

TN-C-S계통에서 PEN도체 단선이 인체안전에 미치는 영향

(Personnel Safety Related to Disconnection of PEN Conductor in TN-C-S System)

김정철* · 이규선 · 이복희**

(Jung-Cheol Kim · Kyu-Sun Lee · Bok-Hee Lee)

Abstract

In electric power supply systems, an earthing system determines the electric potential of the conductors related to that of the Earth's surface. The choice of earthing system has implications for the safety of the power supply systems. There are considerably different regulations for earthing (grounding) systems in each country. A protective earth(PE) conductor ensures that all exposed conductive surfaces are at the same electric potential as the earth surface. This paper deals with that when PEN conductor of TN-C-S system is disconnected, dangerous touch voltage causes personnel body to be harmed and human being's property to be damaged seriously. For this reason, this paper explains how serious problems can occur when the fault current flows. As a consequence, we can understand how we can design earthing system properly to ensure the personnel safety against earth faults. The result shows the way that TN-C-S system can be applied safely in Korea.

Key Words : TN-C-S System, PEN Conductor, Touch Voltage, Personal Safety, Grounding System, Earthing

1. 서 론

전기설비에서 접지시스템은 전기사고의 예방을 목적으로 설치되기 때문에 전기설비가 정상적인 상태에서는 접지시스템의 역할이 중요하다는 것을 인식하기 어렵다. 하지만 전기설비에 이상이 발생하는 경우 접지시스템의 역할이 절대적으로 중요해진다. 그러므로

전기설비의 시설에서 접지시스템의 특성을 정확하게 이해하고 합리적인 설계를 하는 것은 인명의 위험과 재산상의 손실을 예방하기 위해 반드시 수행해야하는 과제인 것이다[1]. 전기에너지의 합리적인 이용과 인명의 안전을 위하여 한국의 수용가 설비의 접지방식 규정을 포함하고 있는 전기설비기술기준에 국제표준인 IEC 60364를 도입하여, 이를 KS화함으로써 수용가 설비 운용자는 전기설비의 기능적 요건 및 경제성에 따라 IEC 60364에 규정된 저압 배전용 전원 계통 즉, TT방식, IT방식, TN-S방식, TN-C방식 또는 TN-C-S방식 등에서 현장의 상황에 따라 접지방식을 적절하게 선택하여 효율적이고 안정적인 전기설비를

* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 석사과정

** 교신저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-860-7398

E-mail : morphis6@naver.com

접수일자 : 2012년 3월 13일

1차심사 : 2012년 3월 15일

심사완료 : 2012년 4월 4일

설계할 수 있게 되었다[2-3]. 중·대용량 저압 수용가 설비에서 많이 채택하고 있는 TN-C방식과 함께 TN-C-S방식 저압전원계통에서 PEN도체가 접촉 불량 또는 단선사고가 발생하는 경우 본 계통에 접속되어 있는 전기설비의 노출도전성 부분에는 상전압에 상응하는 높은 접촉전압을 발생시켜 인명의 안전을 보장할 수 없다[4].

전원계통의 이상으로 인하여 발생하는 인체 감전사고는 인명손실을 야기하고 재산상의 막대한 손실을 초래하기 때문에 전원계통의 사용에 우선하여 인체의 안전을 검증하고 보장할 수 있는 선행적인 실증 연구가 반드시 수행되어야 한다[1]. 본 연구는 북미, 유럽의 대부분의 저압수용가에서 사용하고 있는 TN-C-S방식 저압전원계통을 국내에 적용하는 경우 문제점의 분석과 해결방안의 제안을 목적으로 실제 저압수용가설비에 시설하여 실증실험을 수행하였다. TN-C-S방식 저압전원계통에서 PEN도체가 단선되는 경우 부하기기의 노출 도전성 부분에 나타나는 접촉전압을 평가하여 TN-C-S방식 저압전원계통을 안전하게 국내에서 사용할 수 있는지를 검증하였다.

2. 실험

2.1 인체임피던스모델을 이용한 전위검출기

TN-C-S방식 저압전원계통에서 PEN도체의 단선되는 경우 부하기기의 노출도전성 부분에 발생하는 접촉전압이 인체안전에 미치는 영향을 측정하기 위한 검출회로를 IEEE Std 81.2-1991을 참고하여 인체임피던스모델을 설계 및 제작하였다[5].

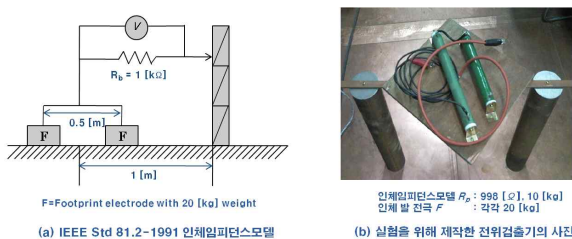


그림 1. 인체임피던스모델
Fig. 1. Personal impedance model

실제로 인체에 인가되는 접촉전압을 측정할 수 있는 인체임피던스 모델과 전위검출기의 사진을 그림 1에 나타내었다.

2.2 실증실험설비

그림 2는 TN-C-S방식 저압 전원계통에서 PEN도체 단선시의 접촉전압에 대한 안전성을 실증적으로 검증하기 위해서, TN-C-S방식 저압전원계통을 모의한 저압 수용가 설비를 시설한 것을 보여주고 있다. 각 실험요소들의 시설위치는 부하를 기준으로 하여 이격된 거리로 나타내었다. 실험계의 접지저항의 측정결과를 표 1에 나타내었다.

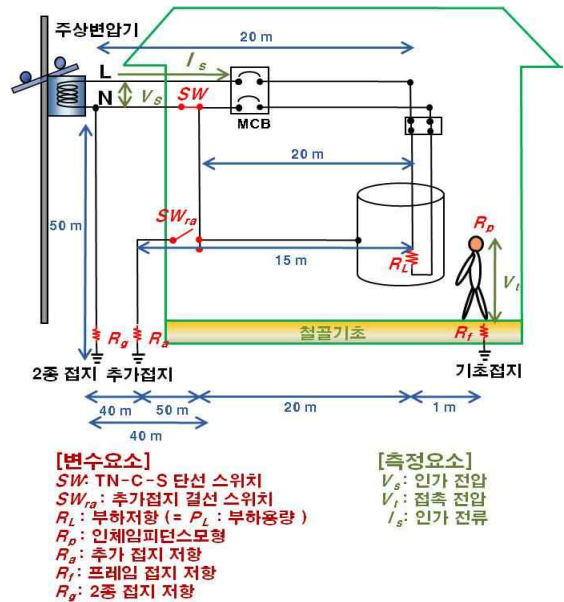


그림 2. TN-C-S 전원계통 수용가 회로도
Fig. 2. A consumer's circuit diagram of TN-C-S system

표 1. 접지저항의 측정결과
Table 1. Measured results of the earth resistances

측정요소	측정결과
프레임접지저항 R_f	2.3 [Ω]
추가접지저항 R_b	18 [Ω]
2중 접지저항 R_g	10.23 [Ω]

TN-C-S계통에서 PEN도체 단선이 인체안전에 미치는 영향

2.3 실험장치 및 방법

그림 3은 실제로 시공한 실증 실험장에 설치한 부하 기기와 측정 장비의 종류와 구성을 보여준다. 교류 220[V]의 전압을 인가한 상태에서 스위치를 개방하는 방식으로 PEN도체의 단선을 모의하여 전원공급의 중단에 의한 전류와 전압의 변동을 오실로스코프로 관측하였다. 등가모형을 제안하고 시뮬레이션한 결과와 측정결과를 비교하였다.

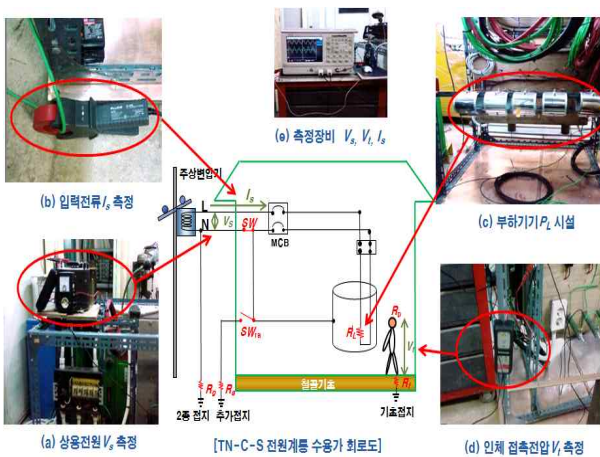


그림 3. 실험설비의 구성
Fig. 3. Configuration of the experimental equipment

2.4 실험변수의 선정

TN-C-S방식 저압 전원계통에서 PEN도체 단선 시 인체에 미치는 영향을 부하용량에 따른 접촉전압의 변화를 분석하기 위하여 표 2와 같이 실험변수를 선정하였다.

표 2. 실험변수의 선정
Table 2. Selections of experimental variables

실험 변수 선정	선정 값
부하용량 P_L	1, 2, 3, 4, 5 [kW]
인체저항 R_b	1 [k Ω]

TN-C-S방식 저압 전원계통을 실제로 사용하는 수 용가에서 전력의 사용량이 증가하는 경우에 PEN도체

의 단선이 인체에 미치는 영향의 변화를 실증실험을 하기 위하여 부하용량 P_L 을 1~5[kW]로 선정하였다. 인체저항 R_b 은 IEEE Std 81.2-1991의 실험권고사항을 동일하게 적용하였다[5].

3. 결과 및 검토

3.1. PEN도체 단선 시 접촉전압

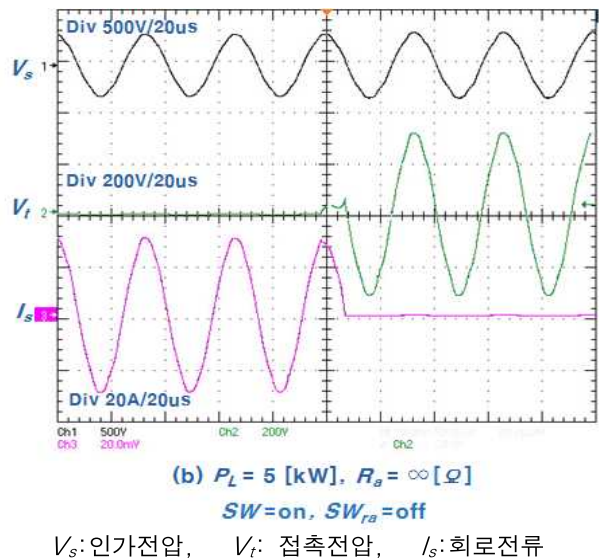
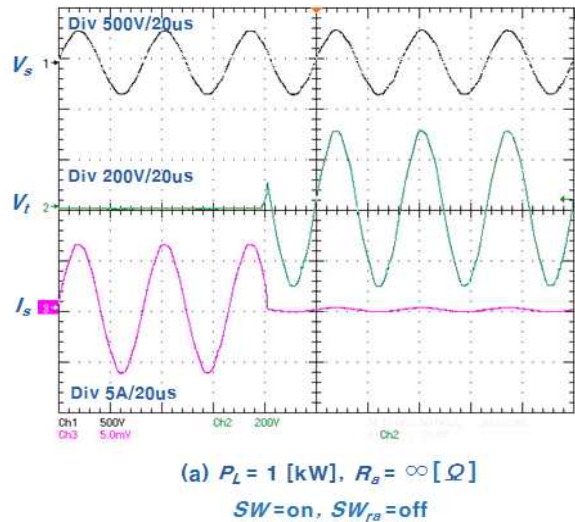


그림 4. PEN도체 단선 시 접촉전압 V_i 의 파형
Fig. 4. Wave forms of the touch voltages when PEN conductor is disconnected

TN-C-S방식 저압 전원계통에서 PEN도체가 단선된 경우, 전압 검출회로인 인체임피던스에 걸리는 접촉전압의 파형의 예를 그림 4에 나타내었다.

PEN도체가 단선되면 PE도체가 노출도전성 부분인 부하 P_L 의 외함을 접속하기 때문에 거의 인가전압 V_s 220[V]에 상응하는 접촉전압이 인체임피던스모델 R_p 에 인가되는 결과를 초래하는 것을 보여준다. 수용가에서 사용하는 부하전력 P_L 이 감소하면 접촉전압 V_t 이 다소 줄어들기는 하나 거의 상전압 V_s 에 가까운 접촉전압 V_t 이 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 5는 PEN도체가 단선 시, 전원전압 V_s 220[V]일 때, 1[kW]에서 5[kW]까지 부하전력 P_L 의 증가에 따라 인체임피던스모델 R_p 에 발생하는 접촉전압 V_t 이 증가하고 있다. 부하저항 R_L 의 관점에서 보면, 부하저항 R_L 이 50[Ω]에서 10[Ω]으로 감소함에 따라서 다소 접촉전압 V_t 이 높아지기는 하지만 210[V]에서 220[V] 사이의 부하에서 매우 작은 전압강하를 보여주고 있다. 결론적으로 부하의 크기에 관계없이 상전압 V_s 과 거의 같은 크기의 접촉전압 V_t 이 인체저항모델에 발생했다. 이것은 PEN도체 단선 시 적절한 보호 대책이 없는 TN-C-S방식의 저압전원계통은 인체안전을 보장할 수 없기 때문에 절대 사용을 금지해야 한다는 것을 보여준다.

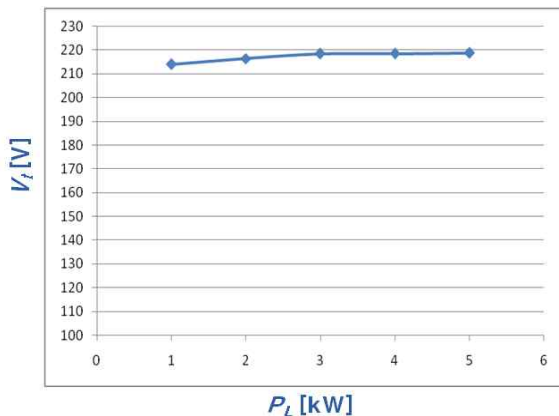
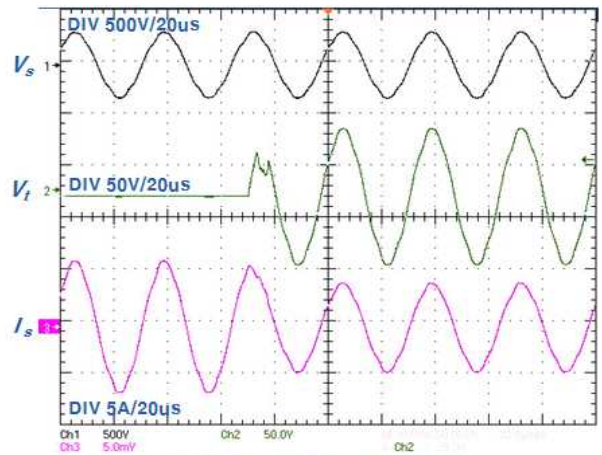
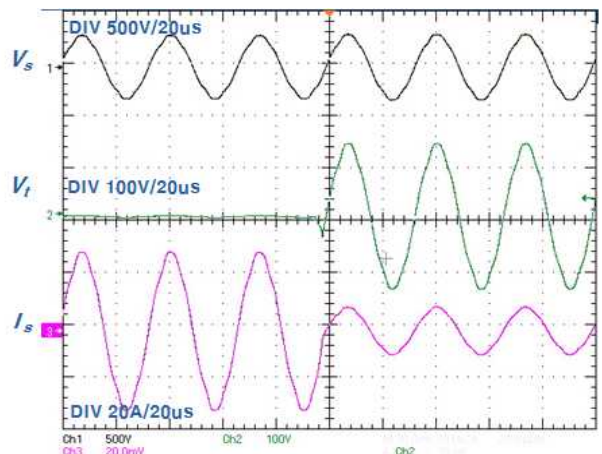


그림 5. 수용가 인입구에서 추가접지를 시설하지 않은 경우 부하전력에 따른 접촉전압의 변화추세
 Fig. 5. Trends of the touch voltage variation as a function of load power when the neutral line was not grounded additionally

3.2 추가접지를 한 경우 PEN 도체 단선시 접촉전압



(a) $P_L = 1$ [kW], $R_a = 18$ [Ω]
 $SW=on$, $SW_{ra}=on$



(b) $P_L = 5$ [kW], $R_a = 18$ [Ω]
 $SW=on$, $SW_{ra}=on$

V_s : 인가전압, V_t : 접촉전압, I_s : 회로전류

그림 6. PEN도체의 단선 시 접촉전압 V_t
 Fig. 6. Waveforms of the touch voltages when PEN conductor is disconnected

그림 2에서 SW_{ra} 를 연결시켜서 수용가 인입구에서 추가접지를 시설한 경우를 모의한 실험회로를 구성하였다. 그림 6은 TN-C-S 접지방식의 전원계통에서 수용가 인입구에 추가접지저항 $R_a=18$ [Ω]인 경우 PEN도체의 단선 시에 나타나는 접촉전압파형의 예를 보

TN-C-S계통에서 PEN도체 단선이 인체안전에 미치는 영향

여주고 있다. 추가접지를 하지 않은 때에 비해서 접촉 전압이 대폭 낮아지고, 부하용량에 따라서 변동이 크다는 것을 확인할 수 있다.

TN-C-S방식 저압전원계통에서 수용가 인입구에서 접지저항을 18[Ω]으로 추가로 접지한 후 PEN도체의 단선 시에 발생하는 접촉전압의 추세를 부하용량의 변화를 그림 7에 나타내었다.

그림 7을 보면 추가접지 $R_g=18[\Omega]$ 을 매설하는 경우 부하전력 P_L 이 1[kW] 이하인 경우는 접촉전압 V_t 이 50[V] 이하가 되어서 안전전압을 유지하는 것을 알 수 있다. 하지만 부하전력이 약 1.2[kW] 이상으로 증가하는 경우는 다시 안전전압 50[V] 이상의 접촉전압 V_t 이 인체임피던스 모델 R_b 에 걸리기 때문에 인체에 위험을 초래하는 것을 알 수 있다.

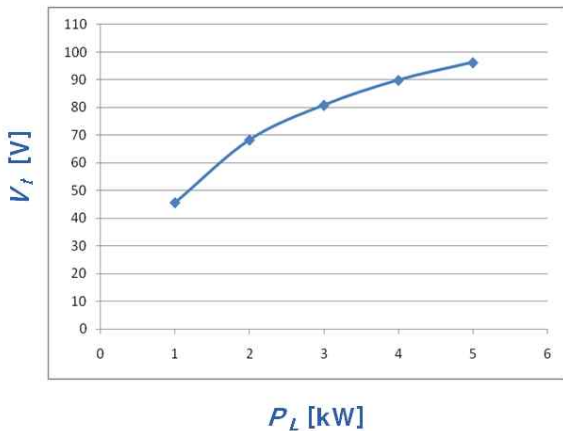


그림 7. 수용가 인입구에서 추가접지를 한 경우 부하전력에 따른 접촉전압의 변화추세

Fig. 7. Trend of the touch voltage variation as a function of load power when the neutral line was additionally grounded at the customer's entrance

3.3 모델링

3.3.1 등가회로 모델의 구성

제3.1절과 제3.2절에서 기술된 PEN도체 단선 실험을 모델링을 통하여 다양한 조건에서 사용할 수 있는 시뮬레이션의 구현이 가능한지를 검토하였다. 실제 현장에서 접지 설비의 설계에 적용이 가능하

도록 그림 2의 실험 회로를 저항레벨의 차원으로 수용가 인입구에 추가접지된 경우의 등가회로 모델을 구현하였다.

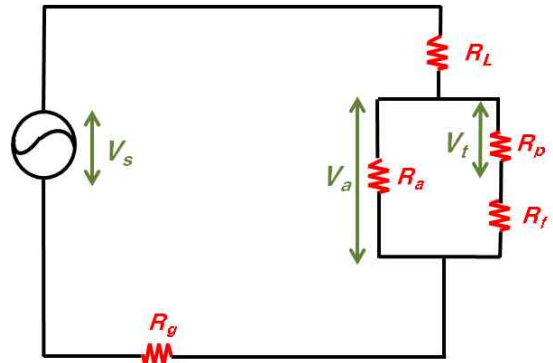


그림 8. 등가회로 모델

Fig. 8. Equivalent circuit model

3.3.2 추가접지저항과 부하전력의 관계

인체의 모델인 검출회로의 접촉전압 V_t 은 식 (2)와 같이 표현되며, 추가접지를 하지 않은 경우는 R_a 를 무한대로 하면 된다.

$$V_a = \frac{R_a \parallel (R_p + R_f)}{R_L + (R_a \parallel (R_p + R_f)) + R_g} \cdot V \quad (1)$$

$$V_t = \frac{R_p}{R_p + R_f} \cdot V_a \quad (2)$$

3.3.3 모델링 결과

수용가 인입구에 추가접지를 시설하지 않은 경우와 추가접지를 시설한 경우 부하전력에 따른 접촉전압의 변화를 그림 9에 나타내었으며, 대체적으로 실험결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

이 모델링한 결과는 안전율을 보장하는 오차 범위 안에서 실증실험의 결과와 동일한 추세를 보여준다. 즉, 임피던스 차원이 아닌 저항레벨의 단순화한 본 모델을 실제 접지설계에 적용할 수 있다는 것이 증명되었다.

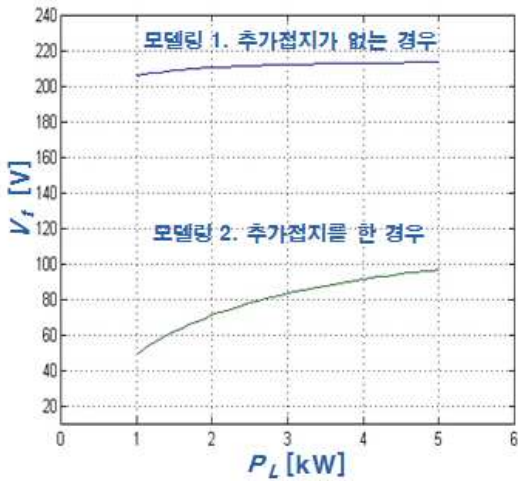


그림 9. 모델링 결과
Fig. 9. Modeling results

3.4 검토

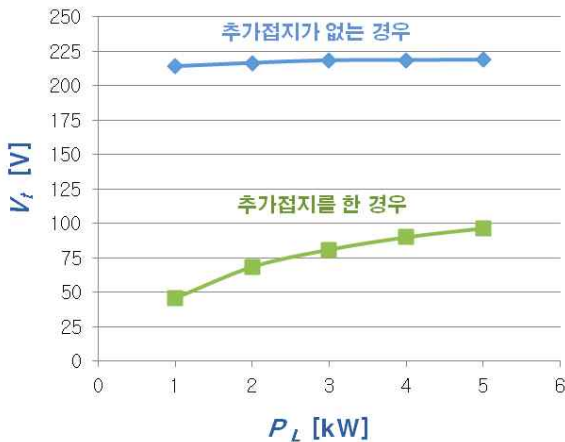


그림 10. 추가접지가 없는 경우와 추가접지를 한 경우의 실험결과 비교
Fig. 10. Comparison between non neutral line experiment and grounded neutral line experiment

TN-C-S 저압전원계통에 추가접지 R_a 를 시설하지 않은 경우와 시설한 경우 부하의 변동에 따라 측정된 접촉전압을 비교한 것이을 그림 10에 나타내었다. 추가접지 R_a 를 시설하지 않은 경우에는 부하용량 P_L 을 1[kW]~5[kW]까지 변화를 시켜도 상전압 V_s 과 같은

접촉전압 V_t 이 인체임피던스모형 R_b 에 발생하는 것을 알 수 있다. 그에 반하여 추가접지를 접지저항 18[Ω]으로 시설한 경우에는 부하용량 P_L 의 변화에 따라 접촉전압 V_t 의 변화폭이 크게 변화하며 추가접지를 시설하지 않은 실험의 결과보다 훨씬 낮은 접촉전압 V_t 이 인체임피던스모형에 발생한다.

이것은 TN-C-S방식의 저압전원계통을 사용할 경우에 감전사고를 예방하기 위해서는 반드시 부하전력에 상응하는 추가접지를 시설해야 한다. 즉 부하전력에 따라 적절한 접지저항으로 수용가 인입구에 추가접지를 시설할 때 인체의 안전을 확보할 수 있다는 것이 증명되었다.

4. 결론

우리나라의 저압 전원계통의 경우 대부분이 TT방식을 사용해 왔다. 하지만 다양한 용도와 상황에 따른 유연한 저압수용가를 설계하기 위하여 TN방식의 도입요구가 증가하고 있다. 이러한 세계적인 추세에 맞추어 TN-C-S방식을 사용하는 경우에 인체의 안전을 확보할 수 있는지의 여부가 최우선적으로 검증되어야 한다.

TN-C-S 방식의 저압 전원계통은 PEN도체가 단선이 되는 경우 부하의 용량이 증가 즉, 부하저항값 R_L 이 감소함에 따라 접촉전압이 증가한다. 추가접지 R_a 를 시설하지 않은 상태에서 단선사고가 발생하는 경우에는 상전압에 가까운 접촉전압 V_t 이 PE도체를 경유하여 노출도전성 부분인 부하의 외함에 발생하기 때문에 추가접지 R_a 의 시설이 없을 경우에는 절대 사용을 금지해야 한다.

References

- [1] Bok-Hee Lee, Seung-Chil Lee, "The Major Foundational Technics for Grounding Systems, Uijae Ltd. pp.1-197, 1999.
- [2] KSC Standard, IEC 60364-1, Electrical Installations of buildings - Part 1: Fundamental principle, assessment of general characteristics, definitions, pp.6-14, 2009.
- [3] KS C IEC 60364-5-54: Electrical Installations of buildings - Part 5-54: Selection and election of electrical

equipment - Earthing arrangements, protective conductors and protective bonding conductors, pp. 1-8, 2009.

- [4] Kyu-Sun Lee, "Hazards and Solutions of Loss of the PEN Conductor in Low Voltage Distribution System", Master's thesis in Inha university graduate school, pp. 9-26, 2006.
- [5] IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", IEEE Inc., pp.17-31, 1991.
- [6] IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", IEEE Inc., pp.17-31, 1991.

◇ 저자소개 ◇



김정철 (金正徹)

1978년 6월 18일생. 2006년 인하대학교 전자전기공학부 졸업. 인하대학교 전기공학과 졸업(석사). 2006년 한국내셔널인스트루먼트 근무. 2008년 현대엘리베이터 전기설계부 근무.

Tel : (070)8882-6740

Fax : (032)863-5822

E-mail : morphis6@naver.com



이규선 (李圭善)

1954년 9월 17일생. 2006년 2월 인하대 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



이복희 (李福熙)

1954년 6월 23일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재

인하대 IT공대 전기공학과 교수. 본 학회 명예회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr