

누설전류로 인한 전기화재 및 감전사고 예방기법

(Prevention Techniques of Electrical Fire and Electrical Shock Caused by Leakage Current)

김동우* · 임용배 · 이상익 · 김재현 · 강대철

(Dong-Woo Kim · Young-Bea Lim · Sang-Ick Lee · Jae-Hyun Kim · Dae-Chul Kang)

Abstract

Electrical leakage happens when faults in electrical apparatus or power lines occur. It causes electrical fires and electric shocks. In order to reduce accidents caused by electrical leakage current, it is important to detect faults effectively and shut off the power. In this paper, firstly we analyzed statistics of electrical fires and electric shocks caused by electrical leakage current. Secondly, standards of allowable leakage current and body impedance models were analyzed. Lastly, effective application methods for breaking electrical leakage current were suggested. The results will provide useful preventive measures of electrical fires and electric shocks caused by electrical leakage.

Key Words : Electrical Leakage, Electric Shock, Electrical Fire, Body Impedance

1. 서 론

전기기기 또는 선로 등에서 절연고장이 발생되었을 경우 누전경로가 형성되며, 형성된 누전경로로 누설전류가 흐르게 된다.

누설전류로 인한 전기재해로는 전기화재와 감전사고가 있으며, 매년 재산피해와 인명피해가 크게 발생하고 있다. 누전에 의한 전기화재(단, 자동차, 철도차

량, 선박, 항공기 화재 제외)는 2011년에 481건이 발생하였으며, 약 15억 1천만원의 재산피해 및 6명의 사상자가 발생하였다[1]. 또한 누전에 의한 감전사고는 2011년에 사망 14명, 부상 47명 등 61명의 사상자가 발생하였다[2]. 이와 같이 누전에 의한 피해를 방지하기 위해서 접지시스템의 구비와 함께 누전차단기가 사용되나, 누전차단기는 접지방식에 따라 특정 고장조건에서 동작을 보장받지 못한다[3].

본 논문에서는 누설전류로 인한 피해를 최소화하기 위해 화재 및 감전사고 통계 분석, 허용 누설전류 기준 분석, 인체임피던스 모델 분석 등을 통하여 효율적인 누전차단 적용방식을 제안하고자 한다.

* 주(교신)저자 : 전기안전연구원 선임연구원
* Main(Corresponding) author : Electrical Safety
Research Institute, Senior Researcher
Tel : 031-580-3036, Fax : 031-580-3111
E-mail : superbwoo@gmail.com
접수일자 : 2013년 4월 5일
1차심사 : 2013년 4월 10일, 2차심사 : 2013년 5월 4일
심사완료 : 2013년 5월 13일

2. 누설전류로 인한 전기재해통계 및 허용누설전류 기준

2.1 전기화재

누전은 회로의 전류가 정해진 경로 이외로 흐르는 것을 말하며, 누전이 발생할 경우 감전뿐만 아니라 화재가 발생할 수 있다. 누전에 의한 화재는 습하고 먼지로 오염된 환경에서 발생되기 쉬우며, 화재 사례로는 수족관에서 수족관 물로 인해 누전이 발생하여 화재가 발생한 경우가 있다. 또한 전등과 연결된 전선에서 잦은 눈으로 인해 습기가 침투하여 누전이 발생하여 화재가 발생한 사례가 있다[4].

표 1에 나타난 바와 같이 2009년~2011년 3년간 누전에 의한 전기화재(단, 자동차, 철도차량, 선박, 항공기 화재 제외)는 총 1,615건이 발생하였으며, 약 87억 원의 재산피해 및 36명의 사상자가 발생하였다[1]. 이와 같이 누전에 의한 화재를 예방하기 위해서는 습기와 먼지는 누전경로가 발생하기 쉬운 환경을 유발하므로, 전기설비나 전기제품 주변은 청결을 유지하여야 한다.

IEC 60364 및 BS 7671 기준에 의하면, 일반적으로 누전화재는 300mA 이상의 고장전류가 발생하였을 경우 화재위험성이 높으므로 누설전류에 의한 화재를 예방하기 위해서는 정격감도 전류 300mA 이하의 누전 차단기 사용을 권고하고 있다[5-6]. 다만 정격감도 전류 300mA 이하 누설전류에도 전기화재는 발생할 가능성이 있으므로, 가능하다면 정격감도전류는 감전사고 보호때와 마찬가지로 30mA 이하 누전차단기를 사용하는 것이 바람직하다.

표 1. 누전화재 피해현황
Table 1. Electrical fire caused by leakage current

년 도	누전화재 건수 (건)	인명피해(명)			재산피해 (천원)
		사 망	부 상	계	
2009년	556	3	15	18	2,960,064
2010년	578	1	11	12	4,230,254
2011년	481	1	5	6	1,510,382
합계	1,615	5	31	36	8,700,700

2.2 감전사고

누설전류에 의한 감전사고는 누전상태에 있는 전기 기기에 인체 등이 접촉되어 인체를 통해 누전전류가 흘러 감전되는 경우를 말하며, 절연불량의 전기기기 등에 인체가 접촉되어 발생하는 경우가 많다. 또한 이러한 불량 전기설비가 시설된 철구조물 등에 인체가 접촉되어 발생하는 경우도 있다. 2009년~2011년 3년간 우리나라에서 발생한 감전사고는 사망 141명, 부상 1,576명 등 총 1,717명의 사상자가 발생하였으며, 이 중 누전에 의한 감전사고는 표 2에 나타난 바와 같이 사망 37명, 부상 146명 등 총 183명의 사상자가 발생하였다[2, 7-8].

표 2. 누전에 의한 감전사고 피해현황
Table 2. Electric shock caused by leakage current

년 도	인명피해(명)		
	사 망	부 상	계
2009년	11	32	43
2010년	12	67	79
2011년	14	47	61
합계	37	146	183

인체 감전사고에 의한 사망의 주요인은 심실세동이 며, 심실세동을 일으키지 않을 한계전류는 달ziel (Dalziel)의 연구를 기반으로 한 IEEE Std.80과 비겔 마이어(Biegelmeier)의 연구를 기반으로 한 IEC 60479-1이 있다[9-11]. IEEE Std.80에 의하면, 50Hz 또는 60Hz의 전류를 흘렸을 때 99.5%의 사람이 심실세동을 일으키지 않고 견딜수 있는 한계전류(I_b)는 통전 시간이 t_s 초일 때 식 (1)에 나타난 바와 같다.

$$I_b = k / \sqrt{t_s} \tag{1}$$

식 (1)에서 체중이 50kg 인 경우 $k=0.116$ 이며, 체중이 70kg인 경우 $k=0.157$ 이다.

IEC 60479-1에 의하면 심실세동을 일으키지 않고 견딜수 있는 한계전류는 가로축을 전류로 두고 세로축을 시간으로 표시하였을 때 S형태의 곡선을 나타내

었다. 인체의 왼손에서 양발의 경로로 15Hz에서 100Hz 사이의 교류 전류가 30mA 이상일 경우(전류의 지속시간에 따라 일부 차이는 있으나) 심실세동을 일으킬 위험성이 있다[10]. 따라서 IEC 60364 및 BS 7671에서는 고장에 의한 직접접촉이 발생한 경우 사고에 대한 추가적인 보호대책으로서 정격감도전류 30mA이하의 누전차단기를 사용하도록 하고 있다 [5-6, 12].

3. 인체 임피던스모델

인체 임피던스는 그림 1에 나타난 바와 같이 저항과 커패시터가 병렬연결된 성분과 저항 성분의 직렬접속으로 구성되어 있다. 인체 내부는 저항성분으로 구성되어 있으며, 접촉전류의 입출력 부분은 저항과 커패시터의 병렬접속으로 구성되어있다[13-14]. 인체 임피던스모델은 그림 1 (a)에 나타난 바와 같이 저항과 커패시터 다섯 개의 성분으로 이루어진 것이 실제 상황과 가까운 모델이나 수학적 계산상의 복잡성 때문에 그림 1 (b)의 모델로 단순화하여 표현하기도 한다. 여기서, R_s 를 피부 저항, C_s 를 피부 커패시턴스로 두었을 때, C_1 및 R_1 값은 손-손 접촉모델(식 (2)), 양손-양발 접촉모델(식 (3)), 손-엉덩이 접촉모델(식 (3))에 따라 변하며, R_2 값은 인체 내부의 저항값으로 접촉모델과 상관없이 항상 동일하다.

$$R_1=2R_s, C_1=C_s/2, R_2=R_i \quad (2)$$

$$R_1=R_s, C_1=C_s, R_2=R_i \quad (3)$$

또한 피부 커패시턴스 값 C_s 는 접촉면적에 따라 차이가 있으며, 커패시턴스의 실험적인 값은 $0.01\mu F/cm^2$ 에서 $0.05\mu F/cm^2$ 의 범위내에 있다[13]. 따라서 만약 손의 접촉면적이 대($82cm^2$), 중($12.5cm^2$), 소($1cm^2$) 일 때, 피부 커패시턴스 값 C_s 는 식 (4)~(6)과 같다.

$$\text{접촉면적 대} : 0.82\mu F \leq C_s \leq 4.1\mu F \quad (4)$$

$$\text{접촉면적 중} : 0.125\mu F \leq C_s \leq 0.625\mu F \quad (5)$$

$$\text{접촉면적 소} : 0.01\mu F \leq C_s \leq 0.05\mu F \quad (6)$$

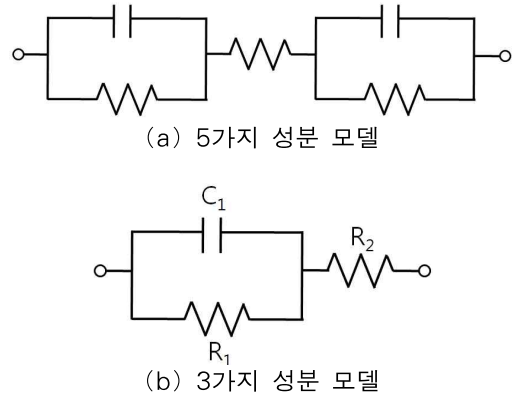


그림 1. 인체임피던스 모델
Fig. 1. Model of body impedance

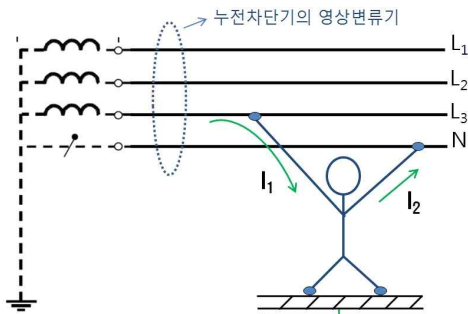
일반적으로 충전도체와 대지사이의 상시대지 누설 전류는 용량성분으로서 대지를 통해 흐르기 때문에 인체에 무해하나, 충전도체를 인체가 직접 만졌을 경우 인체 임피던스 성분중 커패시턴스 성분은 접촉상황에 따라 커질 수도 있으므로 인체에 무효성분의 전류가 흐를 경우 크기의 제한은 필요할 것으로 판단된다.

4. 누전차단특성 및 보호범위

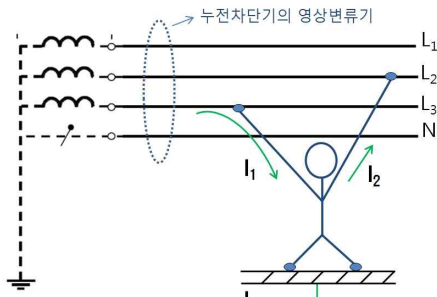
누전차단기는 기기의 기본 절연이 실패하여 누전이 발생되었을 경우 감전사고의 위험성을 줄이는 가장 효율적인 장치이다. 그러나 누전차단기 자체가 고장이 발생하지 않고 정상 동작한다 하더라도 접지방식 및 충전부 접촉조건에 따라서 감전상황이 발생하여도 누전차단기는 동작하지 않을 수 있으며, 그러한 상황을 접지방식에 따라 요약하면 다음과 같다[3].

첫 번째로, 접지방식과 상관없이 인체가 충전부의 양극을 직접 접촉하면 대지를 통하는 누설전류는 거의 무시할 정도로 작으므로 누전차단기가 동작하지 않는다. 그림 2 (a)에서 인체가 L_3 상과 N상을 직접 접촉한 경우 대지로 흐르는 전류 I_3 는 거의 무시할 정도이므로 누전차단기는 동작하지 않고 인체는 감전된다. 마찬가지로, 그림 2 (b)에 나타낸바와 같이, 인체가 L_2 상과 L_3 상을 직접 접촉한 경우 대지로 흐르는 전류 I_3

는 거의 무시할 정도의 작은 크기이므로 누전차단기는 트립되지 않고 인체는 감전될 수 있다.



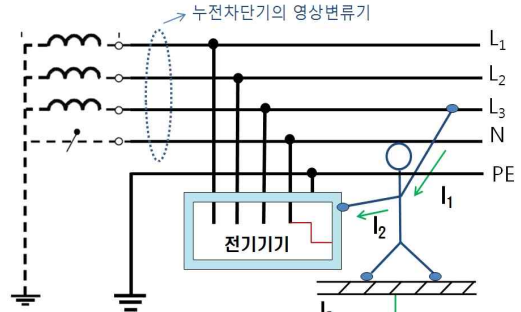
(a) 인체가 N상과 Live상을 접촉한 경우



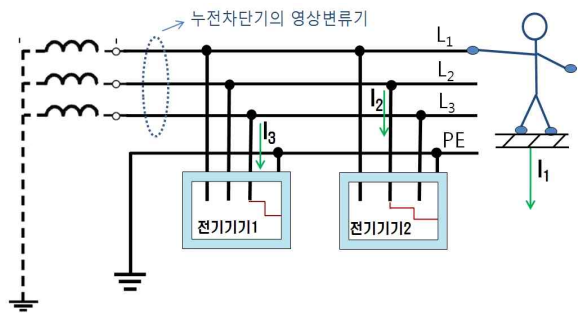
(b) 인체가 Live상과 Live상을 접촉한 경우

그림 2. 충전부의 양극을 직접 접촉한 경우
Fig. 2. In case of direct contact with different phases

두 번째로, TT접지방식에서 누전차단기가 동작되지 않는 경우는 그림 3에 나타내었다. 그림 3 (a)는 중성선이 지락되었을 경우 중성선의 전위는 영이므로 고장전류가 대지로 흐르지 않기 때문에 누전차단기가 동작하지 않으며, 이 때 인체가 L상과 기기외함에 동시에 접촉하였을 경우 그림 2의 (a)와 마찬가지로 대지로 흐르는 전류 I_3 는 거의 무시할 정도로 작아서 누전차단기는 동작하지 않고 인체는 감전될 수 있다. 그림 3 (b)는 중성선이 없는 3상 TT접지시스템에서 전기기기1의 L_3 상과 전기기기2의 L_2 상에 동시 지락이 발생하였을 때 인체가 L_1 상에 접촉하였을 경우를 나타낸 그림으로서 I_1, I_2, I_3 의 벡터합 전류가 누전차단기 동작전류보다 작다면 누전차단기는 인체가 감전될 상황에 놓이더라도 트립되지 않는다.



(a) 중성선이 지락된 상태에서 인체가 Live상과 기기 외함을 접촉한 경우



(b) 중성선이 지락된 상태에서 인체가 Live상과 기기 외함을 접촉한 경우

그림 3. TT시스템에서 누전차단기 접촉조건
Fig. 3. Contact conditions of RCD in TT systems

세 번째로, TN-C-S접지방식에서 누전차단기가 동작하지 않는 경우는 PEN도체가 단선되었을 때 인체가 기기외함을 접촉한 경우이며, 이때 기기앞단에 설치된 누전차단기는 벡터합이 0이므로 트립되지 않는다.

네 번째로, TN-S접지방식에서 누전차단기가 동작하지 않는 경우는 변압기의 고압측에서 지락이 발생한 경우 전원측 접지와 중성선이 충전부가 되며, PE도체를 따라서 부하측 기기의 외함도 충전이 된다. 이때 인체가 부하측 기기외함을 만졌을 경우 부하측 기기 바로 앞단의 누전차단기는 트립되지 않아도 인체는 감전될 수 있다.

이상과 같이 누전차단기는 누전에 의한 감전이 발생되더라도 항상 동작을 보장받는 것은 아니므로, 감전 사고에 의한 보호범위 확대를 통해 사고를 예방하기 위해서는 누설전류 측정지점을 늘리고 이를 감시 및 판단하는 시스템을 추가하는 것이 바람직하다.

5. 누전차단방식의 효율적인 적용방법

누전차단기는 인체감전보호에 효과적인 장치이지만, 고장상황이 아닌데도 불구하고 전선로와 대지 사이의 커패시턴스 성분에 의해 트립되는 경우와 전자기기의 노이즈 필터용 커패시터에 의해 트립이 발생하는 경우가 있어서, 사용자가 누전차단기 설치를 기피하고 배선용차단기만 사용하여 감전되는 경우가 있다. 이러한 문제점을 해소하기 위해서는 다음의 세 가지 사항에 주의를 기울여야한다.

첫 번째로, 전선과 대지사이의 임피던스 불평형에 의한 상시 대지누설전류는 대지를 통해서 흐르기 때문에 인체에 안전하므로, 저항성 누설전류 성분에만 동작하는 누전차단기를 적용하였을때 누전차단기의 불필요한 트립을 방지할 수 있다.

두 번째로, 정보화기기 노이즈 필터류의 커패시턴스 성분에 의한 용량성 누설전류는 대략 기기당 1~2mA로 알려져 있으므로, 누전차단기당 분담부하수를 제한하여 설치하거나, 저항성 누설전류 성분에만 동작하는 누전차단기를 사용하는 것이 바람직하다. 다만 이 경우 보호도체 또는 접지선에 용량성 누설전류가 누적되는 선로부분 이후를 접촉할 경우 위험할 수도 있으나, 그럴 가능성은 적은 것으로 판단된다.

세 번째로, 저항성 누설전류 성분에만 동작하는 누전차단기 적용시 선로의 충전도체를 인체가 직접접촉할 경우 인체임피던스는 용량성 전류도 흐르므로 용량성 누설전류값의 제한은 필요할 것으로 판단된다.

6. 결 론

이상과 같이 누설전류에 의한 전기화재 및 감전사고를 예방하기 위한 기법을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 습기와 먼지는 누전경로가 발생하기 쉬운 조건을 유발하므로, 전기설비나 전기제품 주변은 청결을 유지하여야 하며, 누전화재를 예방하기 위해서는 정격감도 전류 300mA 이하의 누전차단기 사용시 전기화재 위험성을 크게 줄일 수 있다.
- (2) 누설전류에 의한 감전사고는 절연불량의 전기기

기 등에 인체가 접촉되어 발생하는 경우가 많다. 교류 전류가 30mA 이상일 경우 심실세동을 일으킬 위험성이 있으므로 정격감도전류 30mA(동작시간 0.03초 이내) 이하의 누전차단기 사용이 바람직하다. 특히 욕실 등 물을 사용하는 장소에서는 감전위험성이 증대되므로 정격감도전류 15mA 이하(동작시간 0.03초 이내)의 누전차단기 사용이 바람직하다. 또한 노약자 등은 심실세동에 의한 사망까지 이르지 않더라도 인체 누설전류에 취약하므로 정격감도전류를 더 낮추는 방안도 검토할 필요가 있다.

- (3) 인체 임피던스는 저항과 커패시터가 병렬 연결된 성분과 저항 성분의 직렬접속으로 구성되어 있으며, 이때 피부 커패시턴스 값은 손을 기준으로 했을 때 최대 4.1μF이므로, 충전도체에 인체가 직접접촉하였을 때도 유효성분의 전류뿐만 아니라 무효성분의 전류도 제한이 필요하다.
- (4) 누전차단기 자체가 고장이 발생하지 않고 정상 동작하여도 접지방식 및 충전부 접촉조건에 따라서 감전상황 발생 누전차단기가 동작하지 않을 수 있다. 따라서 감전사고에 의한 보호범위 확대를 통해 사고를 예방하기 위해서는 누설전류 측정지점을 늘리고 이를 감시 및 판단하는 시스템을 추가하는 것이 바람직하다.
- (5) 누전차단기의 불필요한 트립문제를 해소하기 위해서는 누전차단기당 분담부하수를 제한하여 설치하거나, 저항성 누설전류 성분에만 동작하는 누전차단기 적용시 선로의 충전도체를 인체가 직접접촉할 경우 인체임피던스는 용량성 전류도 흐르므로 용량성 누설전류값의 제한은 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 2011T100100119)

References

- [1] National Fire Information Center, "http://www.nfds.go.kr", National Emergency Management Agency.
- [2] Korea Electrical Safety Corporation, "A Statistical Analysis on the Electric Accident(No. 21)", pp30~48, 2012.
- [3] Massimo Mitolo, "Shock Hazard in the Presence of Protective Residual Current Devices", IEEE Trans. on Industry Applications, pp. 1552-1557, 2010.
- [4] D-W Kim, "Electrical disaster prevention methods through the analysis of 2011 statistics in Korea", KOSOS Safety World, pp.7-10, 2012.
- [5] BS, "BS 7671", pp59, pp68, 2008.
- [6] The Korea Electric Association, "Electrical installation guide According to IEC", pp193-195, pp216, pp237, 2008.
- [7] Korea Electrical Safety Corporation, "A Statistical Analysis on the Electric Accident(No. 20)", pp30~45, 2011.
- [8] Korea Electrical Safety Corporation, "A Statistical Analysis on the Electric Accident(No. 19)", pp39~54, 2010.
- [9] IEEE, "IEEE Std. 80-2000", pp.86-118, 2000.
- [10] IEC, "IEC 60479-1", pp.14-47, 2005.
- [11] C.-H. Lee and S.-D. Lin, "Safety assessment of AC earthing systems in a DC traction-supply substation", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 4, pp.885~893, 2005.
- [12] IEC, "IEC 60364-4-41", pp23, 2005.
- [13] IEC/TR, "IEC 60479-5", pp32-52, 2007.
- [14] Reilly, "Electrical stimulation and electropathology", Cambridge university press, pp450, 1992.

◆ 저자소개 ◆



김동우 (金東佑)

1972년 3월 20일생. 1996년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.

Tel : (031)580-3036

E-mail : superbwoo@gmail.com



임용배 (林庸培)

1967년 11월 16일생. 1994년 2월 원광대학교 전기공학과 졸업. 1998년 8월 홍익대학교 전기제어공학과 졸업(석사). 2007년 2월 홍익대학교 전기정보제어공학과 졸업(박사). 1996년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 책임연구원.

Tel : (031)580-3056,

E-mail : tree@kesco.or.kr



이상익 (李尙益)

1968년 12월 9일생. 1994년 2월 호서대학교 전기공학과 졸업. 1996년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 건국대학교 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.

Tel : (031)580-3053,

E-mail : sangickl@kesco.or.kr



김재현 (金宰賢)

1973년 2월 21일생. 1999년 2월 경북대학교 전자전기공학부 졸업. 2001년 2월 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2001년~2005년 LG.Philips LCD 주임연구원. 2006년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 주임연구원.

Tel : (031)580-3077

E-mail : azalea@kesco.or.kr



강대철 (姜大哲)

1962년 11월 24일생. 1987년 2월 조선대학교 전기공학과 졸업. 2009년 8월 광운대학교 대학원 전자정보통신전공(석사). 1988년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 부원장.

Tel : (031)580-3050,

E-mail : kdc6838@kesco.or.kr