국제 규격 접지시스템의 국내 적용을 위한 시뮬레이션 기반의 안전도 평가 방안

論 文
57-3-3

Method for Safety-Decision to Apply International Standard Grounding Systems to Domestic Power System by Computer Simulation

李 淳* · 朴 正 旭† · 金 正 勳**
(Soon Lee · Jung-Wook Park · Jung-Hoon Kim)

Abstract - To apply the appropriate new grounding system to domestic power system, safety has to be guaranteed under the given circumstances. It is not possible to decide the safety of grounding systems by the experimental test because safety experiments directly relate to the human life and the installed electric machines. Therefore, the computer simulation program to decide the safety of grounding systems based on the IEC standard systems, has to be developed. This paper proposes the computer simulation based method to decide the safety of grounding system with the concepts of touch voltage, step voltage, human resistivity, and applied electric current according to the several conditions of human body located in the corresponding grounding systems. The proposed method is implemented by Matlab/Simulink® and Visual C++ programming tools for its visualization.

Key Words : Grounding system, Human resistivity, IEC 60364, IEEE Std. 80 Guide, Safety

1. 서 론

접지의 목적은 사고 시 발생하는 고장전류를 대지로 안전하게 방전시켜 인체와 기기의 안전성을 확립하는데 있다. 그동안 국내 접지설비는 체계적인 기술적 근거 없이 단순히 접지 지점의 접지저항 값을 낮추는 것에 집중하였다. 하지만 현재 접지에 관련된 국제적인 규격은 접지저항 값을 비롯하여 전체 전력시스템과 관련한 시스템 구축이라는 측면에서 접지의 목적을 실현하고자 하는 추세이다. 현재까지 국내 전기 분야에서 접지시스템 분야는 상대적으로 중요성이 덜 부각되어 체계적인 시스템의 구축이 이루어지지 않고 있으며 해마다 접지시스템의 오동작으로 인한 감전사고 등으로 인명 피해가 발생하고 있다. 따라서 국내의 실정에 맞는 국제 규격의 접지시스템 도입을 통해 국내 접지시스템의 체계화를 달성함과 동시에 높은 안전성의 확립을 이루는 것이 시급하다. 이러한 필요성에 따라 국제 전기 표준회의인 IEC (International Electrotechnical Commission)는 접지 방법과 적용 대상에 따라, 전력계통을 나누어 접지시스템에 대한 표준인 IEC 60364와 IEC 61936을 정리하였다. 현재 본 표준들의 국내 적용을 통해 체계적인 접지시스템의 구현을 위한 시도가 이루어지고 있다. 하지만 접지 설비는 인체 및 설비의 안전과 직접적인 연관성을 가지고 있으므로 실증 시험을 통해서는 본 규격들에서 정의하는 다양한 시스템 중 국내 전력계통에 적합한 시스템의 선택 및 결정이 불가능하다. 따라서 적절한 접지시스템의 도입에 앞서 본 규격에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 안전도 평가를 통해 적합성 여부의 판단이 선행되어야 할 것이다.

접지시스템의 안전도를 확보하기 위해서는 지락전류의 영향으로 발생하는 대지 전위 상승으로 인한 접촉전압과 보폭전압 값이 규정된 한계 값보다 낮아야 한다 [1]. 사고 시 접지 설비 주변의 인체 및 설비에 미치는 안전도를 판별하기 위해서는 각 접지시스템 별로 발생하는 후자의 접촉전압과 보폭전압의 계산을 하는 것이 필요하다. IEEE Std. 80 Guide는 변전소에 접지설비 시공을 위한 안전도 확보를 가능하게 하는 기준을 정리하였으며 접촉전압 및 보폭전압의 기본적인 정의와 수리적 모델링 기법을 제시하였다. 본 논문에서는 접지시스템의 안전도를 판별하는 기준을 제시한 IEEE Std. 80 Guide에서 정의한 접촉전압과 보폭전압 계산을 위한 프로그램을 구현한다. 또한 통전전류의 값과 경로에 따른 인체저항의 분류를 정의한 Dalziel의 연구 [2]를 바탕으로 상황에 따른 인체저항 계산 프로그램을 작성한다. 그리고 위의 프로그램을 Visual C++를 사용하여 연동하는 방안을 제시하고, 최적의 안전도를 판별하는 접지시스템 시뮬레이션 기반 구축을 통해 최종적으로는 상용화를 목표로 한다. 마지막에 사례연구로, 구현한 본 프로그램을 국내의 신덕은 변전소에 설치된 접지설비에 적용해본다.

2. IEEE Std. 80 Guide 및 시뮬레이션을 통한 접근

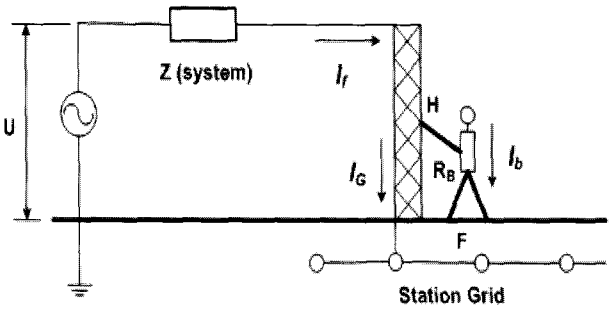
IEEE Std. 80 Guide는 변전소 설계 시에 안전한 접지설비를 구축하기 위해 적절한 정보와 지침을 제공한다. 본 Guide의 세부적인 목적은 다음과 같다 [3].

* 學生會員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 工學碩士
** 正 會 員 : 弘益大 工大 電子電氣工學部 敎授 · 工博
† 교신저자, 正會員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 助敎授 · 工博
E-mail : jungpark@yonsei.ac.kr
接受日字 : 2007年 11月 14日
最終完了 : 2008年 1月 29日

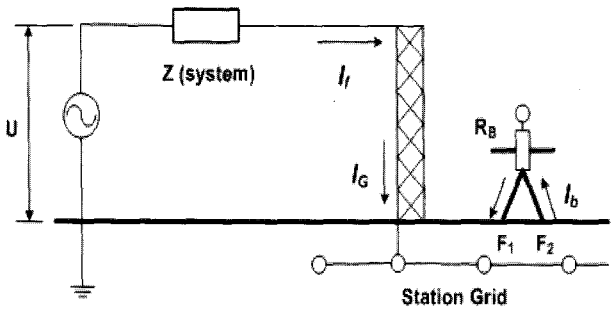
1. 접지설비를 설계하기 위한 기본으로, 계통에서 고장 발생 시 변전소 주변에서 인체가 접촉 가능 지점 사이에서 존재할 수 있는 전위차에 대한 안전한 제한 값을 설정한다.
2. 특별히 안전도와 관련한 변전소 접지설비 사례들을 소개 및 검토하고, 이를 통해 안전도가 확보된 접지설비 설계를 위한 기준을 발전시킨다.
3. 위 기준을 기반으로 하여 실제 접지시스템 설계를 위한 절차를 제시한다.
4. 접지설비 설계 시에 발생하는 전형적인 전위변화량의 문제에 대한 이해와 해결책을 마련하기 위한 분석적 방안을 발전시킨다.

본 논문에서는 접지설비의 안전한 설계 및 구축을 위해 IEEE Std. 80 Guide에서 제시하는 접촉전압과 보폭전압의 개념과 수리적 해석 방법 [3]을 사용한다. 또한 이러한 내용을 Matlab/Simulink®를 이용하여 접지설비가 구축되는 각 변전소의 지역적 특성 및 해당 접지설비의 구조를 바탕으로 접촉전압과 보폭전압을 시뮬레이션을 통해 빠르고 정확하게 계산하여 시공에 앞서 적절한 시스템의 선택 및 설계를 위한 기반을 확립한다.

2.1 접촉전압 (매시전압)과 보폭전압



(a) 접촉전압



(b) 보폭전압

그림 1 접촉전압과 보폭전압의 개념적 도식

Fig. 1 Conceptional diagrams of touch voltage and step voltage

그림 1 (a)와 같이 접촉전압은 전기계통의 충전 부분과 인체의 접촉이 발생하는 상황에서 인체에 인가될 수 있는 전압으로 통전전류(I_b)로 인한 감전사고의 주된 원인이 된다. 인체를 하나의 저항으로 볼 때, 계통과 인체가 접촉하는 상황은 계통에 저항이 병렬로 연결된 하나의 매시를 구성하게 된다. 따라서 위험전압의 하나인 접촉전압을 계산하기 위하여 IEEE Std. 80 Guide는 이를 매시전압(E_m)으로 명시하고, 이를 계산하기 위해 접지설비 및 대지의 특성을 반영하여 수식 (1)과 같은 수리적 계산 방안을 제시하고, 계산된 매시전압의 값을 통하여 접촉전압에 의해 야기될 수 있는 접지설비의 위험도를 평가한다.

$$E_m = \rho K_m K_i I_G / L_M \tag{1}$$

매시전압을 계산하기 위한 주된 수식 (1)에서 ρ는 접지설비가 설치되는 지역의 대지저항이고, K_i는 접지망 구조를 위한 보정 변수를 의미하며, I_G는 지표면과 접지망 사이를 흐르는 최대 접지전류 값(A)을 나타낸다. 또한 매시전압을 계산하기 위해 필요한 특정 값, K_m은 접지설비 인자들 사이의 거리 관계를 나타내는 변수이며, L_M은 해당 접지설비에 사용되는 도체들이 대지에 묻힌 유효 깊이(m)를 의미한다.

그림 1 (b)와 같이 인체가 변전소 주변에 위치할 때, 접지전극을 통하여 접지전류가 대지를 거쳐 접지망으로 유입되면 접지전극 주변의 대지표면에 전위경도가 형성되고 전위차가 발생하여 사람의 양발 사이($F_1 \sim F_2$: 약 1m)에 인가되는 전압을 보폭전압이라 한다. 보폭전압이 인체에 인가되면 그림 1 (b)에서처럼 인체 내부로 통전전류(I_b)가 흐르게 되므로 변전소 주변의 인체가 전기충격을 받을 수 있다. 따라서 보폭전압 역시 위험전압의 일종으로 이를 계산하기 위해 IEEE Std. 80 Guide는 접지설비 및 대지의 특성을 반영하여 수식 (2)와 같은 수리적 계산 방안을 제시하고, 계산된 보폭전압(E_S)의 값을 통하여 보폭전압에 의해 야기될 수 있는 접지설비의 위험도를 평가한다.

$$E_s = \rho K_s K_i I_G / L_S \tag{2}$$

보폭전압을 계산하기 위한 주된 수식 (2)에서 보폭전압을 계산하기 위해 필요한 특정 값, K_s는 접지설비 인자들 사이의 거리 관계를 나타내는 변수이며, L_S는 해당 접지설비에 사용되는 도체가 대지에 묻힌 유효 깊이(m)를 의미한다.

위의 접지시스템 수식에서 볼 수 있듯이 매시전압과 보폭전압은 각 수식 내의 변수들과 정비례 혹은 반비례 관계를 통해서 정의된다. 또한 각 위험전압은 기본적으로 대지저항 값과 정비례 관계를 가지고 있으므로 이를 프로그램으로 작성할 때 접지시스템이 설치될 지역의 대지저항 값을 입력으로 받아야할 것이다. 해당 접지시스템에 대해, IEEE Std. 80 Guide에서 제시하고 있는 매시전압과 보폭전압을 계산하기 위해서는 해당 수식의 각 변수 값을 계산하는 것이 우선되어야한다. 각 변수는 해당 접지시스템 설비의 모양, 설치 깊이, 설치되는 장소의 특성 등을 고려하여 만들어진 변수이다. 따라서 이 값들이 매시전압과 보폭전압을 결정하는데 있어 각 접지시스템의 특성을 대변하고 있다. 이를 특성변수라 정의하고 각 특성변수에 해당하는 구체적인 수식은 다음의 수식 (3)-(9)와 같다. 본 수식들을 Matlab/Simulink® 프로그램에 적용하여 각 위험전압 값을 빠르고 효과적으로 계산할 수 있다.

- 매시전압을 계산하기 위해 필요한 특정 값: K_m

$$K_m = \frac{1}{2\pi}[\ln\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} + \frac{K_{ii}}{K_h}\ln(\frac{8}{\pi(2n-1)})] \quad (3)$$

- 보폭전압을 계산하기 위해 필요한 특정 값: K_s

$$K_s = \frac{1}{\pi}[\frac{1}{2h} + \frac{1}{(D+h)} + \frac{1}{D}(1-0.5^{n-2})] \quad (4)$$

- 접지망 구조를 위한 보정 변수: K_i

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (5)$$

- 지표면과 접지망 사이를 흐르는 최대 접지전류 값: I_G

$$I_G = D_f S_f I_f \quad (6)$$

- 매시전압 측정을 위해 해당 접지설비에 사용되는 도체들이 대지에 묻힌 유효 깊이: L_M

* 접지망에 흘어진 접지봉의 수가 적거나 없는 경우, 접지망 주변이나 구석에 내부 도체가 없는 경우,

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}}$$
$$L_M = L_C + L_R \quad (7)$$

* 접지망 주변이나 구석에 다수의 내부 도체 및 접지봉을 가진 경우,

$$K_{ii} = 1$$
$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22\left\{\frac{L_r}{(L_x^2 + L_y^2)}\right\}\right] L_R \quad (8)$$

- 보폭전압 측정을 위해 해당 접지설비에 사용되는 도체들이 대지에 묻힌 유효 깊이: L_S

$$L_S = 0.75 L_C + 0.85 L_R \quad (9)$$

위 특성변수 식에서 L_r은 각 접지봉의 길이이고, L_x는 x 축 방향에 위치한 망도체의 최대 길이를 의미하며, L_y는 y 축 방향에 위치한 망도체의 최대 길이를 나타낸다. 또한 L_C는 망도체의 전체 길이이고, L_R은 접지봉의 전체 길이를 의미한다. 그리고 위의 특성변수를 구하기 위해 해당 수식에 포함된 나머지 변수들의 정의는 다음과 같다.

D = 접지시스템 병렬 도체 사이의 간격 (m)
h = 지표망 도체들의 매설 깊이 (m)
d = 망 도체의 직경 (m)
K_{ii} = 접지망 구석에 형성되는 매시에 있는 내부 도체들의 효과를 조정하는 보정 인자
K_h = 접지망 깊이의 효과를 강조하는 보정인자
n = 접지망 구조의 기하인자
I_f = 최대 지락전류 (A)
D_f = 전류 감량 인자
S_f = 전류 분배 인자

특히 (3)-(9)의 특성변수를 구하기 위해 필요한 접지망 구조 및 특성을 나타내는 기하인자인 n을 구하기 위해서는 다음의 식 (10)을 필요로 한다. 아래의 식에서 L_p는 접지망의 주변 길이이고, A는 접지망에 의해 둘러싸인 전체 면적을 의미하며, D_m은 접지망의 임의의 두 지점 사이의 최대 거리를 나타낸다.

$$n = n_a n_b n_c n_d$$
$$n_a = \frac{2L_C}{L_P}$$
$$n_b = \begin{cases} 1 & \text{for 정사각형 망구조} \\ \sqrt{\frac{L_P}{4\sqrt{A}}} & \text{그외} \end{cases}$$
$$n_c = \begin{cases} 1 & \text{for 정사각형, 직사각형 망구조} \\ \left[\frac{L_x L_y}{A}\right]^{\frac{0.7A}{L_x L_y}} & \text{그외} \end{cases}$$
$$n_d = \begin{cases} 1 & \text{for 정사각, 직사각형 및 } L\text{-모양 망구조} \\ \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} & \text{그외} \end{cases} \quad (10)$$

지금까지 언급한 접지시스템의 매시전압과 보폭전압을 구하는 수식을 이용해 구한 위험전압들의 값은 안전한 접지시스템 구축을 위해 IEEE Std. 80 Guide에 규정된 안전한계 접촉전압과 안전한계 보폭전압의 값보다 작도록 설계되어야 한다.

2.2 안전한계 접촉전압과 보폭전압

IEEE Std. 80 Guide는 안전한 접지시스템 설계를 위해 한계 접촉전압과 한계 보폭전압을 결정하는 방안을 제시한다. 따라서, 접지설비를 설계할 때 현장에서는 이 값들보다 작은 접촉, 보폭전압 값을 갖는 접지시스템 구축을 할 수 있도록 접지망을 설계하고 있다. IEEE Std. 80 Guide는 특히, 50kg의 인체가 접지시스템 주변에 있다는 가정을 바탕으로 수식 (11)과 같은 한계 위험전압 값을 계산하도록 정의하고 있다.

$$E_{touch\,50} = I_B(1.5 C_S \rho_S + R_B)$$
$$E_{step\,50} = I_B(6.0 C_S \rho_S + R_B) \quad (11)$$

수식 (11)의 I_B는 인체 한계 통전전류를 의미하며 50kg의 인체가 견딜 수 있는 최대 전류치를 가정한다. 이 값은 특히 인체에 통전전류가 흐르는 시간과 밀접한 관계가 있으며, 본 관계를 수식 (12)에서 나타낸다.

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (12)$$

또한, 수식 (11)의 R_B 값은 인체를 저항으로 가정하였을 때 인체가 가지는 저항 값을 나타내고, 50kg의 인체가 가지는 저항 값, 특히 손에서 손, 손에서 발까지의 저항을 단지 1000[Ω]의 값을 가지는 것으로 획일화하여 계산하도록 한다. 이 가정은 안전 한계 위험전압을 구하는데 문제가 발생할 수 있다. 물론 실제 인체저항이 1000[Ω]보다 크다면 문제가 되지 않지만 1000[Ω]보다 작으면 인체에는 더 많은 전류가 흐르기 때문에 위험성이 가중될 가능성이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다음 장의 인체저항 계산 프로그램을 통해 다양한 케이스별로 인체 저항을 구하는 방안을 시뮬레이션을 통해 구현할 것이다. 또한 그 값을 이용하여 좀 더 정밀한 안전 한계 위험전압 값을 구할 수 있을 것으로 기대한다.

위의 수식 (11)의 ρ_s는 측정된 지표층 대지 저항[Ω·m] 값을 의미하고, 토지의 특성을 반영한 토지 특성계수 C_s 값은 측정된 대지 저항 값을 이용하여 다음의 수식 (13)을 통해 계산할 수 있다.

$$C_s \cong \begin{cases} 1.04 & \text{for 균일토양} \\ 1-0.09[(1-\frac{\rho}{\rho_s})/(2h_s+0.09)] & \text{for 비균일토양} \end{cases} \quad (13)$$

3. 상황에 따른 인체저항 모델링 및 통전전류를 통한 안전도 판별방안

이번 장에서는 Dalziel의 실험결과를 통한 인체저항의 분류 및 인체 통전전류의 값과 그 경로에 따른 안전도를 정의하고, 이를 바탕으로 접지시스템 주변에 위치한 인체의 상황에 따른 시스템 안전도 판별 방안을 모색한다.

3.1 상황에 따른 인체 저항 모델링

인체에 전압이 인가되면 체내로 전류가 흐르게 되어 전격의 정도를 결정하지만, 전압이 인가되더라도 전류의 크기가 크지 않으면 전격현상은 일어나지 않는다. 외부 인가전압에 대해 통전전류 크기를 결정하는 것은 통전회로를 구성하는 전기저항인데, 감전사고의 경우에는 인체가 통전회로에서 가장 큰 전기저항을 가지게 되기 때문에 인체저항은 전격의 위험을 결정하는 가장 큰 변수가 된다. 따라서 접지시스템 주변의 인체의 안전도를 평가하기 위해서는 상황에 따른 정확한 인체저항을 모델링하는 방안이 필수적이다.

인체를 흐르는 통전전류는 옴의 법칙에 의하여 인체에 인가된 전압을 인체가 포함되는 통전회로의 전기저항으로 나눈 값이며, 통전회로에서는 인체저항이 가장 큰 전기저항으로 된다. 보통 인체의 전기저항은 피부저항이 약 2,500[Ω], 내부조직저항이 약 300[Ω], 발과 신발 사이의 저항을 1,500[Ω], 신발과 대지 사이를 700[Ω]으로 보아, 전체저항은 약 5,000[Ω]으로 보고 있지만, 이것은 피부가 젖은 정도, 인가전압 등에 의해 크게 변화하며 인가전압이 커짐에 따라 약 500[Ω]이하까지 감소한다. 또 피부저항은 피부에 땀이 나 있는 경우는 건조시의 약 1/12~1/20, 물에 젖어 있을 경우는 1/25로 저하된다. 따라서 전격의 정도를 결정하는 경우에는 인체를 한 개의 단일 저항체로 보아 최악의 상태에서의 값을 사용하고 있으며, 현재 미국에서는 안전성과 관련하여 그 값을 1,000[Ω]으로 사용하고 있고 기타 유럽각국은 인가전압에 따른 함수로 아래의 표 1의 값을 사용하고 있다.

표 1 인가전압에 따른 인체저항

Table 1 Human resistivity according to the induced voltage

인가전압 [V]	인체저항 [Ω]		
	인구의 5%	50%	95%
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1625	2875
220	1000	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
접근 한계 값	150	750	850

위 표 1의 인체저항 값은 Dalziel을 비롯한 여러 전문가들에 의해 인체에 인가되는 전압에 따라 변하는 인체저항의 값을 실험을 통해 범주화한 것이다. 이들은 인체가 전기에 노출될 수 있는 조건을 다음과 같이 분류하고 그 방법을 정리하였으며[4], 본 논문에서는 이러한 조건에 따른 실험결과를 반영하여 인체저항 계산 프로그램을 구현하였다.

- 부위에 따른 피부저항의 변화: 손등, 턱, 볼, 정강이 등의 전기저항이 적은 피전점 부위를 고려한다.
- 습기에 의한 저항의 변화: 피부가 땀 등에 의해 젖어있는 습윤한 경우와 건조한 경우를 고려한다.
- 피부와 전극의 접촉면적에 의한 저항의 변화
- 인가전압에 따른 저항의 변화: 직류와 교류, 충격파의 인가 등을 고려한다.
- 인체의 조건에 따른 분류: 어린이와 어른 등의 무게 및 신장 요소를 고려한다.
- 통전전류의 경로에 따른 분류: 상황에 따른 통전경로를 고려한다.

위의 여러 가정에 의해 본 논문에서 구현한 프로그램은 4장에서 언급할 것이며 개발된 프로그램을 이용하면 접지시스템 주변에 위치한 인체를 다양한 조건에 맞게 모델링할 수 있으며 접지시스템의 사전 안전도 평가를 위해 사용될 수 있을 뿐 아니라, 감전사고 발생 시 사고를 당한 인체를 사고 상황에 맞게 모델링하여 사고 원인 분석에도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

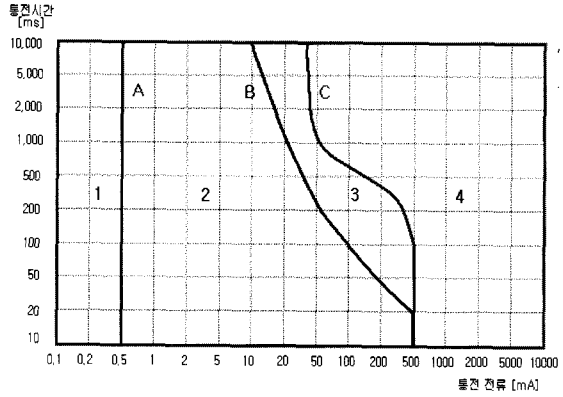
3.2 통전전류에 따른 인체 안전도 판별

인체에 통전되는 전류가 더욱 증가되면 전류의 일부가 심장부분을 흐르게 된다. 이렇게 되면 심장이 정상적인 맥동을 하지 못하며 불규칙적으로 세동을 하게 되어 결국 혈액의 순환에 큰 장애를 가져오게 된다. 이와 같은 현상을 심

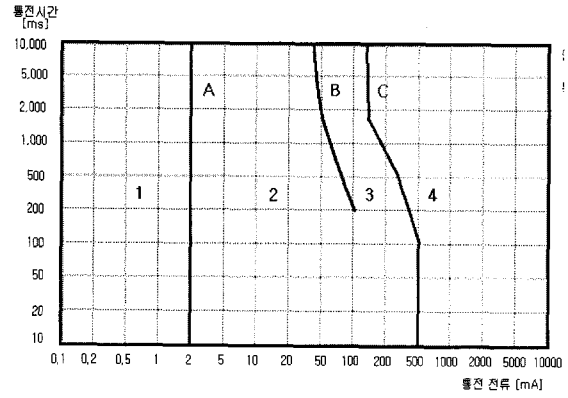
실세동(Venticular Fibrilation)이라 부르며, 일단 이 상태가 되면 전류를 제거하여도 자연적으로는 건강을 회복하지 못하며 그대로 방치하여 두면 수분 내에 사망하게 된다. 감전사고에 의한 사망 원인을 조사해보면 물론 약한 전류에 의한 전격현상에 따라 인체의 통제 불능 상태에 기인하여 간접적인 사망이 발생할 수 있지만, 감전사고에 의한 사망사고가 발생하는 일차적인 요인이 바로 심실세동 현상이다.

국제전기기술위원회(IEC)에서는 전기설비 사용에 따른 감전의 안전한계에 대해 검토한 결과, 전류가 인체에 미치는 영향에 대해 그림 2과 같은 곡선을 결정하여 발표했다 [5]. 그림 2에 의하면 인체에 통전전류가 흐르는 것을 인지할 수 있는 감지전류는 교류 0.5[mA], 직류 2[mA]이고 전격이 발생하지만 인체가 그 상황을 벗어날 수 있도록 통제가 가능한 이탈전류는 교류 10[mA], 직류 30[mA] 정도이며 곡선 C가 심실세동 전류의 한계곡선이다.

- Zone 1: 별다른 반응이 없는 지역
- Zone 2: 일반적으로 위험한 반응이 없는 지역
- Zone 3: 인체조직의 파괴가 없는 지역, 즉 근육수축, 호흡장애, 회복성 심장정지등은 일어나나 심실세동은 일어나지 않음.
- Zone 4: 심실세동이 일어날 수 있는 지역



(a) 교류 (15 ~100 [Hz])



(b) 직류

그림 2 통전전류에 의한 감전의 안전 한계

Fig. 2 Safety limit of electric shock by the applied electric current

본 논문에서는 접지시스템 주변에 있는 인체의 안전도를 판별하기 위한 방안으로 IEC에서 제시한 위의 그림 2를 사용하여 통전전류 값의 측정을 통한 안전도 판별 프로그램을 구현한다. 접지시스템의 안전도를 확보하기 위해서는 인체에 흐르는 통전전류의 값이 최소한 이탈전류의 한계 값 이내에 형성될 수 있도록 설계되어야 한다.

4. 인체저항 및 통전전류를 통한 접지시스템 안전도 판별 소프트웨어 구현

이번 장에서는 안전한 접지시스템 설계를 위해 IEEE Std. 80 Guide에서 제시한 접촉전압과 보폭전압 계산 방법, 그리고 3장에서 제시한 상황에 따른 인체저항 값과 통전전류의 양에 따른 인체 위험도 판단 방안을 프로그래밍으로 구현한다. 또한 이는 Matlab/Simulink®를 이용하여 IEC 규격을 모델링한 프로그램 [6]과 연동하여 적절한 접지시스템 안전도 판별 모델을 선택하는데 사용될 수 있다. [6]의 프로그램을 본 논문에서 개발한 프로그램과 연동하기 위한 방안은 IEC 규격 접지시스템 시뮬레이션을 통해 얻은 최대 지락전류 값을 사용하는 것이며, 이에 대한 절차를 5장에서 언급한다.

4.1 상황에 따른 인체저항 계산 프로그램 구현

접지시스템 주변에 위치한 인체의 위험을 파악하여 위험발생 가능성을 가장 줄일 수 있는 안전한 접지시스템 평가를 위해서는 언급한 바와 같이 인체에 얼마의 통전전류가 얼마의 시간동안 흐르는지 평가하는 것이 가장 중요하다. 즉 통전전류가 가장 적게 흐르게 되는 조건을 만들어 주어야한다. 통전전류를 구하기 위해서는 우선 인체의 상황에 따라 변하는 저항 값을 측정해야하는데 이를 프로그래밍화하기 위하여 3장에서 조사한 다양한 조건에 따른 실험데이터를 이용하였다.

본 연구를 통해 구현한 프로그램에서는 접지시스템 주변에 위치한 인체가 처할 수 있는 다양한 상황에 따라 통전전류가 흐르는 경로를 함께 고려하여 각 감전이 가능한 상황에 맞는 인체저항 값을 구할 수 있다. 아래 그림은 3장에서 다양한 조사를 통해 알 수 있었던 자료를 바탕으로 Visual C++로 구현한 인체저항 계산 프로그램이다. 본 프로그램은 접지시스템 주변의 인체를 다음의 다섯 가지 조건을 고려하여 구현되었으며 이는 프로그램 사용자에 의한 입력 값으로 사용된다.

1. 어린이 or 어른
2. 남성 or 여성
3. 습윤한 상태 (wet) or 건조한 상태 (dry)
4. 인가된 전류가 교류 or 직류
5. 통전전류의 인체 내부 경로

아래의 그림 3은 감전이 일어날 수 있는 노출도전부에서 접촉이 발생하는 상황을 고려하였다. 또한 접지시스템 근처에 있는 인체가 남성의 어른이며 손이 땀에 젖어 습윤한 경우에, 통전전류의 통전경로가 손에서 발까지 형성되는 상황

을 가정하였다. 이때 프로그램을 통해 나온 인체저항 값은 914[Ω]으로 볼 수 있다. 이 결과는 미국에서 인체저항으로 사용하고 있는 1000[Ω]의 값 보다 약 10% 정도 감소한 값으로 1000[Ω]으로 설계된 시스템에서는 좀 더 감전사고의 확률이 높을 수 있다. 또한 본 프로그램은 각 조건에 따라 범위가 정해져 있으므로 신뢰성을 위해 여러 번의 측정을 통해 나온 값 중에 최악의 경우를 가정하여 가장 작은 값을 선택하게 된다.

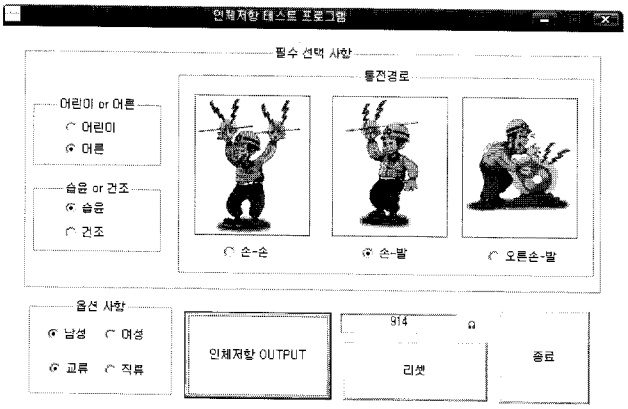


그림 3 인체저항 계산 프로그램
Fig. 3 Program to calculate human resistance

4.2 통전전류의 양에 따른 접지시스템 안전도 판별 프로그램 구현

접지시스템 주변에 위치한 인체의 안전 및 감전사고의 가능성은 인체에 흐를 수 있는 통전전류의 양과 통전시간에 비례한다. 따라서 IEEE Std. 80 Guide에서 제시하는 안전한계 접촉전압과 보폭전압에 맞는 접지시스템의 설계뿐만 아니라 규격에 맞게 설계된 시스템이 얼마나 안전하게 동작하는지 평가하기 위해서 주변 인체에 미치는 영향을 고려해야 한다. IEEE Std. 80 Guide의 안전한계 접촉전압과 보폭전압만을 이용하여 접지시스템을 설계한다면 시스템이 규격화되어 특정 위험 케이스에서 안전성을 확보할 수 없다. 따라서 이를 해결하기 위한 방안으로 주변 인체의 감전 및 전격사고 가능한 상황을 가정하고 그 때에 인체에 흐르는 통전전류의 양과 시간을 고려한 안전성 판단을 보충적으로 고려해야 한다.

3장에서 언급한 IEEE Std. 80 Guide를 통해 계산한 접지시스템의 보폭전압, 접촉전압 값을 사용하여, 인체에 흐르는 통전전류를 구하는 프로그램을 구현한다. 이는 기본적으로 인체저항과 접촉전압, 보폭전압을 옴의 법칙을 사용하여 인체에 흐르는 통전전류를 계산하는 것이다. 또한 그 결과를 그림 2의 IEC에서 제시한 '전기설비 사용에 따른 감전의 안전한계에 대해 검토한 결과, 전류가 인체에 미치는 영향'에 대한 그래프에 해당 전류 값을 mapping 하여 인체에 미치는 위험한 정도를 분석한다. IEC에서 제시한 기준은 통전전류가 흐르는 인체에서 심실세동이 발생할 수 있는 가능성을 기준으로 네 가지 지역으로 위험 지역을 구분하였다. 그림 4는 본 연구를 통해 개발한 인체의 통전전류를 사용하여 접지시스템의 안전도를 판별하는 프로그램으로 Visual C++로 구현되었다.

본 프로그램의 GUI를 통해 들어가는 입력 값 및 그에 대한 설명은 다음과 같다.

1. 인가전압: IEEE Std. 80 Guide를 통해 구한 접촉전압, 보폭전압 값 입력.
2. 통전시간: 인체에 흐르는 통전전류 시간 입력.
3. 인체저항: 인체저항 계산 프로그램을 통해 구한 인체저항 값 입력.

아래의 그림 4는 접지시스템 안전도 판별을 위한 프로그램을 실행시킨 예로, 인체가 노출도전부에 접촉했을 때를 가정하여 접촉전압이 IEEE Std. 80 Guide의 계산식을 통해 235.8V가 인가된 경우를 모의하였다. 이 때, 인체는 위의 인체저항 계산 프로그램을 통해 가정하여 구한 값을 사용하였다. 또한 인체의 통전전류 시간을 150ms로 놓고 접지시스템 안전도를 판별한 결과, Zone 3에 결과 값이 mapping 되는 것을 볼 수 있다. 본 가정에 의하면 현재 접지시스템에 접촉되어 있던 인체는 근육수축, 호흡장애, 회복성 심장정지 등이 일어나나 심실세동은 일어나지 않을 것으로 판단할 수 있다. 하지만 Zone 3에 해당되는 경우 전격에 의한 이차 충격을 받을 수 있는 확률이 크므로 현재의 접지시스템은 위험한 편에 속한다고 볼 수 있다.

따라서 본 프로그램을 이용하여 안전도를 판별하는 경우, 최소한 통전시간 1초 내에 일반적으로 위험한 반응이 없는 지역인 Zone 2 혹은 별다른 반응이 없는 지역인 Zone 1에 통전전류 값이 mapping될 수 있도록 접촉전압과 보폭전압을 설계하는 것이 안전한 접지시스템 설계를 하는 방안으로 볼 수 있다.

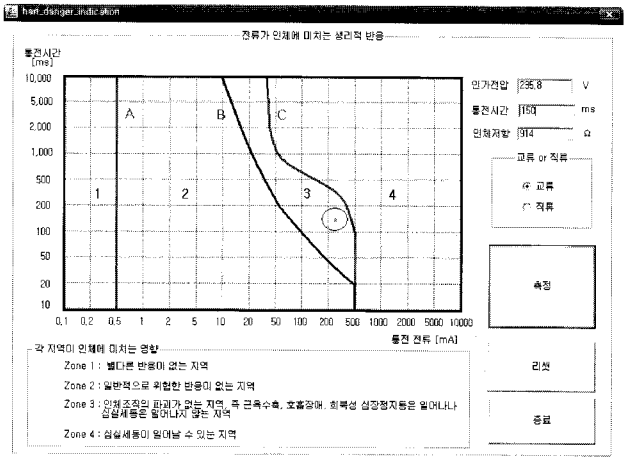


그림 4 접지시스템 안전도 판별 프로그램
Fig. 4 Safety-decision program of grounding systems

5. 최종 접지시스템 안전도 판별 프로그램

본 연구의 최종 목표는 시뮬레이션 기반의 접지시스템 안전도 평가 방안을 통한 국내 상황에 적합한 국제 규격 접지시스템의 선택이다. 따라서 본 논문에서 제시하는 안전도

평가 기법은 IEC 60364나 IEC 61936과 같은 국제 규격의 접지시스템 설계 및 시뮬레이션과의 연동 방안이 필요하다. 만약 IEC 60364를 프로그램으로 구현한 [6]과 같은 방안을 이용하여 시뮬레이션을 통해 최대 지락전류(I_f) 값을 구할 수 있다면, 2장에서 언급한 접촉전압과 보폭전압을 구하기 위해 IEEE Std. 80 Guide를 사용하여 구현한 프로그램의 입력 값으로 사용할 수 있다. 이런 방법과 동일하게 접지시스템 안전도 평가를 위해 직접 측정 및 수작업을 이용해 구해야 하는 입력 값을 얻어내는 과정을 프로그램화 시켜나가면서 연동하면, 하나의 상용화가 가능한 최종 접지시스템 안전도 판별 프로그램 개발을 이룰 수 있을 것이다.

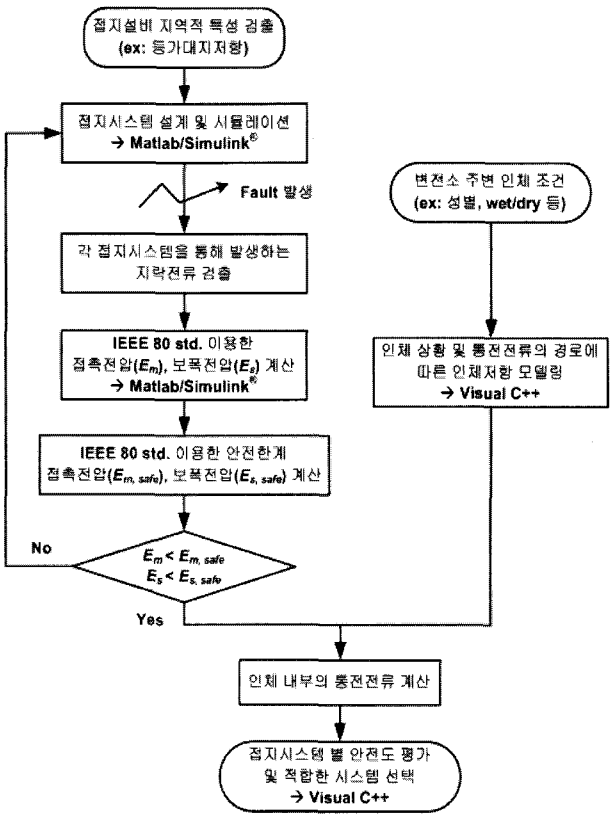


그림 5 접지시스템 안전도 판별을 위한 전체 프로그램의 개요도

Fig. 5 Diagram for the total program to decide the safety of grounding systems

그림 5는 접지시스템 안전도 평가를 통한 적합한 접지시스템 선택을 위해 본 논문에서 제시하는 전체 프로그램의 개략적인 다이어그램이다. 그림 5에서 제시한 안전도 판별 프로그램을 하나의 최종적인 접지시스템 안전도 판별을 위한 프로그램으로 통합하는 기본적인 방식 및 절차는 다음과 같다.

1. Matlab/Simulink®를 사용하여 모델링한 IEC 규격 접지시스템 [6]에서 고장 발생 시 지락전류(I_f)를 검출한다.
2. 검출한 지락전류(I_f)를 IEEE Std. 80 Guide에서 제시하는 접촉전압, 보폭전압 구하는 수학식에 대입하여 위험전압들을 계산한다.
3. 2번 절차와 동시에 접지시스템 주변에 위치한 인체의 상황에 맞는 저항 값을 본 논문에서 구현한 인체저항 계산 프로그램을 통해 검출한다.
4. 위의 절차들을 통하여 구한 위험전압 값과 인체저항 값을 접지시스템 안전도 판별 프로그램에 입력하고 인체에 흐르는 통전전류를 계산한다.
5. 그림 2의 IEC에서 제공한 심실세동 발생 위험 구간의 그래프에 통전전류 mapping을 통하여 설계된 접지시스템의 위험도를 판별한다.

그림 5의 접지시스템 안전도 판별을 위한 전체 프로그램의 구현을 위해서는 위 절차 중 1단계에 해당하는 국내에 적용 가능한 다양한 상황 및 조건에 따라 분류된 국제 규격의 접지시스템 시뮬레이션을 통한 정확한 시스템 및 규격의 분석이 우선적으로 필요하다. 또한 향후 연구로 본 개발 프로그램을 보다 향상하기 위해 추가로 고려할 방안으로는, 오퍼레이터의 직접 측정 및 계산을 통해 본 프로그램의 입력으로 사용되는 등가대지저항 측정값이 비선형적인 특성에 의해 부정확한 경향성을 가지므로 [7]과 같은 방안을 적용해 프로그램적으로 구현하여 본 개발 프로그램과 연동한다면 보다 정확한 안전도 판별 프로그램을 구현할 수 있을 것으로 본다.

6. 사례연구

이번 장에서는 연구결과를 통해 구현한 접지시스템 안전도 판별방안 프로그램을 사용하여 현재 국내에 설치된 변전소의 접지시스템의 안전도를 평가해 본다. 사례연구를 위해 사용된 접지설비는 파주 LG LCD 공장 내에 위치한 345kV 신덕은 변전소에 설치된 접지설비이다. 본 사례연구에서는 접지시스템이 설치된 지형조건과 설치된 접지망의 설계만을 사용하였으며 이를 이용하여 IEEE Std. 80 Guide에서 제시하는 접촉전압과 보폭전압 값의 계산을 프로그램을 통해 실시하였고, 계산된 위험전압 데이터를 이용하여 현재 설치된 접지시스템의 안전도를 해당 인체의 조건에 맞게 판단해 보도록 한다.

6.1 신덕은 변전소의 접지설비와 이를 이용한 접촉전압 및 보폭전압 계산

IEEE Std. 80 Guide에서 제시하는 접촉전압과 보폭전압을 구하기 위해서는 기본적인 입력 값으로 접지망의 데이터와 설치된 지형의 대지저항 값이 필요하다. 파주 신덕은 변전소는 기본적으로 아래의 그림과 같이 접지망에 접지봉을 타설하지 않은 직사각형 망구조로 구체적인 설계 데이터는 다음과 같다.

- 신덕은 변전소 접지망 데이터 (Rectangular Grid)
  (1) 접지도체의 굵기: 150 [mm^2]의 나연동선
  (2) 접지망 총면적: 11020 [m^2]
  (3) 도체의 총길이: 7803 [m]
  (4) 접지망 외곽길이: 429 [m]
  (5) 접지망의 x축 방향 최대길이: 129.8 [m]

(6) 접지망의 y축 방향 최대길이: 84.9 [m]
(7) 접지망 대각선 최대길이: 155.1 [m]
(8) 접지봉의 총길이: 64 [m]
(9) 접지봉 각각의 길이: 1 [m]
(10) 접지망 기준 매설 깊이: 1 [m]
(11) 접지망 매설 깊이: 1 [m]
(12) 접지망 도체의 직경: 0.0161 [m]
(13) 접지망 그리드 간격: 3 [m]
(14) 최대지락전류: 5000 [A] (1선지락고장전류를 계통 최악조건 기준으로 산정)
(15) 대지 고유 저항: 300 [Ω·m]
(16) 표토층 대지 고유 저항: 5000 [Ω·m]
(17) 사고 지속 시간: 1 [sec]

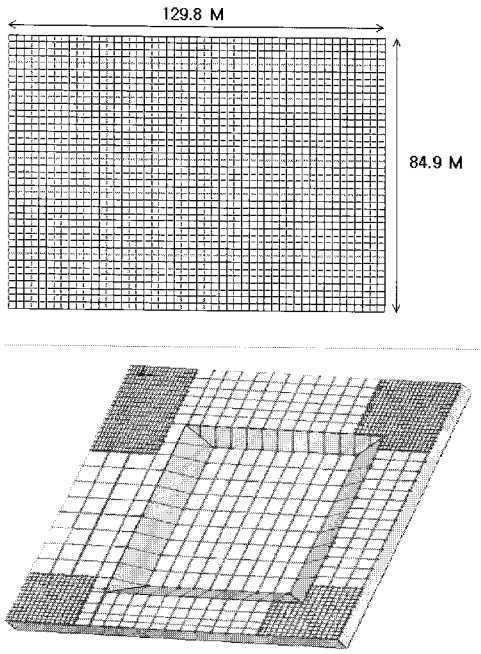


그림 6 신덕은 변전소의 접지 설비 구조
Fig. 6 Structure of grounding installation of a Sinduceun substation

위의 구체적인 자료를 IEEE Std. 80 Guide의 수학식을 통하여 Matlab/Simulink® 프로그램으로 구현한 2장의 접촉전압과 보폭전압 프로그램의 입력 값으로 넣으면 다음의 결과 값을 얻을 수 있다.

- 계산된 접촉전압: 637 [V]
- 계산된 보폭전압: 538 [V]

6.2 연구결과의 프로그램을 통한 접지시스템 안전도 판별

본 논문을 통해 개발한 접지시스템 안전도 판별 방안 프로그램을 사용하기 위해서는 우선 접지시스템 주변에 위치하는 인체의 조건을 정하고 인체저항 값을 구해야 한다. 본 사례연구에서는 변전소 접지망 주변에서 작업을 하는 어른 남성 작업자가 작업에 주의를 기울여 접촉부위의 건조한 상태를 유지하고 있는 일반적인 경우를 가정하였다. 신덕은 변전소에 1선지락사고가 약 1초간 발생 및 지속되었을 때, 주변의 작업자가 노출도전부에 한 손이 노출되어 접촉하고 있는 상황이라면 통전전류의 경로가 손에서 발로 형성되게 된다. 이 가정은 위에서 감전사고가 발생하는 상황 중의 매우 일반적인 경우로 이러한 경우에 본 개발 프로그램을 통해 측정되는 인체의 저항 값은 4334[Ω]으로 계산된다.

이 경우는 인체에 접촉전압에 의한 통전전류가 흐르게 되므로 접지시스템 안전도 판별 방안 프로그램의 인가전압으로 계산된 접촉전압 값이 적용되게 되며 사고 지속시간을 1초로 가정하였기 때문에 인체에 흐르는 통전전류의 통전시간을 1초 내의 시간, 예를 들어 50ms와 200ms 의 두 가지 경우로 나누어 두 경우에 해당하는 상황에 처한 해당 접지시스템 주변의 인체 상태를 파악하여 통전전류를 통해 본 접지시스템의 안전도를 평가해볼 수 있다.

아래 그림 7의 결과에서 볼 수 있듯이 일반적인 주의를 기울이며 작업을 하고 있는 작업자의 경우 통전시간이 50ms인 경우는 Zone 2에 위험도가 mapping 되어 본 접지시스템은 안전하다고 볼 수 있다. 또한 그림 8의 결과에서처럼 통전시간이 200ms인 경우는 Zone 3에 위험도가 mapping 되어 본 접지시스템에서의 작업자는 주의를 요망한다고 할 수 있다. 하지만 본 시스템은 기본적으로 IEEE Std. 80 Guide에서 제시하는 안전한계 보폭전압과 접촉전압 값 내에 있으므로 위의 결과와 맞물려 현재 그다지 위험한 상태에 있지 않다고 판별할 수 있다.

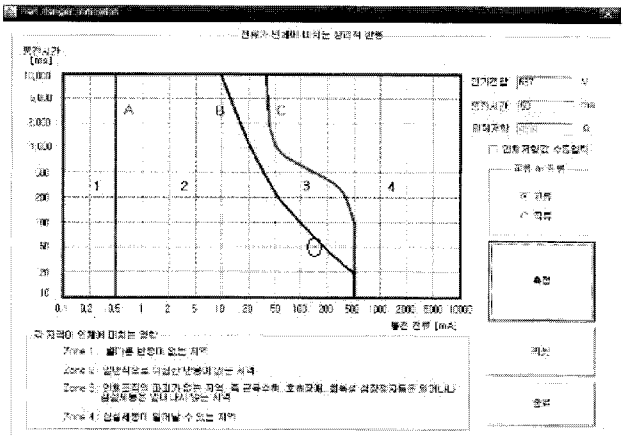


그림 7 사례연구 접지시스템 안전도 판별 프로그램 (50ms)
Fig. 7 Safety-decision program of grounding systems for the case study (50ms)

위의 가정과 달리 본 접지시스템 주변에 위치한 작업자가 일반적으로 요구하는 주의 사항을 지키지 않을 경우(즉 작업자의 손에 물이 묻은 것과 같이 습기가 차있는 경우)는 그림 9에서 볼 수 있듯이 본 접지시스템의 보폭전압과 접촉전압 값이 IEEE Std. 80 Guide에서 제시하는 안전한계 보폭전압과 접촉전압 값 내에 있음에도 인체저항 값이 4334[Ω]에서 930[Ω]으로 현저히 낮아진다. 또한 상대적으로 안전한 조건인 통전시간 50ms 조건에서 접지시스템 안전도 프로그램을 실행하면 인체에 심실세동이 일어날 가능성이 있는 Zone 4에 위험도가 mapping 된다. 따라서 사례연구에서

적용한 접지시스템의 좀 더 정밀한 안전도 확보를 위해서는 다양한 상황을 고려한 시스템의 구축이 우선되고, 동시에 본 연구에서 개발한 프로그램을 통해 전기설비 주변에 위치한 인체 및 설비에 대한 지속적인 안전도 확보를 위한 방안 마련이 꼭 필요하다.

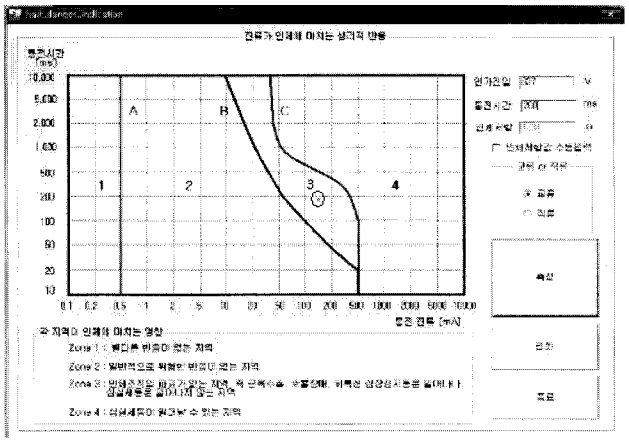
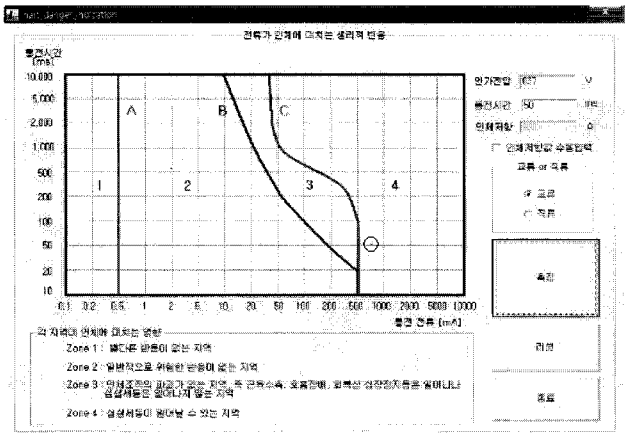


그림 8 사례연구 접지시스템 안전도 판별 프로그램 (200ms)
Fig. 8 Safety-decision program of grounding systems for the case study (200ms)



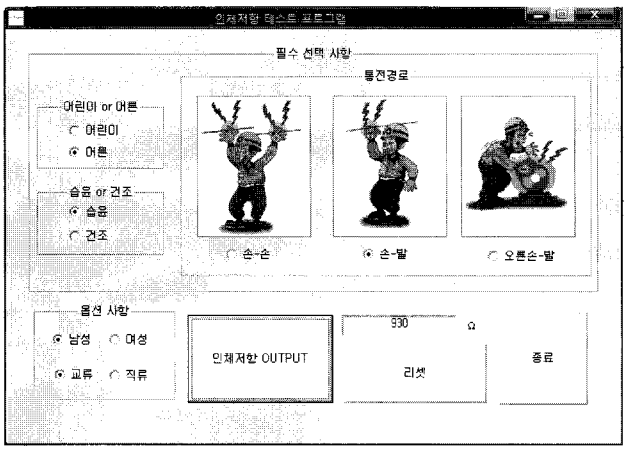


그림 9 위험상태 가정한 접지시스템 안전도 판별 프로그램
Fig. 9 Safety-decision program of grounding systems for the dangerous condition

7. 결 론

본 논문에서는 국내 실정에 맞는 체계적이고 선진적인 국제 규격의 접지시스템 도입을 위한 선행 작업으로 접지시스템의 안전도를 판별하는 프로그램의 개발에 대해 다루었다. 프로그램의 설계를 위해 현재 접지시스템 안전설계 시에 사용되어 온 IEEE Std. 80 Guide가 제시하는 접촉전압 및 보폭전압의 계산 방법을 사용하였다. 또한 접지시스템 주변에 위치한 인체의 다양한 상황에 따른 인체 저항의 실험데이터를 통하여 여러 조건에서의 인체저항 값을 계산하는 프로그램을 적용하였다. 이를 통하여 IEEE Std. 80 Guide의 안전한계 위험전압을 계산 시에 인체 저항 값이 모든 조건의 인체에 동일하게 적용된다는 문제점을 극복하여 좀 더 정밀한 안전전압의 기준을 판별할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 해당 인체에 흐르는 통전전류의 양 및 통전시간의 값에 따라 심실세동 및 전격 발생을 판단하여 접지시스템의 안전도를 판별하는 기능을 구현하였다. 구현된 모든 프로그램을 하나로 연동하여 사례연구로 실제 설치되어 있는 345kV 신덕은 변전소 접지설비의 경우에 적용하였고 개발된 소프트웨어의 실용성 및 타당성을 판단하였다.

접지시스템 주변에 위치한 인체와 관련한 안전도는 생명과 직결되는 문제이기 때문에 실증시험을 통해 해석하는 것이 불가능하며 많은 제약요건을 지니고 있다. 따라서 접지시스템의 안전도를 시뮬레이션을 통하여 분석하는 소프트웨어의 개발이 필수적이다. 본 논문에서 개발된 소프트웨어는 접지시스템 도입을 위해 국내에 적합한 안전도가 확보된 시스템을 선택하는 문제에 있어 시뮬레이션을 통한 해법을 제시해줄 수 있을 것으로 생각된다. 또한 현재 설치된 접지설비에 대한 안전도 평가 및 그에 대한 해결책을 효과적으로 제시해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 대한전기협회, 한국전기연구원, "수배전전력계통 접지계통과 인체 및 기기의 안전성에 관한 연구(기술논문자료)", 2006.11.

[2] C. F. Dalziel, "Electric shock hazard", IEEE Spectrum, pp. 42-50, February, 1972.

[3] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding: IEEE Std. 80-2000", August, 2000.

[4] International Electrotechnical Commission, "IEC 60479-3 4th Edition, Effects of current on human beings - Part 3: Effects of currents passing through the body of livestock", July, 2005.

[5] International Electrotechnical Commission, "IEC 60479-1 4th Edition, Effects of current on human beings - Part 1: General aspects", July, 2005.

[6] 우동균, 이순, 박정욱, 김정훈, "IEC 규격 접지계통 방식에서 고압계통의 1선 지락고장시 저압계통에서의 영향에 관한 연구", KIEE, 전력계통연구회 춘계학술대회, 2007. 05.

[7] Bo-Hyuk Ryu, Jung-Hoon Kim, et al, "Earth Resistivity Estimation Using Artificial Neural Network", The International Conference on Electrical Engineering, pp.469-472, July, 1998.

저 자 소 개

이 순 (李 淳)

1981년 1월 23일생. 2006년 연세대 전기전자공학부 졸업. 2008년 동 대학원 전기전자공학부 졸업(석사). 2008년~현재 현대중공업 기전연구소 연구원

Tel : 02-534-7201

E-mail : soon312@gmail.com

박 정 욱 (朴 正 旭)

1973년 7월 18일생. 1999년 연세대 전기공학과 졸업. 2003년 미국 Georgia Institute of Technology 전기컴퓨터공학부 졸업(공박). 2003년~2004년 미국 University of Wisconsin-Madison 박사후 전임연구원. 2004년~2005년 LG전자 선임연구원. 2005년~현재 연세대 전기전자공학부 조교수

Tel : 02-2123-5867

Fax : 02-313-2879

E-mail : jungpark@yonsei.ac.kr

김 정 훈 (金 正 勳)

1955년 9월 13일생. 1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1988년~1989년 미국 Penn State Univ. 방문교수. 현재 홍익대학교 전자전기공학부 정교수. 대한전기학회 용어위원회 위원장. 기초전력연구원 전력IT 인력양성센터 센터장

Tel : 02-320-1621

Fax : 02-320-1119

E-mail : kimjh@wow.hongik.ac.kr