

IEC 60364의 접지방식에 기반한 안전성 평가 시험장치의 모델링 및 구현에 관한 연구

김순식, 한병길, 이후동, 페레이라 마리토, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

Modeling and Implementation of Safety Test Device for Grounding System Based on IEC 60364

Soon-Sik Kim, Byeong-Gill Han, Hu-Dong Lee, Marito Ferreira and Dae-Seok Rho*
Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 국내 접지방식은 2021년부터 IEC 60364에서 제시하는 접지방식을 새롭게 채택하고 있다. 이 접지방식은 인체 접촉사고 발생 시, 접촉전압과 통과전류에 대한 특성이 다양하게 나타날 수 있어, 인체에 대한 안전성 평가가 구체적으로 요구되고 있다. 또한, 한국전기안전공사나 대한전기협회에서 IEC 60364의 접지방식에 대한 안전기술 교육을 부분적으로 수행하고 있지만, 안전성을 평가할 수 있는 시험장치가 미흡하여, 전기안전관리자에 대한 교육이 어려운 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 IEC 60364의 접지방식별 안전성 평가를 수행할 수 있는 시험장치를 모델링하고, 이를 바탕으로 시험장치를 구현한다. 즉, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 계통 전원부, 접지방식별 시험장치부, 보조장치부로 구성된 안전성 평가 시험장치의 모델링을 제시하고, 계통전원부, TT접지방식 시험장치부, TN-S접지방식 시험장치부, 모니터링부로 구성된 안전성 평가 시험장치를 구현한다. 상기의 모델링과 시험장치를 이용하여, TT접지방식과 TN-S접지방식의 인체 안전성 특성을 분석한 결과, TT접지방식의 경우 고장점 임피던스가 0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]에서 인체 통과전류는 각각 104[mA], 87.4[mA], 35.5[mA]가 산정되었고, TN-S접지방식의 경우 54.9[mA], 4.1[mA], 0.4[mA]가 산정됨에 따라, TN-S접지방식이 TT접지방식에 비하여 감전에 대한 보호가 우수함을 알 수 있고, 저압수용가에서 사용 중인 TT 접지방식에서 TN-S 접지방식으로 전환하면 감전에 대한 보호성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract A novel grounding system, which is presented in IEC 60364, has been adopted since 2021. A safety evaluation for the human body on the grounding system is required due to the various characteristics of the touch voltage and current passing when the human body experiences an electric shock. The Korea Electrical Safety Corporation (KESCO) and Korea Electric Association (KEA) have been conducting a safety technical education on the grounding system. On the other hand, it is difficult to instruct the electrical safety manager because of a lack of safety evaluations for the test equipment on the grounding system. Therefore, this paper modeled and implemented a test device for a safety evaluation depending on the grounding system of IEC 60364. Namely, this paper presents the modeling of the test device for a safety evaluation using PSCAD/EMTDC S/W, which is composed of an AC grid section, a test device section on the grounding system, and a sub-device section. This paper implemented a test device for safety evaluation, which consisted of an AC grid section, TT grounding system section, TN-S grounding system section, and monitoring section. From the simulation and test results with the safety characteristics of the human body in the TT and TN-S grounding system, when the fault impedances are 0[Ω], 10[Ω], and 100[Ω], the currents passing through the human body in the TT grounding system are 104[mA], 87.4[mA], and 35.5[mA], respectively. The corresponding currents in the TN-S grounding system are 54.9[mA], 4.1[mA], and 0.4[mA], respectively. Based on the results, the protection performance for an electric shock to the human body in the TN-S system is better than the TT system. This can be improved when the existing grounding system is changed from the TT system to the TN-S system.

Keywords : IEC60364, Grounding System, TT, TN-S, Touch Voltage, Current Passing Through Human Body

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20206910100090)와 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 [S2854105] 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received March 8, 2021

Revised April 5, 2021

Accepted June 4, 2021

Published June 30, 2021

1. 서론

국내에 설치된 저압 전기설비는 접지종별에 따라 접지저항을 기준 값 이하로 제한하여 설치하고 있지만, 인체 및 전기기기 보호수준이 적합하지 판단하기 어려운 실정이다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위해, 국내 접지방식은 2021년부터 IEC 60364에서 제시하는 접지방식을 채택하고 있다[1-3]. 여기서, IEC 60364 접지방식은 설비의 노출 전도성 부분과 보호도체의 접속방식에 따라, TT 접지방식, TN 접지방식, IT 접지방식으로 분류된다. 이러한 접지방식에 따라 인체접촉사고 발생 시, 접촉전압과 통과전류에 대한 영향이 다양하게 나타날 수 있어, 인체에 대한 안전성 평가가 요구되고 있다[4-8]. 또한, 한국 전기안전공사나 대한전기협회에서 IEC 60364의 접지방식에 대한 안전기술 교육을 부분적으로 수행하고 있지만, 구체적으로 안전성을 평가할 수 있는 시험장치가 미흡하여, 전기안전관리자에 대한 교육이 어려운 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 IEC 60364의 접지방식별 안전성 평가를 수행할 수 있는 시험장치를 모델링 하고, 이를 바탕으로 안전성 평가 시험장치를 구현한다. 먼저, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 계통 전원부, 접지방식별 시험장치부, 보조장치부로 구성된 안전성 평가 시험장치의 모델링을 제시한다. 여기서, 계통 전원부는 수변전실과 분전반으로, 접지방식별 시험장치부는 접지저항 모의요소와 인체저항 모의요소로, 보조장치부는 선로 임피던스, 보호도체 임피던스로 구성한다. 상기의 모델링에 의한 특성을 바탕으로 계통 전원부, TT접지방식 시험장치부, TN-S접지방식 시험장치부, 모니터링부로 구성된 안전성 평가 시험장치를 구현한다. 여기서, 계통전원부는 수용가의 구내 배전계통을 축소하여 모의하고, TT 접지방식 및 TN-S 접지방식 시험장치부는 접지방식별 회로계통으로 구성하고, 모니터링부는 선로 임피던스 및 각 접지극의 저항 값을 설정하거나, 사고전류 및 인체 통과전류를 측정한다. 상기의 모델링과 시험장치를 이용하여, TT접지방식과 TN-S접지방식의 인체 안전성 특성을 분석한 결과, TN-S 접지방식이 TT접지방식에 비하여 감전에 대한 보호가 우수함을 알 수 있고, 따라서, 저압수용가에서 사용 중인 TT 접지방식에서 TN-S 접지방식으로 전환하면 감전에 대한 보호성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 제시한 안전성 평가 모델링과 시험장치의 유용성을 확인하였다.

2. 접지방식에 따른 인체안전특성

2.1 접지방식의 특성

IEC 60364에서 제시하고 있는 접지방식은 설비의 노출 전도성 부분과 보호도체의 접속방식에 따라, TT 접지방식, TN 접지방식, IT 접지방식으로 분류된다. 먼저, TT 접지는 Fig. 1과 같이 한 점을 직접접지 하고, 설비의 노출 전도성 부분은 전력계통의 접지극과 전기적으로 독립한 접지극으로 접속한다. 여기서, Fig. 1(a)와 같이 설비 전체에서 별도의 중성선이 있는 계통과, Fig. 1(b)와 같이 설비 전체에서 접지된 중성선이 없는 경우, 설비 내에서 PE의 추가 접지가 가능하다.

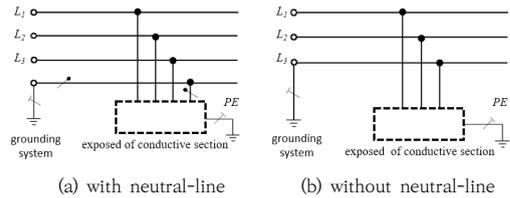


Fig. 1. Configuration of TT grounding system

또한, TN 접지는 Fig. 2와 같이 TN-S, TN-C, TN-C-S로 분류된다. 여기서, TN-S 접지는 Fig. 2(a)와 같이 계통 전체에 대해 별도의 보호도체를 사용하고, TN-C 접지는 Fig. 2(b)와 같이 계통 전체에서 중성선과 보호도체를 하나의 도체로 사용하며, TN-C-S는 Fig. 2(c)와 같이 계통의 일부에서 중성선과 보호도체의 기능을 단일 도체로 결합한 계통이다.

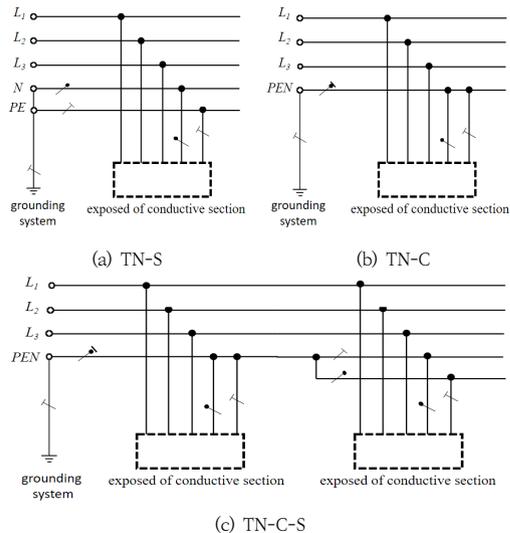


Fig. 2. Configuration of TN grounding system

한편, IT 접지는 Fig. 3과 같이 충전부 전체를 대지로부터 절연시키거나 임피던스를 삽입하여 대지에 접속시키는 방식이다. 여기서, Fig. 3(a)와 같이 설비 전체에서 별도의 중성선이 있는 계통의 경우와, Fig. 3(b)와 같이 설비 전체에서 접지된 중성선이 없는 경우, 설비 내에서 PE의 추가 접지가 가능하다.

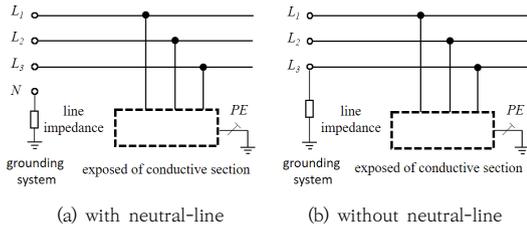


Fig. 3. Configuration of IT grounding system

상기의 접지방식의 특성에 따라, TT접지방식의 경우, 차단장치의 오동작으로 인해 인체에 영향을 미칠 수 있고, TN 접지방식은 사고전류가 큰 특징이 있으므로, 접지방식에 따른 안전성 평가가 요구된다. 한편, IT 접지방식은 저압 설비에서 적용된 사례가 적어 본 논문에서는 고려하지 않는다.

2.2 감전 사고시 인체통과 전류에 따른 안전특성

국제전기위원회(IEC)에서 제시한 인체통과전류에 따른 인체의 반응 곡선은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있으며, 통전시간과 인체통과전류의 크기에 따른 인체반응은 AC 1 ~ AC 4의 구간으로 구분된다[9]. 여기서, AC 1은 전류를 감지할 수 있지만, 인체에 생리학적 영향이 없는 구간이고, AC 2는 감지 및 비자의적인 근육수축이 일어날 수 있지만, 일반적으로 유해한 전기 생리학적 영향은 없는 구간이다. 한편, AC 3은 강한 비자의적인 근육수축,

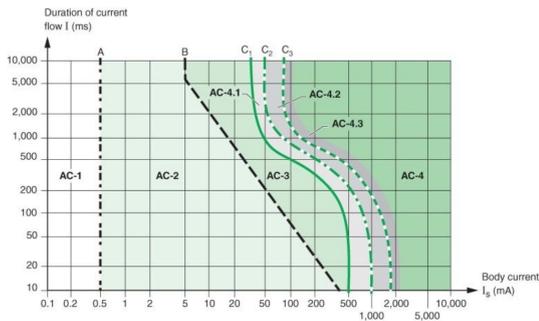


Fig. 4. Response curve of human body with current passing

호흡곤란, 회복 가능한 심장기능의 장애, 마비 등이 발생할 수 있는 구간이며, AC 4는 심장마비, 호흡정지, 화상, 세포의 손상 등의 병리생리학적인 영향을 일으킬 수 있는 구간이다.

따라서, 본 논문에서는 2.1절의 접지방식과 Fig. 4의 인체 반응곡선을 기반으로 인체를 통과하는 사고전류와 인체 접촉전압을 분석할 수 있는 안전성 평가용 시험장치를 모델링하고 이를 바탕으로 시험장치를 구현한다.

3. PSCAD/EMTDC에 의한 접지방식별 안전성 시험장치 모델링

3.1 계통 전원부 모델링

수변전실과 분전반으로 구성된 계통 전원부를 모델링 하면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 수변전실은 MOF반, $\Delta - Y_g$ 결선방식의 주변압기로 구성하고, 분전반은 누전차단기(ELB)와 전류계, 접지방식 전환용 스위치(MC)로 구성한다.

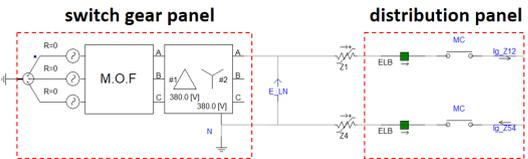


Fig. 5. Modeling of distribution system

3.2 접지방식별 시험장치부 모델링

접지방식별 시험장치부는 Fig. 6과 같이 접지 저항 모의요소와 인체저항 모의요소로 구성된다. 여기서, 접지저항 모의요소는 Fig. 6(a)와 같이 $E_{rA} \sim E_{rC}$ 저항으로 분류하며, E_{rA} 는 2종 접지 저항 값을 나타내고, E_{rB} 는 3종 접지저항 값, E_{rC} 는 철골 및 수도관 접지저항 값으로 상정한다. 또한, TT 접지방식은 접지 단자부의 접지극을 분리하고, TN-S 접지방식은 접지 단자부의 접지극을 통합하여 결선한다. 한편, 인체저항 모의요소는 Fig. 6(b)와 같이 기기 외함, 대지저항(R_g), 인체저항(R_b)으로 구성한다. 여기서, 기기 외함의 임피던스(R_f)는 완전 지락 사고(직접접촉)와 부분 지락사고(간접접촉)를 상정하여 산정하며, 대지저항 및 인체저항은 IEC 61200-413과 IEC 60479-1에 따라 산정한다.

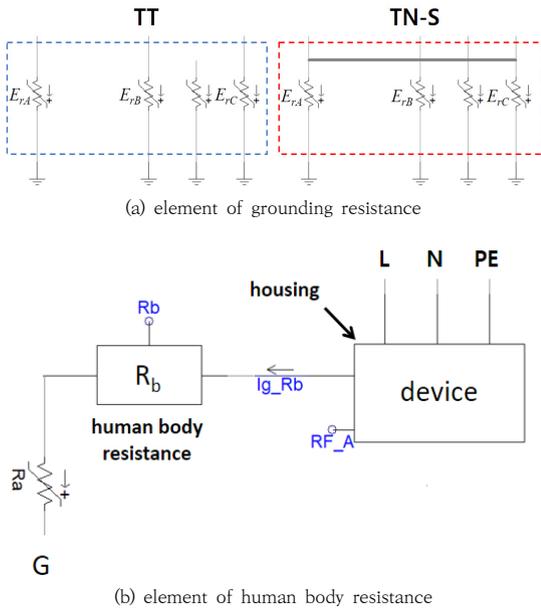


Fig. 6. Modeling of test device with grounding system

3.3 전체 시험장치 모델링

상기에서 제시한 모델링을 바탕으로, 안전성 시험장치의 전체 모델링은 Fig. 7과 같이 계통전원부, 접지방식별 시험장치부, 보조장치부로 나타낼 수 있다. 여기서, 보조장치부는 선로 임피던스($Z_1 \sim Z_6$), 보호도체 임피던스(Z_7, Z_8, Z_9)로 구성된다.

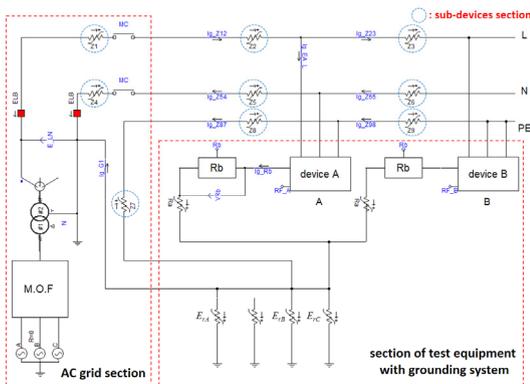


Fig. 7. Modeling of entire system

4. 접지방식별 안전성 시험장치의 구현

4.1 계통 전원부

접지 방식별 안전성 시험장치는 Fig. 8과 같이 수배전반과 분전반으로 구성되며, 수용가의 구내 배전계통을 축소하여 모의한다. 여기서, 수배전반은 변압기($\Delta - Y_0$)와 사고전류 측정용 누설전류계로 구성되고, 분전반은 30mA용 누전차단기와 전류계로 구성되는데, 고장전류, 인체 통과전류, 보호도체의 전류를 측정한다.

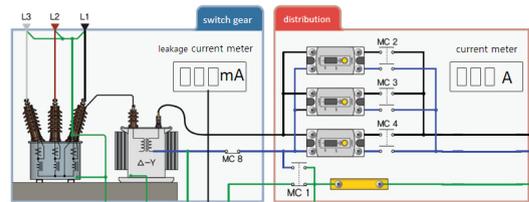


Fig. 8. Configuration of distribution system

4.2 TT 접지방식 시험장치부

TT접지방식에 의한 시험장치부는 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 접지저항 모의요소, 인체저항 모의요소로 구성되며, 분전함에서 분기되는 보호도체와 전기기기의 외함, 수도관 및 피뢰침을 각각 단독 접지 형태로 구성한다. 또한, 시험장치부의 회로도도 Fig. 10(a)와 같이 나타낼 수 있으며, 전압이 인가되면 Fig. 10(b)와 같이 등가회로를 구성할 수 있다. 여기서, 인체대상기기 A에 감전사고가 발생하면 고장전류(I_g)는 접지저항 모의요소 측 전류(I_{g1})와 인체저항 모의요소 측 전류(I_{g2})로 각각 분류되어 흐른다.

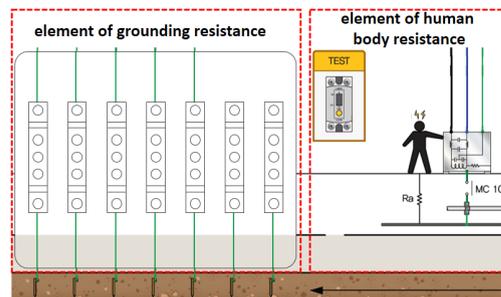
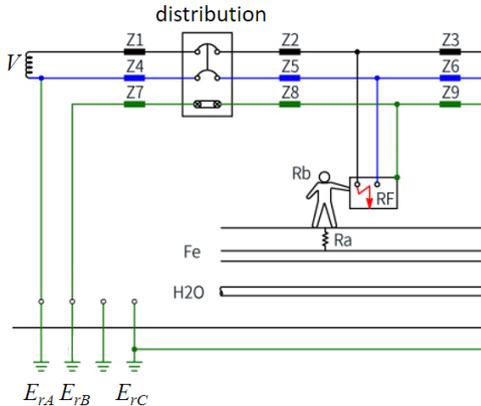
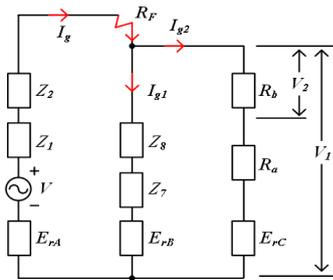


Fig. 9. Test device for TT grounding system



(a) circuit for test device



(b) equivalent circuit

Fig. 10. Circuit of test device for TT grounding system

상기에서 제시한 등가회로도를 바탕으로, 고장전류를 구하기 위한 합성 임피던스(Z)는 Eq. (1)과 같이 산정되며, 고장전류는 Eq. (2)와 같이 선로공급전압을 합성임피던스로 나누어 산정된다. 또한, 인체 통과전류(I_{g2})는 Eq. (3)과 같이 임피던스의 분담비를 통해 비율적으로 적용하여 산정된다. 한편, 인체 접촉전압(V_2)은 Eq. (4)와 같이 인체저항과 인체에 통과하는 전류를 곱하여 산정된다.

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_F + \frac{(Z_8 + Z_7 + E_{rB}) \times (R_b + R_a + E_{rC})}{(Z_8 + Z_7 + E_{rB}) + (R_b + R_a + E_{rC})} + E_{rA} \text{ [ohm]} \quad (1)$$

$$I_g = \frac{V}{Z_1 + Z_2 + Z_F + \frac{(Z_8 + Z_7 + E_{rB}) \times (R_b + R_a + E_{rC})}{(Z_8 + Z_7 + E_{rB}) + (R_b + R_a + E_{rC})} + E_{rA}} \text{ [A]} \quad (2)$$

$$I_{g2} = \frac{(Z_8 + Z_7 + E_{rB})}{(Z_8 + Z_7 + E_{rB}) + (R_b + R_a + E_{rC})} \times I_g \text{ [A]} \quad (3)$$

$$V_2 = R_b \times I_{g2} \text{ [V]} \quad (4)$$

여기서, Z : 합성임피던스[Ω], Z_1, Z_2 : 선로 임피던스[Ω], Z_F : 기기 외함 임피던스[Ω], Z_7, Z_8 : 보호도체 임피던스[Ω], R_a : 대지저항[Ω], R_b : 인체저항[Ω], I_g : 고장전류[A], I_{g2} : 인체 통과전류[A], V_2 : 인체 접촉전압[V]

4.3 TN-S 접지방식 시험장치부

TN-S 접지방식에 의한 시험장치부는 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 접지저항 모의요소, 인체저항 모의요소로 구성된다. 또한, 접지저항 모의요소에 공통접지바를 연결하여, 접지계통의 회로가 등전위 본딩이 되도록 구성된다. 또한, 시험장치부의 회로도도 Fig. 12(a)와 같이 나타낼 수 있으며, Fig. 12(b)와 같이 등가회로를 구성할 수 있다. 여기서, 인체대상기기 A에 감전사고가 발생하면 고장전류(I_g)는 접지저항 모의요소 측 전류(I_{g1})와 인체 통과전류(I_{g2})로 각각 분류되어 흐른다.

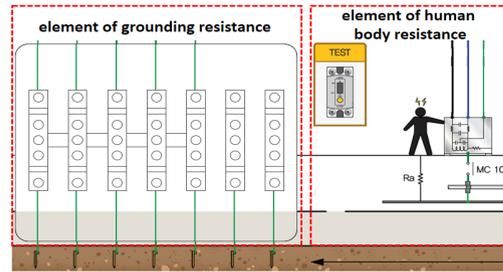
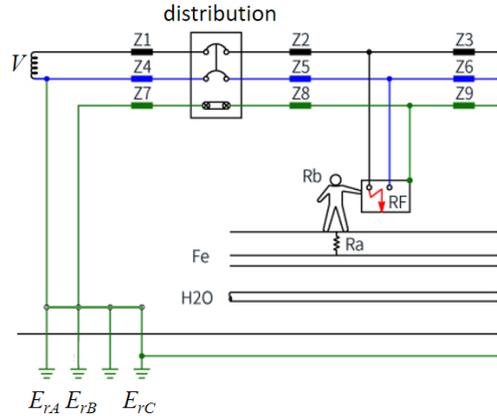
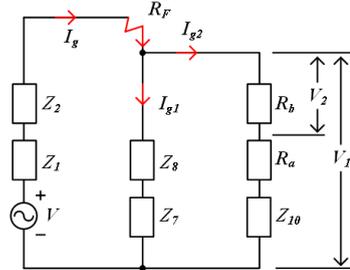


Fig. 11. Configuration of test device for TN-S grounding system



(a) circuit for test device



(b) equivalent circuit

Fig. 12. Circuit of test device for TN-S grounding system

상기에서 제시한 등가회로도를 바탕으로, 고장전류를 구하기 위한 합성 임피던스(Z)는 Eq. (5)와 같이 산정되며, 고장전류는 Eq. (6)와 같이 선로공급전압을 합성 임피던스로 나누어 산정된다. 또한, 인체 통과전류(I_{g2})는 Eq. (7)과 같이 임피던스의 분담비를 통해 비율적으로 적용하여 산정된다. 한편, 인체 접촉전압(V_2)은 Eq. (8)과 같이 인체저항과 인체로 통과하는 전류를 곱하여 산정된다.

$$Z = Z_1 + Z_2 + R_f + \frac{(Z_8 + Z_7) \times (R_b + R_a)}{(Z_8 + Z_7) + (R_b + R_a)} \text{ [ohm]} \quad (5)$$

$$I_g = \frac{V}{Z_1 + Z_2 + R_f + \frac{(Z_8 + Z_7) \times (R_b + R_a)}{(Z_8 + Z_7) + (R_b + R_a)}} \text{ [A]} \quad (6)$$

$$I_{g2} = \frac{(Z_8 + Z_7)}{(Z_8 + Z_7) + (R_b + R_a)} \times I_g \text{ [A]} \quad (7)$$

$$V_2 = R_b \times I_{g2} \text{ [V]} \quad (8)$$

여기서, Z : 합성 임피던스[Ω], Z_1, Z_2 : 선로 임피던스[Ω], Z_f : 기기 외함 임피던스[Ω], Z_7, Z_8 : 보호도체 임피던스[Ω], R_a : 대지저항[Ω], R_b : 인체저항[Ω], I_g : 고장전류[A], I_{g2} : 인체 통과전류[A], V_2 : 인체 접촉전압[V]

4.4 전체시스템 구현

상기에서 제시한 구성을 바탕으로, 안전성 시험장치의 전체 시스템을 구현하면 Fig. 13과 같이 계통전원부, TT 접지방식 시험장치부, TN-S접지방식 시험장치부, 모니터링부로 구성된다. 여기서, Fig. 13의 A section은 계통전원부를 나타내고, B section은 접지방식별 시험장치부(TT, TN-S), C section은 모니터링부를 나타낸다. 여기서, 모니터링부는 선로 임피던스 및 각 접지극의 저항값을 설정하거나, 사고전류 및 인체 통과전류를 측정한다.

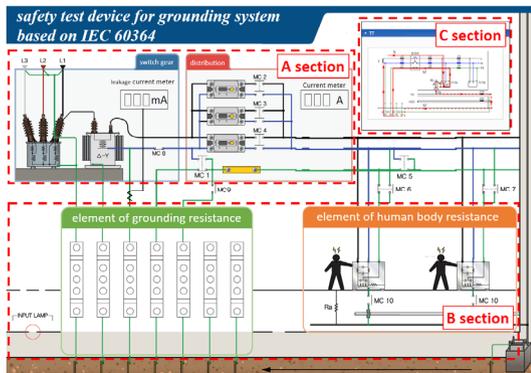


Fig. 13. Entire configuration of test device

5. 시뮬레이션 및 시험 결과 분석

5.1 시뮬레이션 및 시험조건

접지방식별 안전성 평가를 수행하기 위한 시뮬레이션 및 시험조건은 Fig. 14와 같이 변압기에서 분전반과의 거리를 10m, 분전반에서 인체감전 대상기 까지의 거리는 20m, 대상기에서 접지단자부까지의 거리는 30m로 상정한다. 또한, 각 구성부의 임피던스는 Table 1과 같고, 케이블의 저항 값은 제조사의 규격을 참고하여 3.08(Ω/Km)를 적용한다. 한편, 접지저항 모의요소는 저항 $E_{rA} \sim E_{rC}$ 로 분류하며, 저항 E_{rA} 는 2종 접지 저항 값인 2[Ω], 저항 E_{rB} 는 3종 접지 저항 값인 100[Ω], 저항 E_{rC} 는 철골 및 수도관 접지 저항 값인 3[Ω]으로 상정한다. 또한, 인체저항 모의요소의 경우 대지저항(R_a)과 인체저항(R_b)은 각각 1000[Ω]을 적용하고 고장점 임피던스(R_f)는 기기의 직접접촉 또는 간접접촉에 의해 발생되는 사고를 고려하여 0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]으로 상정한다.

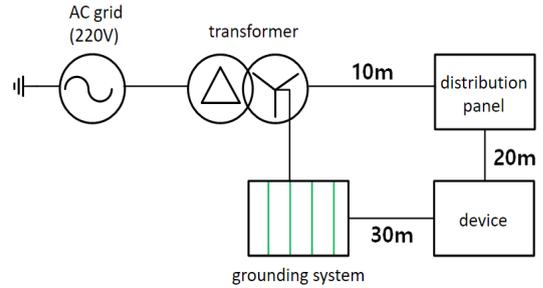


Fig. 14. Concept for simulation and test device

Table 1. Simulation and test conditions

items		contents
line impedances ($Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$)		0.031(10m/line)
impedances of PE conductor (Z_7, Z_8, Z_9)		0.031(10m/line)
element of grounding resistance	E_{rA}	2[Ω]
	E_{rB}	100[Ω]
	E_{rC}	3[Ω]
element of human body resistance	grounding resistance (R_a)	1000[Ω]
	resistance of human body (R_b)	1000[Ω]
	fault impedances (R_f)	0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]

5.2 모델링에 의한 접지방식별 안전성 특성분석

5.2.1 TT 접지방식의 특성

Fig. 14에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로 인체감전 대상기기(A)의 고장점 임피던스(R_F)가 $0[\Omega]$, $10[\Omega]$, $100[\Omega]$ 인 경우, 인체 통과전류는 Fig. 15(a), 15(b), 15(c)와 같이, 각각 $104[\text{mA}]$, $87.4[\text{mA}]$, $35.5[\text{mA}]$ 가 산정됨을 알 수 있다. 따라서, $0[\Omega]$ 인 경우의 인체 통과전류는 Fig. 4의 AC-3 구간에 적용되어, 인체에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있고, $10[\Omega]$ 과, $100[\Omega]$ 은 AC-2구간에 적용되어, 인체에 영향을 미칠 수 있지만 유해한 전기 생리학적 영향이 없음을 알 수 있다.

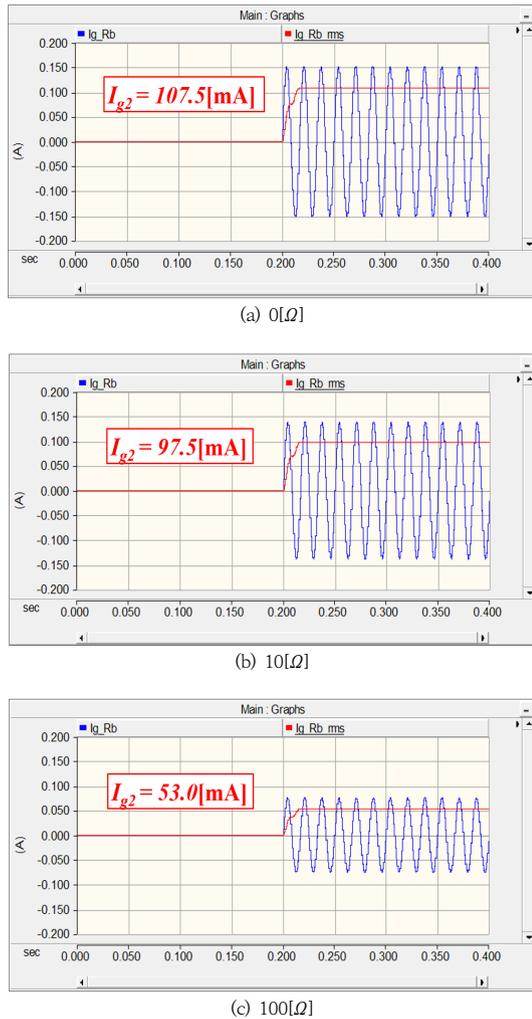


Fig. 15. Current passing through human body in TT grounding system

한편, 고장점 임피던스(R_F)가 $0[\Omega]$, $10[\Omega]$, $100[\Omega]$ 인 경우, 인체 접촉전압은 Fig. 16(a), 16(b), 16(c)와 같이 각각 $107.5[\text{V}]$, $97.5[\text{V}]$, $53.0[\text{V}]$ 로 산정됨을 알 수 있다. 따라서, 고장점 임피던스(R_F)가 $0[\Omega]$, $10[\Omega]$, $100[\Omega]$ 인 경우, 접촉전압이 $50[\text{V}]$ 이상이 되어 IEC 60479에서 요구하는 접촉전압을 초과함으로 인체에 악영향을 미침을 알 수 있다.

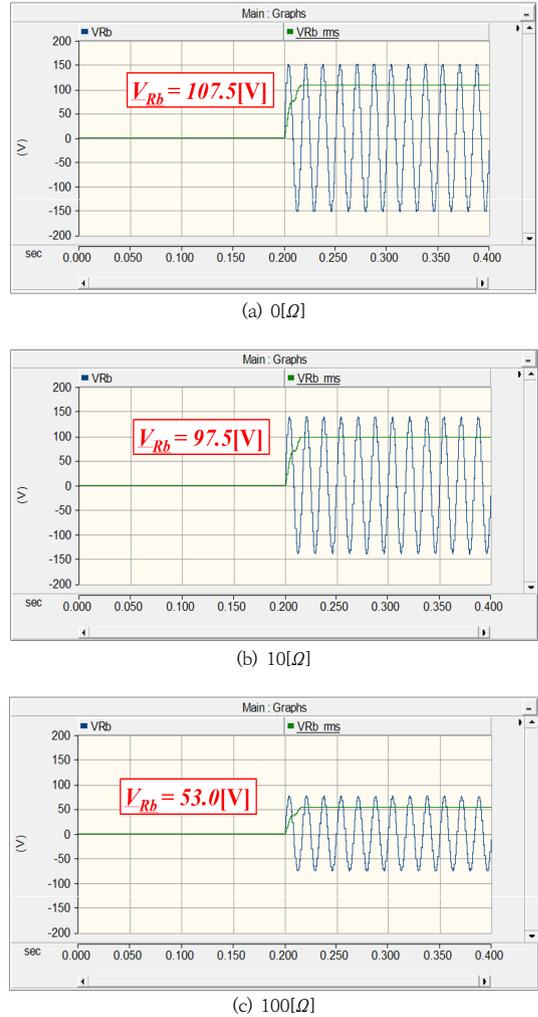
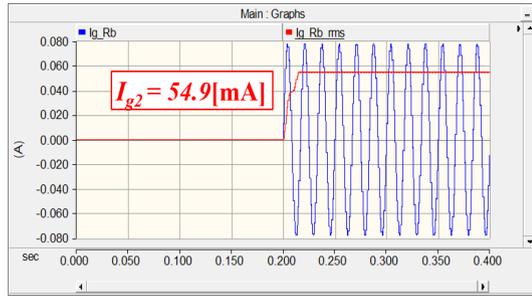


Fig. 16. Touch voltage of human body in TT grounding system

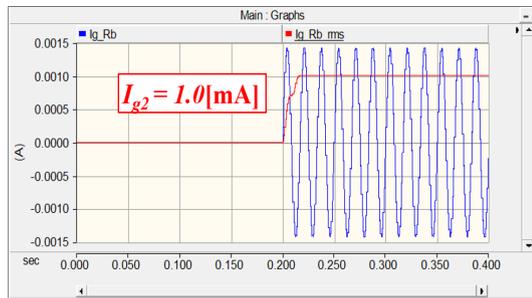
5.2.2 TN-S 접지방식의 특성

Fig. 14에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로 인체감전 대상기기(A)의 고장점 임피던스(R_F)가 $0[\Omega]$, $10[\Omega]$, $100[\Omega]$ 인 경우, 인체 통과전류는 Fig. 17(a), 17(b),

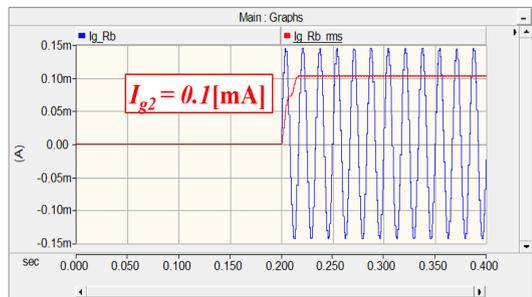
17(c)와 같이 각각 54.9[mA], 4.1[mA], 0.4[mA]가 산정됨을 알 수 있다. 따라서, 0[Ω]인 경우 인체 통과전류는 Fig. 4의 AC-2 구간에 적용되어 인체에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있고, 10[Ω]과 100[Ω]의 인체 통과전류는 AC-1구간에 적용되어, 인체에 영향이 없음을 알 수 있다.



(a) 0[Ω]



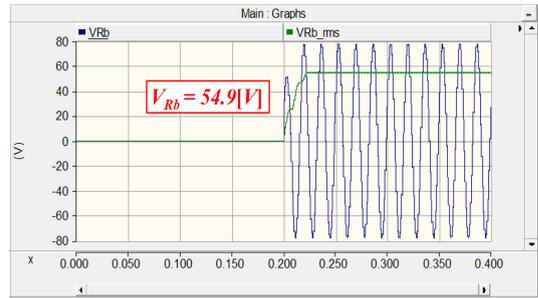
(b) 10[Ω]



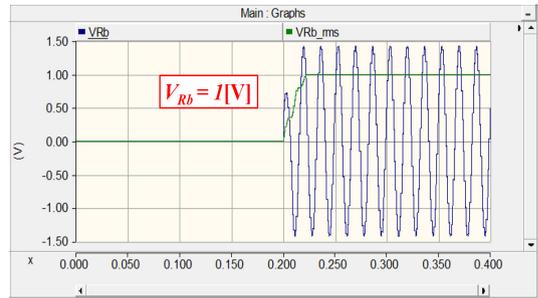
(c) 100[Ω]

Fig. 17. Current passing through human body in TN-S grounding system

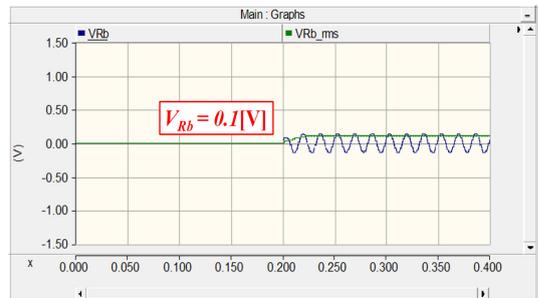
한편, 고장점 임피던스(R_f)가 0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]인 경우, 인체 접촉전압은 Fig. 18(a), 18(b), 18(c)과 같이 각각 54.9[V], 1.0[V], 0.1[V]로 산정됨을 알 수 있다. 따라서 고장점 임피던스(R_f)가 0[Ω]인 경우, 접촉전압이 50[V]이상이 되어 IEC 60479에서 요구하는 접촉전압을 초과함으로 인체에 악영향을 미침을 알 수 있다.



(a) 0[Ω]



(b) 10[Ω]



(c) 100[Ω]

Fig. 18. Touch voltage of human body in TN-S grounding system

5.3 시험장치에 의한 접지방식별 안전성 특성분석

5.3.1 TT 접지방식의 특성

본 논문에서 제시한 시험장치 및 시험조건을 바탕으로 인체 대상기기(A)의 고장점 임피던스(R_f)가 0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]인 경우, 사고전류는 Fig. 19와 같이 선로 임피던스 Z_1 과 Z_2 를 통과하여 인체 대상기기(A)로 흐르고, 외함 접지선(PE)을 통해 접지극($E_{r,A}$, $E_{r,B}$)으로 유입되는 전류와 인체 대상기기(A)에 접촉한 인체를 통과한 후 접지극($E_{r,C}$)으로 흐르는 것을 알 수 있다. 또한, 인체 통과전류를 구하면 Table 2와 같이 각각 107.4[mA], 97.5[mA], 53.4[mA]가 산정됨을 알 수 있다.

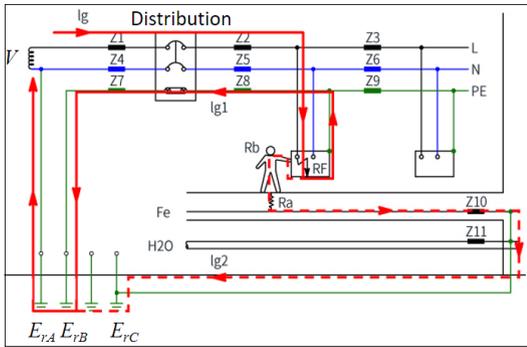


Fig. 19. Configuration of fault current flow in TT grounding system

Table 2. Current passing through human body in TT grounding system

impedances at fault point (R_F)	fault current (I_g)	current passing through human body (I_{g2})
0[Ω]	2.26[A]	107.4[mA]
10[Ω]	2.05[A]	97.5[mA]
100[Ω]	1.11[A]	53.4[mA]

한편, 고장점 임피던스(R_F)가 0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]인 경우, 인체 접촉전압은 Table 3와 같이, 109.1[V], 90.2[V], 35.3[V]로 산정됨을 알 수 있다. 따라서, 고장점 임피던스(R_F)가 0[Ω], 10[Ω],인 경우, 접촉전압이 50[V]이상이 되어 IEC 60479에서 요구하는 접촉전압을 초과함으로 인체에 악영향을 미침을 알 수 있다.

Table 3. Touch voltage of human body in TT grounding system

impedances at fault point (R_F)	fault current (I_g)	touch voltage (V)
0[Ω]	2.26[A]	107.5[V]
10[Ω]	2.05[A]	97.5[V]
100[Ω]	1.11[A]	53.4[V]

5.3.2 TN-S 접지방식의 특성

TN-S 접지방식에서 인체 대상기기(A)의 고장점 임피던스(R_F)가 0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]인 경우, 사고전류는 Fig. 20과 같이 선로 임피던스 Z_1 과 Z_2 를 통과하여 인체

대상기기(A)로 흐르고, 외함 접지선(PE)을 통해 접지극(E_{rA} , E_{rB})으로 유입되는 전류와 인체대상기기(A)에 접촉한 인체를 통과한 후 접지극으로 흐르는 것을 알 수 있다. 또한, 인체 통과전류를 구하면 Table 4와 같이 각각 54.9[mA], 1[mA], 0.1[mA]가 산정됨을 알 수 있다.

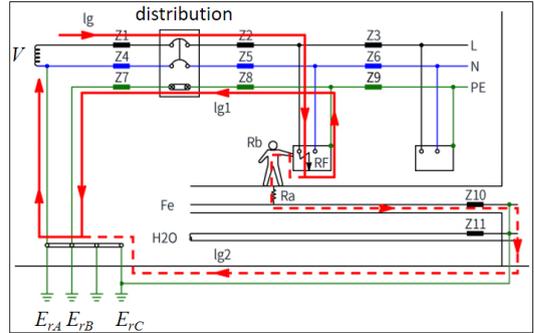


Fig. 20. Configuration of fault current flow in TN-S grounding system

Table 4. Current passing through human body in TN-S grounding system

impedances at fault point (R_F)	fault current (I_g)	current passing through human body (I_{g2})
0[Ω]	1182.8[A]	54.9[mA]
10[Ω]	21.6[A]	1.0[mA]
100[Ω]	2.2[A]	0.1[mA]

한편, 고장점 임피던스(R_F)가 0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]인 경우, 인체 접촉전압은 Table 5와 같이, 54.9[V], 1.0[V], 0.1[V]로 산정됨을 알 수 있다. 따라서 고장점 임피던스(R_F)가 0[Ω]인 경우, 접촉전압이 50[V]이상이 되어 IEC 60479에서 요구하는 접촉전압을 초과함으로 인체에 악영향을 미침을 알 수 있다.

Table 5. Touch voltage of human body at TN-S grounding system

impedances at fault point (R_F)	fault current (I_g)	touch voltage (V)
0[Ω]	1182.8[A]	54.9[V]
10[Ω]	21.60[A]	1.0[V]
100[Ω]	2.20[A]	0.1[V]

5.4 종합분석

상기의 시뮬레이션 결과와 시험장치의 결과를 분석하면 Table 6과 같이 거의 동일한 값을 산정 할 수 있어, 본 연구에서 제시한 모델링과 시험장치의 유효성을 알 수 있었다.

Table 6. Characteristics of current passing through human body and touch voltage in grounding system

impedances at fault point (R_f)		simulation results	test results	
current passing through human body (I_{f2})	TT	0[Ω]	107.5[mA]	107.4[mA]
		10[Ω]	97.5[mA]	97.5[mA]
		100[Ω]	53.0[mA]	53.4[mA]
	TN-S	0[Ω]	54.9[mA]	54.9[mA]
		10[Ω]	1.0[mA]	1.0[mA]
		100[Ω]	0.1[mA]	0.1[mA]
touch voltage (V)	TT	0[Ω]	107.5[V]	107.5[V]
		10[Ω]	97.5[V]	97.5[V]
		100[Ω]	53.0[V]	53.4[V]
	TN-S	0[Ω]	54.9[V]	54.9[V]
		10[Ω]	1.0[V]	1.0[V]
		100[Ω]	0.1[V]	0.1[V]

6. 결론

본 논문에서는 IEC 60364의 접지방식에 기반한 안전성 평가를 수행하기 위해, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC에 의한 모델링을 제시하고 안전성 평가 시험장치를 구현하여, 접지방식별 사고전류와 인체에 통과하는 전류 및 접촉전압의 특성을 분석하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서 제안한 모델링 및 시험장치를 바탕으로 인체 통과전류의 특성을 분석한 결과에 의하면, TT 접지방식의 경우 인체통과전류가 매우 높아 감전에 대한 보호 대책으로 누전차단기를 반드시 설치하여 안전을 확보해야 함을 알 수 있었다.
- (2) TN-S 접지방식의 경우, 인체 접촉전압은 50[V] 이상의 전위차가 발생되어, IEC 60479에서 요구하는 최대 허용접촉전압인 50[V]를 초과함을 알 수 있었다.
- (3) TN-S 접지방식에서는 인체 통과전류가 작아 사고

발생 시에도 인체에 미치는 영향이 없음을 알 수 있었다. 따라서, TN-S 접지방식이 TT 접지방식에 비하여 감전에 대한 보호가 우수함을 알 수 있었고, 저압수용가에서 사용 중인 TT 접지방식에서 TN 접지방식으로 전환하면 감전에 대한 보호성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] IEC 60364-4-41, "Low-voltage electrical installations - Part 4-42: Protection for safety - Protection against thermal effects", 2005
- [2] IEC 60364-4-41, "Korean Electrical Equipment Regulations to replace the judgment standard of the Electrical Equipment Technical Standard", The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 2018
- [3] J. C. Lee, "Technical standard introduction review status of IEC grounding standard", Proceedings of the KIEE Conference, pp. 536-542, 2010
- [4] Ki-Hong Lee, "Electric shock protection in IEC 60364", The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 21, no. 2, pp. 11-16, 2007
- [5] B. H. Lee, Y. C. Choi, J. D. Yoo, H. K. Shin, S. M. Yang, T. G. Kim, Z. C. Lee, "Performance Evaluation of Protection against Electric Shocks for TT and TN Systems", Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Conference, pp. 315-318, 2009
- [6] J. T. Kim, H. S. Kim, K. H. Lee, G. H. Lee., K. H. Shin, H. J. Lee, "The Improvement of Protection against Electric Shock to Introduced International Standards(IEC 60364-4-41)", Proceedings of the KIEE Conference, pp. 1629-1630, 2015
- [7] J. S. Jung, W. K. Han, O. H. Kim, J. C. Kim, "The Comparison and Analysis about Earth System based on IEC60364", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 24, no. 1, pp. 56-62, 2010
DOI: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2010.24.1.056>
- [8] D. H. Shin, Y. K. Kim, S. H.. Baek, E. Y. Lee, P. S. Kim, D. H. Cho, "The Comparison on Grounding Characteristics for 3 Grounding Systems", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 49, no. 6, pp. 289-297, 2000
- [9] Q. Yang, Z. Wang, L. Zhu, D. Zou, H. Guo, "Safety analysis of live working operators under zero potential", International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering, vol. 152, 2020
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015203011>

[10] D. U. Kim, M. H. Cho, H. S. Kim, D. S. Shin, K. H. Ryu, C. H. Kim, "Design and A Safety Analysis and Assessment of a Grounding System according to International Standards", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 29, no. 10, pp. 54-59, 2015
DOI: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2015.29.10.054>

[11] Massimo Mitolo, "Shock Hazard in the Presence of Protective Residual-Current Device", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 4, pp. 1552-1557, 2010
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2051068>

김 순 식(Soon-Sik Kim)

[준회원]



- 2019년 2월 : 한국폴리텍대학 전기과 (공학사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

접지시스템, 신재생에너지, 마이크로그리드

한 병 길(Byeong-Gill Han)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한밭대학교 전자제어공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 서울과학기술대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 8월 ~ 2020년 4월 : 한국화학융합시험연구원 연구원

- 2020년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력변환기, ESS, 신재생에너지, 마이크로그리드

이 후 동(Hu-Dong Lee)

[정회원]



- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

페레이라 마리토(Marito Ferreira)

[정회원]



- 2013년 2월 : 동티모르 국립대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력품질 해석, 분산전원, 전기저장장치

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석