 이내에 차단이 완료되면 인체보호는 물론 누전화재까지 예방할 수 있는 것으로 알려졌다. 1939년 영국에서는 전압동작형 누전 차단 방식이 연구 발표되었으며, 미국에서는 1962년 감도전류 5 [mA]의 차단 방식이 발표되었다[4,5].

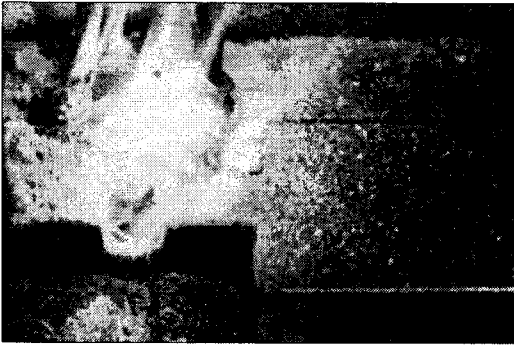
Biegelmeier의 연구 결과로 안전 한계 범위는 더욱 구체화되어 1969년 이후에는 IEC TC-64를 새롭게 보완하게 되었다. 영국은 현재까지 전압동작형 RCD를 사용하고 있으나 누전으로 인한 피해는 누설전압보다 누설전류에 의해 많은 영향을 받으므로 1960년대부터 독일이나 프랑스 등 대부분의 나라에서는 전류동작형을 개발하여 사용하고 있다.

누전차단기에서 누설전류의 감지는 영상변류기(ZCT; Zero phase Current Transformer)에 의해 전류의 입·출력 차를 검출하고 영상변류기의 출력신호를 증폭하여 차단 동작하고, 바이메탈의 간격 변화에 의해 과부하를 검출하여 동작한다. 누전차단기가 작동하기 위해서는 정확한 누설전류를 감지하는 것이 전

2. 누전차단기의 사고사례

누전차단기(RCD or ELB)는 누설전류를 검출하는 영상변류기와 검출된 출력신호를 증폭하는 증폭부, 증폭기의 바이어스 전압을 공급하는 전원부 및 설정된 누설전류를 초과하면 출력전압을 크게 하여 동작전류를 발생시키는 출력부로 구성되어 있다. 정상상태에서는 영상변류기의 유입 및 유출전류가 같기 때문에 영상변류기의 코어에서 발생하는 자속의 벡터합(vector sum)이 "0"이지만 누전 사고가 발생하면 누설전류가 흐르게 되고 코어 내의 자속의 벡터합의 차이가 존재하므로 이로 인해 변류기의 2차측에 유도 전압(induction voltage)이 발생한다. 이 전압은 증폭되어 트립 코일(trip coil)에 교류전원이 공급되므로 트립 코일의 가동부가 차단기를 트립시키게 된다. 그리고 누전차단기의 동작 상태를 확인하기 위해 시험용 버튼이 설치되어 있으며, 고감도형 누전차단기의 경우 누전을 감지하고 차단되는 시간은 0.03초 이내에 이루어지도록 규정되어 있다.

그림 1은 누전차단기 전원측 단자 사이에 이물질이 유입되어 누설전류가 흘러 트래킹과 미소방전 등에 의해 소손된 형태의 실체사진이다. 즉 누설전류가 장시간 반복적으로 흐르면 결국에는 그림에 나타낸 바와 같이 출화로 이어져 사고가 확산되는 것이다. 이 때 누설전류가 흘러 발생하는 줄열(Joule heat)은 저항 요소로 작용하고 있으며 그 값은 대략 10~20 [mA]로 보호장치가 작동할 수 없는 값이다.

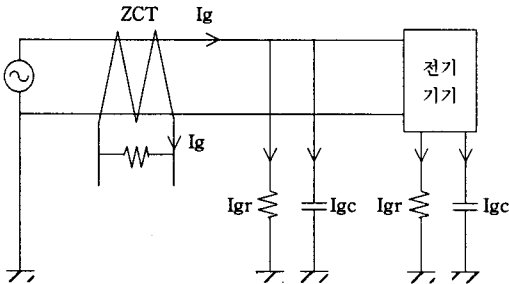


〈그림 1〉 누설전류에 의한 출화

3. 저항성 누설전류의 검출

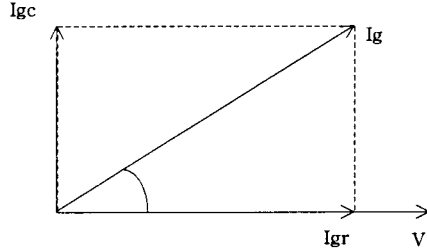
3.1 영상변류기에 의한 검출

전기설비에 전원을 공급하는 전선로의 대지 절연 저항(ground insulation resistance)이 열화(劣化)하거나 전선로에 접속된 전기기기의 대지 절연 저항이 열화되면 전선로에서 대지로 누설전류(leakage current)가 흐르고 이 값이 크면 전기화재(electric fire)를 일으킨다. 그리고 대지 절연 저항이 열화된 전선로나 전기기기가 인체에 접촉되면 인체를 통하여 대지로 누설전류가 흐르고 이 값이 크면 감전으로 인명 사고가 발생하는 주된 요소를 저항성 누설전류(I_{gr})라 한다. 또한, 전선로에는 전선과 대지 사이의 정전 용량 있으므로 항상 대지로 전류가 흐르고 전선로에 접속된 전기기기와 대지 사이에도 정전 용량이 포함되어 있으므로 약간의 전류가 접지선을 통해서 방전되는 것이다. 이와 같은 용량성 누설전류(I_{gc})는 전기화재를 일으키지 않고 시스템의 오동작 요소로 작용한다. 그림 2는 시스템에서 발생하는 누설전류의 경로와 전류 성분을 나타낸 것이다.



〈그림 2〉 누설전류 경로 및 전류 성분

일반적으로 전기기기의 누설전류를 검출하기 위해서는 영상 변류기(ZCT)를 사용하고 있다. 이 영상변류기를 이용하여 누설 전류를 검출하면 저항성 누설전류(I_{gr})와 용량성 누설전류(I_{gc})가 합쳐진 합성 누설전류(I_g)가 검출된다. 저항성 누설전류(I_{gr})는 전원전압과 동상이고, 용량성 누설전류(I_{gc})는 전압보다 위상이 90도 앞선다. 합성 누설전류(I_g)는 저항성 누설전류(I_{gr})와 용량성 누설전류(I_{gc})의 벡터 합으로 나타내며, 누설 전류의 성분을 그림 3에 나타낸다.

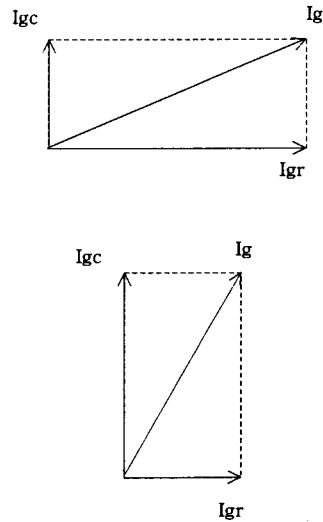


〈그림 3〉 전기설비의 누설전류 성분

3.2 저항성 누설전류(I_{gr})의 검출

전기화재나 인체 감전 사고를 방지하기 위해서는 저항성 누설전류(I_{gr})를 정확히 검출하여 누전경보 또는 누전차단을 하여야 한다. 그런데 영상변류기를 이용하여 검출한 합성 누설전류(I_g)에서 저항성 누설전류(I_{gr})를 분리하기가 쉽지 않기 때문에 현재 대부분의 누전경보기 또는 누전차단기에서는 합성 누설전류(I_g)를 이용하여 누전경보기 또는 누전차단기를 제작하고 있다.

그림 4(a)에서와 같이 $I_{gr} > I_{gc}$ 인 경우는 합성 누설전류(I_g)와 저항성 누설전류(I_{gr})의 크기가 비슷하여 문제가 없지만, 그림 4(b)에서와 같이 $I_{gr} < I_{gc}$ 인 경우는 합성 누설전류(I_g)가 저항성 누설전류(I_{gr})와 차이가 크기 때문에 누전차단 또는 경보 시스템으로서 기능을 정확히 구현할 수 없게 되는 것이다.



(a) $I_{gr} > I_{gc}$ 인 경우 (b) $I_{gr} < I_{gc}$ 인 경우

〈그림 4〉 전기설비의 I_{gr} 과 I_{gc} 의 관계

현재 국내의 옥내용 분전반에 설치되어 있는 누전차단기의 동작 전류는 비교적 큰 값인 30 [mA]로 설정하고 있기 때문에 저항성 누설전류(I_{gr})와 합성 누설전류(I_g)가 비슷하여 누전차단기의 동작 전류로 합성 누설전류(I_g)를 이용하여도 큰 문제가 되지 않는다. 그런데 부엌이나 목욕탕 등과 같이 습기가 많은 곳의 누전차단기는 동작전류를 15 [mA]로 하고 있기 때문에

용량성 누설전류(I_{gc})에 의한 오동작이 자주 발생할 가능성이 많다.

그리고 앞으로 국내에서도 미국, 캐나다 등의 선진국과 같이 안전한 전기 사용을 위해서는 누전차단기의 동작 전류를 5~15 [mA] 수준으로 낮추어야 하기 때문에 용량성 누설전류(I_{gc})에 의한 오동작이 사용자의 편리성과 안전성 확보에 장애요인으로 작용한다. 따라서 저항성 누설전류(I_{gr})를 정확히 검출할 수 있는 방법과 이 전류를 이용한 누전경보 및 차단 기술의 적용이 중요하다.

3.3 저항성 누설전류(I_{gr})의 검출 방법

전기설비에서 저항성 누설전류(I_{gr})를 검출하기 위한 이론적 원리에 대한 수식의 전개가 가능하다. 즉 전원전압(v)는 정현 파이므로 전압(v)은 다음과 같이 나타낸다.

$$v = \sqrt{2} V \sin(\omega t) \text{ [V]}$$

여기서, V ; 전원전압(v)의 실효값 [V]
 $\omega = 2\pi f$ [rad/sec]
 f ; 전원 주파수 [Hz]

따라서 전선로에 흐르는 합성 누설전류의 순시치(i_g)도 정현 파이며 다음과 같이 흐른다.

$$i_g = \sqrt{2} I_g \sin(\omega t + \theta) \text{ [A]}$$

여기서, I_g ; 합성 누설전류(i_g)의 실효치
 θ ; 전원전압과 합성 누설전류와의 위상각

이 합성 누설전류(i_g)를 전원전압(v)의 극성이 정(+)일 때, 즉 $0 < \omega t < \pi$ 구간에서 적분한 값을 P 라고 하면 다음과 같다.

$$P = \sqrt{2} I_g \int_0^\pi \sin(\omega t + \theta) d(\omega t) = 2\sqrt{2} I_g \cos \theta \text{ [A]}$$

그런데 $I_{gr} = I_g \cos \theta$ 이므로 $I_{gr} = \frac{1}{2\sqrt{2}} P$ 이다. 즉

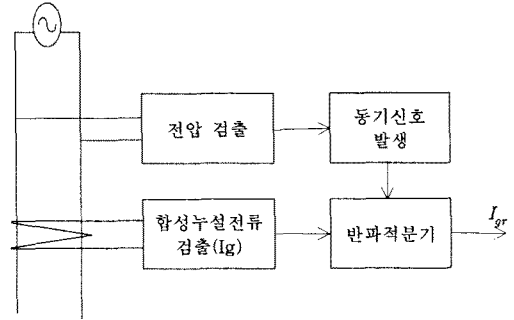
I_{gr} 은 P 에 비례한다. 또한, 이 합성 누설전류(i_g)를 전원전압(v)의 극성이 부(-)일 때, 즉 $\pi < \omega t < 2\pi$ 구간에서 적분한 값을 Q 라 하면 다음과 같이 나타낸다.

$$Q = \sqrt{2} I_g \int_\pi^{2\pi} \sin(\omega t + \theta) d(\omega t) = -2\sqrt{2} I_g \cos \theta \text{ [A]}$$

이 경우도 $I_{gr} = I_g \cos \theta$ 이므로 저항성 누설전류(I_{gr})는 절대값(Q)에 비례한다. 이상의 연산 과정을 보면 합성 누설전류(i_g)를 전원전압(v)의 반주기 마다 적분하여 저항성 누설전류(I_{gr})를 검출할 수 있음을 알 수 있다.

3.4 저항성 누설전류(I_{gr}) 검출 회로

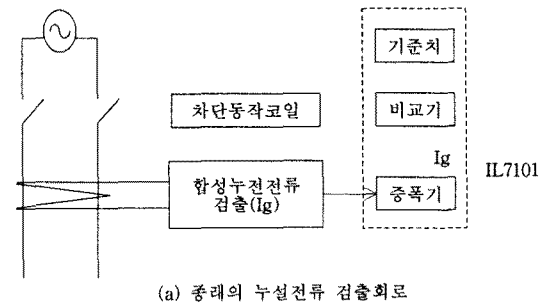
저항성 누설전류(I_{gr})는 합성 누설전류(I_g)를 전원의 반주기 동안 적분하여 얻을 수 있다. 그림 5는 저항성 누설전류 검출회로의 한 예이다. 우선 전원전압을 검출하여 "동기신호발생"에 보내어 전원의 반주기 마다 동기신호가 발생하게 한다. 영상변류기에서 검출한 합성 누설전류를 "반파적분기"에 보내어 동기신호에 따라 전원의 반파 기간씩 적분하면 전원의 반파 마다 저항성 누설전류(I_{gr})가 얻어 진다.



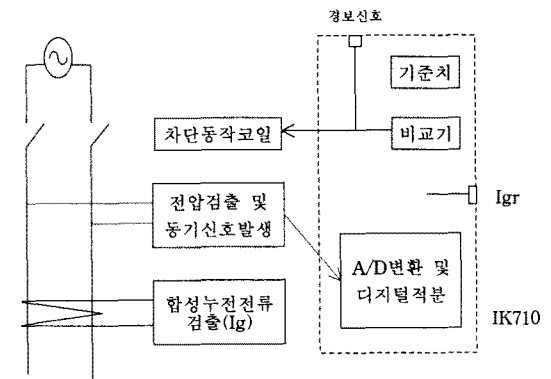
〈그림 5〉 저항성 누설전류(I_{gr})의 검출 회로

그림 6은 저항성 누설전류 검출회로를 활용한 누전차단기의 사례이다. 우선 그림 6(a)는 종래의 누전차단기 회로이다. 영상변류기로 검출한 합성 누설전류(I_g) 신호를 IL7101 Chip으로 증폭하고 이것을 기준치와 비교하여 누전차단 신호를 출력한다. 그림 6(b)는 저항성 누설전류(I_{gr}) 누전차단기 회로이다. 영상변류기로 검출한 합성 누설전류(I_g) 신호를 IK7102 Chip에서 전원의 반파 기간 마다 디지털 적분을 한 후 이것을 기준치와 비교하여 누전차단 신호를 출력한다.

"(주)에델"과 "(주)JK Semicon"이 공동 개발한 IK7102 Chip은 종래의 IL7101 Chip에 비하여 전선로에 흐르는 저항성 누설전류를 항상 감시할 수 있고 저항성 누설전류가 어느 기준치에 도달하면 경고 신호를 발생할 수 있다. 따라서 개발된 저항성 누설전류 감지식 누전차단기 회로에서는 종래의 누전차단기 회로에서 보다 "전압 검출 및 동기 신호 발생"부가 추가되었음을 알 수 있다[6-8].



(a) 종래의 누설전류 검출회로



(b) 개발된 저항성 누설전류(I_{gr}) 검출방식

〈그림 6〉 누전차단기의 구성 비교

4.1 누전차단기

저항성 누설전류 검출회로를 응용하여 누전차단기를 설치하는 경우 종래의 누전차단기보다 많은 장점을 가지고 있다. 용량성 누설전류(I_{gc})가 큰 전선로에서도 오동작 없이 작동한다. 현재 누전차단기의 동작전류는 30 [mA]인데 이것을 15 [mA]에서 5 [mA] 수준까지 낮출 수 있다. 따라서 전기제해를 현재보다 현격하게 감소시킬 수 있다. 또한, 저항성 누설전류(I_{gr})이 검출 되므로 누설전류를 항상 감시할 수 있다. 따라서 누전차단기가 동작되기 전에 미리 누전의 원인을 탐지하여 누전의 원인을 제거함으로써 전기제해를 예방할 수 있다.

- (1) 용량성 누설전류(I_{gc})가 큰 선로
 - ㉠. 가로등, 유도등
 - ㉡. 산업용기기(전동기, 용접기, 등) 전선로
 - ㉢. 지중 케이블
- (2) 고조파 또는 고주파 누설전류가 큰 선로
 - ㉠. 전자식 형광등 선로
 - ㉡. 인버터로 구동되는 전기기기 선로
 - ㉢. 통신기기용 전원공급 선로
- (3) 고감도(5/10/15 mA급)누전차단기
 - ㉠. 부엌, 화장실, 등에 공급하는 분기선로
 - ㉡. 비데, 세탁기, 냉장고 등에 사용하는 누전차단기
 - ㉢. 의료용 전기기기
 - ㉣. 전자식 약기
 - ㉤. 소아용 전기기기
 - ㉥. 컴퓨터가 많이 설치된 곳

4.2 누전경보기

전기설비의 전선로 또는 전선로에 접속된 전기기기에 흐르는 저항성 누설전류(I_{gr})를 검출하여 이 값이 어느 수준 이상이 되면 경보를 발생하는 것이다. 경보는 부저를 이용한 경보음이나 LED를 이용한 경보가 가능하다. 현재 일부 진행 중이고 앞으로 예상되는 응용사례를 보면 아래와 같다.

- (1) 배전기기
 - 배입형 콘센트, 어댑터형 콘센트, 이동식 콘센트에 누전경보기를 설치하여 이 콘센트에 접속된 전기기기에 누전이 발생하면 누전경보를 울리도록 한다. 경보전류는 10[mA] 급으로 하고 있다.
- (2) 가정용 전기기기
 - 습기가 많은 부엌 또는 세면장에서 사용하는 전기기기에 누전이 발생하면 인체에 치명적이다. 따라서 전기세탁기, 냉장고, 화장실의 전기비데 등에 누전경보기를 설치한다. 그 외에도 전력을 많이 소비하는 에어컨, TV, 형광등 등에 누전경보기를 설치한다.
- (3) 산업용 전기기기
 - 공장, 빌딩, 학교 건물 등에서 누전차단기에 누전감시 또는 누전경보 기능을 부착하여 전기제해를 예방 할 수 있게 한다. 건설 공사장과 같이 습기, 분진이 많은 주위환경에서 사용하는 산업용 전기기기에 누전경보기를 설치한다. 예를 들면 전기용접기, 핸드 드릴, 핸드 그라인더 등이다.
- (4) 공공장소의 전기기기
 - 전기를 사용하는 자동판매기, 정수기, 가로등, 학교나 사무실의 형광등, 등에 누전경보기를 설치한다.

전기설비에 흐르는 누설전류의 형태를 분석하여 저항성 누설전류 시스템 적용을 위한 요소들을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 누전차단기 단자부에 이물질이 유입되어 누설전류가 반복적으로 흐르면 트래킹 또는 미소방전에 의해서 출화로 이어져 사고가 확산되는 것을 알 수 있다.
- 2) 기존의 영상변류기(ZCT)를 이용하여 누설전류를 검출하던 저항성 누설전류(I_{gr})와 용량성 누설전류(I_{gc})가 합쳐진 합성 누설전류(I_g)가 검출된다.
- 3) $I_{gr} > I_{gc}$ 인 경우는 합성 누설전류(I_g)와 저항성 누설전류(I_{gr})는 비슷하여 문제가 없지만, $I_{gr} < I_{gc}$ 인 경우는 합성 누설전류(I_g)가 저항성 누설전류(I_{gr})와 차이가 크기 때문에 누전차단 또는 경보 시스템으로서 기능을 정확히 구현할 수 없게 되는 것이다.
- 4) 저항성 누설전류 검출회로를 응용하여 누전차단기를 설치하는 경우 누전 감지 전류를 5 [mA] 수준까지 낮출 수 있어서 전기제해 예방을 능동적으로 수행할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 최충석 외 5, “전기화재공학”, 도서출판 동화기술, pp.193-197, 2004
- [2] C.S. Choi et al, “Flame Spread and Damaged Properties of RCD Cases by Tracking”, IEEJ Trans. PE, Vol.127, No.1, pp.321-326, 2007
- [3] Kurt Nowak, “Zwanzig Jahre FI-Schutzschaltung Chronologie und Entwicklung varianten” pp.7-9, aus de 16/, 1978
- [4] A.W. Smoot, N. Magan, “Method of Calculating electrical body impedance and equipment for measuring leakage currents”, p.298, Underwriters Laboratories, USA, 1985
- [5] Walter F.Hart, P.E., “A Five-part Resistor-Capacitor Network for measurement of Voltage and Current Levels Related to Electric Shock and Burns”, pp.183-190, Electrical Shock Safety Criteria, 1985
- [6] 한송엽, “대지저항성 누설전류 측정기(Analog Multiplier 사용)”, 대한민국특허청, 공개번호 10-0771583, 2007
- [7] 한송엽, “대지저항성 누설전류 측정기(Integrator 사용)”, 대한민국특허청, 출원번호 10-2007-0064655, 2007
- [8] 한송엽, “Measuring Instrument for an Electric Current Leakage”, PCT / KR2007 / 003732, 2007