

인체안전성 평가 시험장치의 모델링 및 구현에 관한 연구

김순식*, 김경화*, 황소연*, 정재범*, 노대석*
*한국기술교육대학교 전기공학부
e-mail:flowekim@hanmail.net

A Study on Modeling and Implementation of Safety Test Device for Human Body

Soon-Sik Kim*, Kyung-Hwa Kim*, So-Yeon Hwang*, Jae-Beom Jung*, Dae-Seok Rho*
*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

국내 접지방식은 2021년부터 IEC 60364에서 제시하는 접지방식을 새롭게 채택하고 있다. 이 접지방식은 인체접촉사고 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. 상기의 모델링과 시험장치를 이용하여, TT 접지방식과 TN-S 접지방식의 인체 안전성 특성을 분석한 결과, TN-S 접지방식이 TT 접지방식에 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.

1. 서론

국내에 설치된 저압 전기설비는 접지종별에 따라 접지저항을 기준 값 이하로 제한하여 설치하고 있지만, 인체 및 전기기기 보호수준이 적합한지 판단하기 어려운 실정이다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위해, 국내 접지방식은 2021년부터 IEC 60364에서 제시하는 접지방식을 채택하고 있다. 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. 또한, 한국전기안전공사나 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. 또한, 상기의 모델링에 의한 특성을 바탕으로

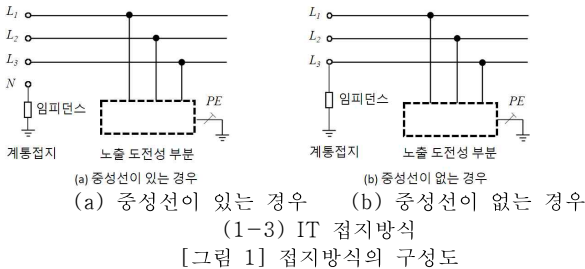
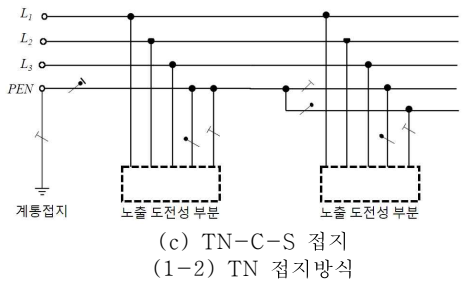
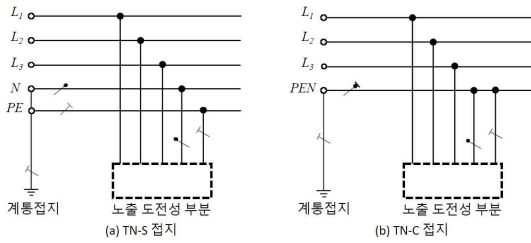
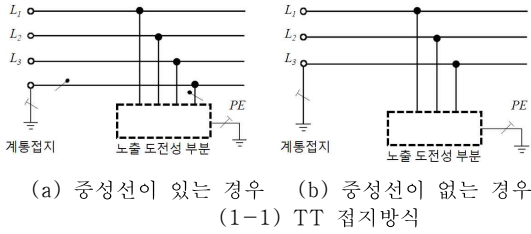
계통전원부, TT 접지방식 시험장치부, TN-S 접지방식 시험장치부, 모니터링부로 구성된 안전성 평가 시험장치를 구현한다. 상기의 모델링과 시험장치를 이용하여, TT 접지방식과 TN-S 접지방식의 인체 안전성 특성을 분석한 결과, TN-S 접지방식이 TT 접지방식에 비하여 감전에 대한 보호가 우수함을 알 수 있고, 저압수용가에서 사용 중인 TT 접지방식에서 TN-S 접지방식으로 전환하면 감전에 대한 보호성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 제시한 안전성 평가 모델링과 시험장치의 유용성을 확인하였다.

2. 접지방식에 따른 인체안전특성

2.1 접지방식의 특성

IEC 60364에서 제시하고 있는 접지방식은 그림 1과 같이 설비의 노출 전도성 부분과 보호도체의 접속방식에 따라, TN 접지계통, TT 접지계통 그리고 IT 접지계통으로 분류된다. 먼저, TN 접지계통은 그림 1-1과 같이 직접 접지된 전력계통의 접지극과 설비의 노출 도전성 부분을 보호도체로 접속하는 방식이며, TT 접지계통은 그림 1-2과 같이 설비의 노출 전도성 부분을 전력계통의 접지극과 전기적으로 독립된 접지극으로 접속하는 방식이다. 또한, IT 접지계통은 그림 1-3과 같이 충전부 전체를 대지로부터 절연시키거나 중간에 임피던

스를 삽입 하여, 대지에 접속 시키고 전기설비의 노출 도전성 부분을 단독 혹은 일괄로 접지시키거나 또는 계통의 접지로 접속하는 방식이다.

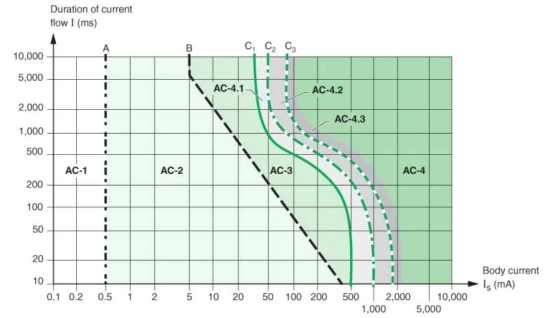


상기의 접지방식의 특성에 따라, TT 접지방식의 경우, 차단장치의 오동작으로 인해 인체에 영향을 미칠 수 있고, TN 접지방식은 사고전류가 큰 특징이 있으므로, 접지방식에 따른 안전성 평가가 요구된다. 한편, IT 접지방식은 저압 설비에서 적용된 사례가 적어 본 논문에서는 고려하지 않는다.

2.2 감전 사고시 인체통과 전류에 따른 안전특성

국제전기위원회(IEC)에서 제시한 인체통과전류에 따른 인체의 반응 곡선은 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며, 통전시간과 인체통과전류의 크기에 따른 인체반응은 AC 1 ~ AC 4의 구간으로 구분된다. 여기서, AC 1은 전류를 감지할 수 있지만, 인체에 생리학적 영향이 없는 구간이고, AC 2는 감지 및 비자의적인 근육수축이 일어날 수 있지만, 일반적으로 유해

한 전기 생리학적 영향은 없는 구간이다. 한편, AC 3은 강한 비자의적인 근육수축, 호흡곤란, 회복 가능한 심장기능의 장애, 마비 등이 발생할 수 있는 구간이며, AC 4는 심장마비, 호흡정지, 화상, 세포의 손상 등의 병리생리학적 영향을 일으킬 수 있는 구간이다.



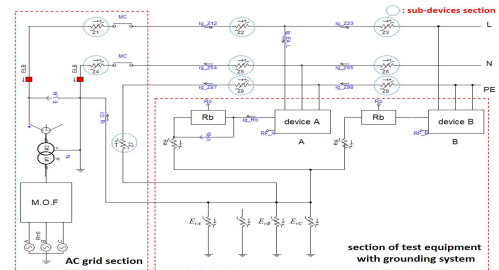
[그림 2] 인체 통과전류에 따른 인체의 반응곡선

따라서, 본 논문에서는 2.1절의 접지방식과 그림4의 인체 반응곡선을 기반으로 인체를 통과하는 사고전류와 인체 접촉 전압을 분석할 수 있는 안전성 평가용 시험장치를 모델링하고 이를 바탕으로 시험장치를 구현한다.

3. PSCAD/EMTDC에 의한 접지방식별 안전성 시험장치 모델링 및 구현

3.1 접지방식별 안전성 시험장치의 모델링

접지방식별 안전성 시험장치의 모델링은 그림 3과 같이 계통전원부, 접지방식별 시험장치부, 보조장치부로 나타낼 수 있다. 여기서, 계통전원부는 MOF반과, $\Delta-Y_g$ 결선방식의 주변압기로 구성하고, 분전반은 누전차단기(ELB)와 전류계, 접지방식 전환용 스위치(MC)로 구성한다. 또한, 접지방식별 시험장치부는 접지 저항 모의요소와 인체저항 모의요소로 구성하고, 보조장치부는 선로 임피던스($Z_1 \sim Z_6$), 보호도체 임피던스(Z_7, Z_8, Z_9)로 구성된다.

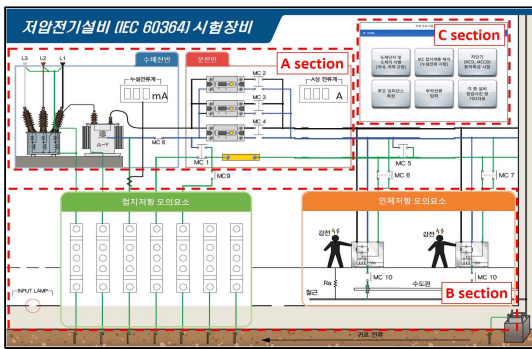


[그림 3] 시험장치 모델링

3.2 접지방식별 안전성 시험장치의 구현

접지 방식별 안전성 시험장치는 그림 4와 같이 A section

은 계통전원부를 나타내고, 수배전반과 분전반으로 구성되며, 수용가의 구내 배전계통을 축소하여 모의한다. B section은 접지방식별 시험장치부를 나타내고 접지저항 모의요소, 인체저항 모의요소로 구성되며, 분전함에서 분기되는 보호도체와 전기기기의 외함, 수도관 및 피뢰침을 각각 단독접지 형태로 구성한다, C section은 모니터링부를 나타내고, 선로 임피던스 및 각 접지극의 저항 값을 설정하거나, 사고전류 및 인체통과전류를 측정한다. 한편, TT접지방식은 분전함에서 분기되는 보호도체와 전기기기의 외함, 수도관 및 피뢰침을 각각 단독접지 형태로 구성하고, TN-S 접지방식은 접지저항 모의 요소에 공통접지바를 연결하여, 접지계통의 회로가 등전위 분당이 되도록 구성한다.



[그림 4] 시험장치 구현

4. 시뮬레이션 및 시험 결과 분석

4.1 시뮬레이션 및 시험조건

접지방식별 안전성 평가를 수행하기 위한 시뮬레이션 및 시험조건은 변압기에서 분전반과의 거리를 10m, 분전반에서 인체감전 대상기기 까지의 거리는 20m, 대상기기에서 접지단자부까지의 거리는 30m로 상정한다. 또한, 각 구성부의 임피던스 및 접지저항은 표 1과 같이 상정하고, 대지저항(R_a)과 인체저항(R_b)은 각각 1000[Ω]을 적용하며, 고장점 임피던스(R_F)는 기기의 직접접촉 또는 간접접촉에 의해 발생하는 사고를 고려하여 0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]으로 상정한다.

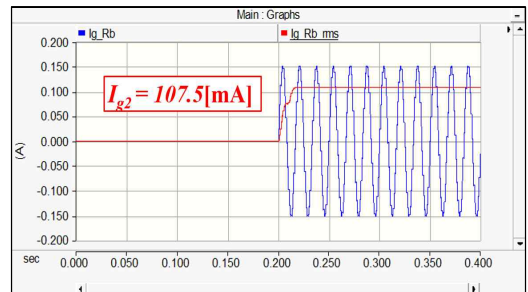
[표 1] 시뮬레이션 및 시험 조건

구분	내역	
선로 임피던스 ($Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$)	0.031(10m당)	
PE도체 임피던스 (Z_7, Z_8, Z_9)	0.031(10m당)	
접지저항 모의요소	E_{rA}	2[Ω]
	E_{rB}	100[Ω]
	E_{rC}	3[Ω]
인체저항 모의요소	대지저항(R_a)	1000[Ω]
	인체저항(R_b)	1000[Ω]
	고장점 임피던스(R_F)	0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]

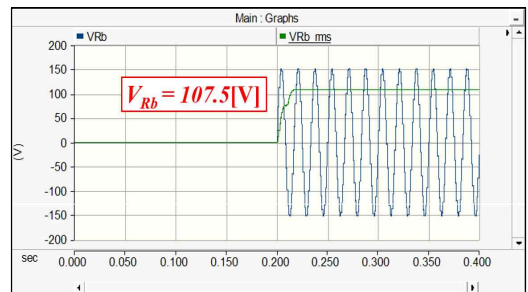
	[Ω]
--	-----

4.2 TT 접지방식의 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 인체감전 대상기기(A)의 고장점 임피던스(R_F)가 0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]인 경우, 인체 통과전류는 그림 5와 표 2와 같이, 산정됨을 알 수 있다. 따라서, 0[Ω]인 경우 국제전기위원회(IEC)에서 제시한 인체 통과전류에 따른 인체의 반응 곡선에 따라, 인체에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있고, 10[Ω]과, 100[Ω]은 인체에 영향을 미칠 수 있지만 유해한 전기 생리학적 영향이 없음을 알 수 있다. 또한, 고장점 임피던스(R_F)가 0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]인 경우, 접촉전압은 그림 6와 같이 50[V]이상이 되어 IEC 60479에서 요구하는 접촉전압을 초과하므로 인체에 악 영향을 미침을 알 수 있다.



[그림 5] TT 접지방식에서의 인체 통과전류



[그림 6] TT 접지방식에서의 접촉전압

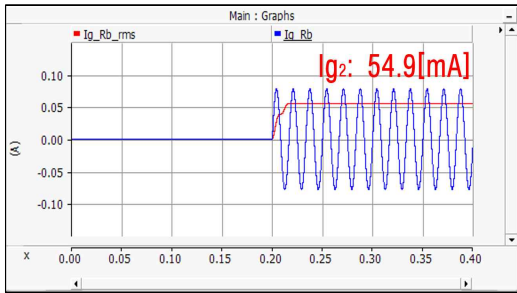
[표 2] TT 접지방식의 인체 통과전류 및 접촉전압의 특성

고장점 임피던스 (R_F)	시뮬레이션 결과	시험장치 결과
인체 통과전류 (I_{g2})	0[Ω]	107.5[mA]
	10[Ω]	97.5[mA]
	100[Ω]	53.0[mA]
인체 접촉전압 (V)	0[Ω]	107.5[V]
	10[Ω]	97.5[V]
	100[Ω]	53.0[V]

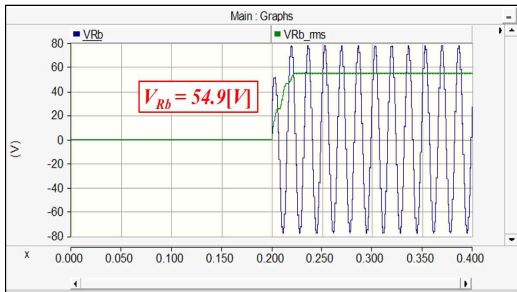
4.3 TN-S 접지방식의 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 인체감전 대상기기(A)의 고장점 임피던스(R_F)가 0[Ω], 10[Ω], 100[Ω]인 경우, 인체 통과전류는 그림 7과 표 3과 같이 산정됨을 알 수 있다. 따

라서, 0[Ω]인 경우 국제전기위원회(IEC)에서 제시한 인체통과전류에 따른 인체의 반응 곡선에 따라 인체에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있고, 10[Ω]과 100[Ω]의 인체 통과전류는 인체에 영향이 없음을 알 수 있다. 또한, 고장점 임피던스(RF)가 0[Ω]인 경우, 접촉전압은 그림 8과 같이 50[V] 이상이 되어 IEC 60479에서 요구하는 접촉전압을 초과하므로 인체에 악영향을 미침을 알 수 있다.



[그림 7] TN-S 접지방식에서의 인체 통과전류



[그림 8] TN-S 접지방식에서의 접촉전압

[표 3] TN-S 접지방식의 인체 통과전류 및 접촉전압의 특성

고장점 임피던스(R_F)	시뮬레이션 결과	시험장치 결과	
인체 통과전류 (I_{g2})	0[Ω]	54.9[mA]	54.9[mA]
	10[Ω]	1.0[mA]	1.0[mA]
	100[Ω]	0.1[mA]	0.1[mA]
인체 접촉전압 (V)	0[Ω]	54.9[V]	54.9[V]
	10[Ω]	1.0[V]	1.0[V]
	100[Ω]	0.1[V]	0.1[V]

5. 결 론

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 제시한다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

(1) 본 논문에서 제안한 모델링 및 시험장치를 바탕으로 인

체 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) TT 접지방식의 인체 접촉전압은 고장점 임피던스가 0 [Ω], 10[Ω], 100[Ω]에서 107.5[V], 97.5[V], 53.0[V]가 산정되어, IEC 60479에서 요구하는 최대 허용접촉전압인 50[V]를 초과함을 알 수 있었다.

(3) TN-S 접지방식의 경우, 인체통과전류는 인체에 미치는 영향이 없음을 알 수 있었고, 접촉전압은 고장점 임피던스가 0[Ω]에서 50[V]가 산정되어, IEC 60479에서 요구하는 최대 허용접촉전압인 50[V]를 초과함을 알 수 있었다.

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

(5) 본 논문에서 제안한 모델링을 이용하여, 접지방식별 안전성 평가 시험을 정확하게 수행할 수 있으며, 제안한 모델링을 바탕으로 시험장치의 제원적인 한계를 벗어나 다양한 조건에서의 시험을 신속하게 수행할 수 있어, 전기감전에 대한 안전기술교육에 활용할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임. [S2854105]

참고문헌

- [1] 한국기술교육대학교, “LH공동주택 접지시스템 고장전류 특성해석”, 2016년
- [2] 신동호, “3가지 접지방식에 대한 접지 특성비교”, 대한전기학회, pp. 289-297, 2000년.
- [3] 정진수, “IEC 60364 기반 접지계통 비교 분석”, 조명전기설비학회논문지, pp. 56-62, 2010년.