제한된 부지 다층 대지구조에서 위험전압을 고려한 접지설계

Grounding Grid Design Considering the Dangerous Voltage of Multi-layered Model in the Constrained Sites

손 석 금[†]
(Seok-Geum Son)

Abstract - In Korea, where most of the sites are narrow in space and their earth resistivity is relatively high, the spaces between grounding conductors are likely to be designed narrow in order to lower ground resistance and dangerous voltage below to the permitted safety values. In addition, ground nets are in the shape of square or rectangle depending on the location and size of the facilities and ground contact area, and inner conductors are laid out in grids like the pattern of nets. Nevertheless, with the existing designs, the marginal voltage for safety gets higher as the area is extended further outside, in comparison with that of inner mesh grounding, thus causing much difficulty maintaining them equipotential, and there exist limits in the burial, grounding grid design considering the dangerous voltage of multi-layered model in the constrained sites, was studied

Key Words : Double-mesh, Touch Voltage, Multi-layered model

1. 서 론

전기설비에 대한 접지의 근본 목적은 인체에 대한 감전으로부터의 안전성의 확립과 기기 및 설비의 기능향상이다. 국내 접지설비는 체계적인 기술적 근거 없이 단순히 소요 접지저항을 얻기 위해 접지 지점의 접지저항 값을 낮추는 것에 집중하였다[1]. 하지만 현재 접지에 관련된 국제적인 규격은 접지저항 값을 비롯하여 인체의 보폭전압, 접촉전압, 메시전압 등을 고려한 전위경도 경감대책을 주로 하는 전체 전력시스템과 관련한 시스템 구축이라는 측면에서 접지의 목적을 실현하고자 하는 추세이다[1-3]. 현재 접지에 관련된 국제적인 규격은 접지저항 값을 비롯하여 인체의 보폭전압, 접촉전압, 메시전압 등을 고려한 전위경도 경감대책을 주로 하는 전체 전력시스템과 관련한 시스템 구축이라는 측면에서 접지의 목적을 실현하고자 하는 추세이다[1-3]. 현재까지 국내 전기 분야에서 접지시스템 분야는 상대적으로 중요성이 덜 부각되어 체계적인 시스템의 구축이 이루어지지 않고 있으나 국내 저압용 전기설비의 경우 각국의 기술기준을 국제규격에 부합시켜야 한다는 WTO/TBT협정(1995년)에 따라 국내의 저압용 전기설비(공칭전압 AC 1,000[V], DC 1,500[V], 이하)에 IEC 60364가 적용가능하다고 고시되었다(2005년 12월). 이에 따라 현행 국내 전기설비 분야는 국내 기준과 IEC(international electrotechnical commission:국제전기표준회의)준의 선택적 적용이 가능하게 되었다[1-3]

접지시스템의 안전을 확보하기 위해서는 지락전류의 영향

으로 발생하는 대지 전위 상승으로 인한 접촉전압과 보폭전압 값이 규정된 한계 값보다 낮아야 한다[4-5]. 접지설계 시 접지망의 접지저항과 건축물 구내의 위험전압을 예측하는 것은 매우 중요한 작업이다. 이는 지락고장전류의 접지망 유입으로 인한 접지망과 지표면의 전위상승으로 인하여 인체에 인가될 수 있는 위험전압을 안전허용치 이내가 되도록 접지망을 구성하여야 하기 때문이다. 변전소와 같이 부지면적이 넓은 장소에서의 접지설계에는 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (ANSE /IEEE Std. 80)이 널리 사용되고 있다[4-5].

우리나라의 경우 부지가 좁고 대지저항율이 비교적 높은 곳이 많아 접지저항과 위험전압을 안전허용치 이내로 낮추기 위하여 접지도체 간격을 좁게 설계하는 경향이 있다. 또한 접지망의 형태도 건축물의 위치나 규모에 따라 정사각형, 직사각형, L형 등이 있다[6]. 따라서 상기의 조건에 맞는 IEEE Std. 80 위험전압식의 적용한계에 대한 검증이 필요하므로 우리나라 대부분의 건축물에서 채택하고 있는 정사각형에 대한 IEEE Std.80 계산식으로 계산을 하였다[6-9].

따라서 본 논문에서는 접지시스템 설계시 일반적으로 사용하는 IEEE Std.80의 표준 순서를 사용하여 2층의 대지구조로 메시접지 전극의 접촉전압과 보폭전압을 계산하고 컴퓨터 모의실험값을 비교하여 적용한계를 검토하였다[10-12].

2. 본 론

2.1 위험전압

변전소 구내에서 메시접지전극을 설치할 때 구내에 서 있는 작업자에 인가되는 전압을 말하며, 여기서 GPR은 무한원점에서 본 변전소구내의 전위분포를 나타내고 있으며, 접촉전압과 보폭전압으로 구분된다[13-14].

[†] 교신저자, 정회원 : 오산대학교 전기시스템제어과

E-mail : skson@osan.ac.kr

접수일자 : 2013년 7월 26일

수정일자 : 2013년 8월 2일

최종완료 : 2013년 8월 27일

2.1.1 접촉전압

접촉전압은 전기계통의 충전부분과 인체의 접촉이 발생하는 상황에서 인체에 인가될 수 있는 전압으로 통전전류로 인한 감전사고의 주된 원인이 된다. 위험전압의 하나인 접촉전압을 계산하기 위하여 IEEE Std. 80 Guide는 이를 메시전압(E_m)으로 명시하고, 이를 계산하기 위해 접지설비 및 대지의 특성을 반영하여 수식 (1)과 같은 수학적 계산 방안을 제시하고, 계산된 메시전압의 값을 통하여 접촉전압에 의해 야기될 수 있는 접지설비의 위험도를 평가한다[13-14].

$$E_m = \rho K_m K_i \frac{I_g}{L} [V] \quad (1)$$

여기서, ρ : 평균대지저항률[$\Omega \cdot m$]

K_m : 메시전극의 전극간격, 도체치수, 매설깊이, 도체수로 결정되는 메시간격계수

K_i : 접지전극에 불규칙적으로 흐르는 접지전류에 대한 보정계수

I_g : 접지전극에 흐르는 전류[A]

L : 메시도체의 길이[m]이다.

메시간격계수 K_m , K_i 은 다음의 계산식으로 계산한다 [13-14].

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2d)^2}{8Dh} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{\frac{1}{(2n)^{2/n}}}{\sqrt{1+h/h_0}} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad (2)$$

$$k_i = 0.656 + 0.172n \quad (3)$$

여기서 h_0 : 1[m](메시의 기준깊이)

h : 메시전극의 매설깊이[m]

D : 메시도체의 간격[m]

n : 한 방향의 도체수

d : 메시도체의 지름[m],

2.1.2 보폭전압

보폭전압은 인체가 변전소 주변에 위치할 때, 접지전극을 통하여 접지전류가 대지를 거쳐 접지망으로 유입되면 접지극 주변의 대지표면에 전위경도가 형성되고 전위차가 발생하여 사람의 양발 사이에 인가되는 전압을 보폭전압이라 한다. 보폭전압이 인체에 인가되면 인체내부에 통전전류가 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 (4)와 같은 수리적 계산 방안을 제시하고, 계산된 보폭전압(E_s)의 값을 통하여 보폭전압에 의해 야기될 수 있는 접지선의 위험도를 평가한다[13-14].

$$E_s = \rho K_s K_i \frac{I_g}{L} [V] \quad (4)$$

여기서, K_s : 망상 접지전극에서 메시도체의 수, 간격, 매설깊이에 의하여 정해지는 계수

K_i : 접지전극에 불규칙적으로 흐르는 접지전류에 대한 보정계수

I_g : 접지전극에 흐르는 전류[A]

L : 메시도체의 길이[m]이다.

계수 K_s 는 다음 식으로 구한다.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1-0.5^{n-2}) \right] \quad (5)$$

2.1.3 대지표면의 전위상승(GPR)

접지전위상승 GPR(Ground Surface Potential Rise)은 지락전류와 접지저항의 곱이므로 다음과 같이 계산한다. [13-14].

$$GPR = I_g \times R_g [V] \quad (6)$$

여기서, I_g : 접지전극에 흐르는 전류[A]

R_g : 접지저항[Ω]이다.

2.1.4 안전한계 접촉전압과 보폭전압

IEEE Std. 80 Guide는 안전한 접지시스템 설계를 위한 한계 접촉전압과 한계 보폭전압을 결정하는 방안을 제시한다. 따라서, 접지설비를 설계할 때 현장에서는 이 값들 보다 작은 접촉전압과 보폭전압값을 갖는 접지시스템 구축을 할 수 있도록 접지망을 설계하고 있다. IEEE Std. 80 Guide는 특히 50kg의 인체가 접지시스템 주변에 있다는 가정을 바탕으로 수식 (7)와 수식 (8)과 같은 한계 위험전압 값을 계산하도록 정의하고 있다[13-14].

$$E_{touch} = (R_B + \frac{1}{2} R_F) \times I_B \quad (7)$$

$$E_{stop} = (R_B + 2R_F) \times I_B \quad (8)$$

수식 (7),(8)의 I_B 는 인체 한계 통전전류를 의미하며 50kg의 인체가 견딜 수 있는 최대 전류치를 가정한다. 이 값은 특히 인체에 통전전류가 흐르는 시간과 밀접한 관계가 있다. 또한 수식 (7),(8)의 R_B 의 값은 인체를 저항으로 가정하였을 때 인체가 가지는 저항 값을 나타내고, 50kg의 인체가 가지는 저항 값 1000[Ω]의 값을 가지는 것으로 획일화하여 계산하도록 한다[13-14].

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s(h_s, K)\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (9)$$

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s(h_s, K)\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (10)$$

수식 (9), (10)의 ρ_s 는 측정된 지표층의 대지 저항[$\Omega \cdot m$] 값을 의미하고, 토지의 특성을 반영한 토지 특성계수 C_s 와 반사율 K 는 수식 (11)로 계산한다[13-14].

$$C_s \cong \begin{cases} 1.04 & \text{for 균일토양} \\ 1 - 0.09 \frac{\rho}{\rho_s} / (2h_s + 0.09) & \text{for 비균일토양} \end{cases} \quad K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (11)$$

2.2 대지저항률

접지저항을 계산하기 위하여 접지공사 실시 장소의 대지저항률에 관한 정보가 필요하다[13-14].

2.2.1 토질의 종류에 따른 저항률

토질의 종류에 따른 저항률은 표 1로 나타낸다[13-14].

표 1 흙의 저항률

흙의 종류	저항률[Ω·m]
늪지 및 진흙	80 ~ 200
점토질·모래질	150 ~ 300
모래질	250 ~ 500
사암 및 암반지대	10,000 ~ 100,000

2.2.2 토양의 저항률에 대한 수분의 영향

흙이 함유한 수분의 변화에 따른 흙의 저항률을 표 2에 나타낸다[13-14].

표 2 흙의 저항률에 대한 수분의 영향

흙이 함유한 수분 [%]	저항률[Ω·m]		
	모래 섞인 양토	표토 (상층토)	적 토
2	1,800	-	-
4	600	2,000	-
6	380	1,300	-
8	290	900	-
10	220	560	2,000
12	170	360	1,800
16	130	190	180
20	90	110	130
24	70	90	110
28	60	80	100

2.2.3 등가 대지저항률

현재 실용상 접지저항 계산법의 대부분은 대지를 균질지층으로 가정했을 경우의 계산식을 이용하고 있다. 지층별 대지파라미터(각지층의 두께와 그 대지저항률)가 주어졌을 때, 균질대지의 접지저항 계산식에 적용하기 위해서는 다층대지를 등가인 균질대지로 치환하기 위한 등가적인 대지저항률을 검토해야 한다. 전극이 어느 지층에 존재하고 있는 경우를 상정했을 때의 등가 대지저항률로 지층마다 병렬 접지저항 계산 개념을 응용하여 대지구조가 h_i , ρ_i 인 지층의 경우, 전극 길이(l)의 선단부분이 층까지 존재할 때, 층간 대지저항률 ρ_m 은 다음 식 (12)로 주어진다[13-14].

$$\rho_m = \frac{l}{\sum_{j=1}^{i-1} \frac{h_j}{\rho_j} + \frac{l - \sum_{j=1}^{i-1} h_j}{\rho_i}} \quad (12)$$

2.3 접지설계

2.3.1 접지설계 및 시뮬레이션

따라서, 본 절에서는 우리나라 대부분의 메시접지에서 채택하고 있는 정사각형 접지망에 대한 IEEE Std. 80 계산식과 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 적용한계를 검토하고 위험지역에서의 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 적용한계를 검토 기기장비를 설치 시 안전한 장소를 확인하였다. 컴퓨터 모의실험은 전력계통해석 프로그램(SKM)을 사용하였다[15-16].

표 3은 IEEE Std. 80의 메시접지설계를 하기위한 메시접지전극의 접지설계의 제원이다.

표 3 메시전극의 설계

접지설계의 제원	내용
접지공사 구역	A = 30 × 30[m ²]
대지 저항률(상층)	$\rho_1 = 400[\Omega \cdot m]$
대지 저항률(하층)	$\rho_2 = 200[\Omega \cdot m]$
자갈층의 저항률	$\rho_s = 2500[\Omega \cdot m]$
자갈층의 두께	$h_s = 0.1[m]$
메쉬접지전극의 매설깊이	$h = 0.5[m]$
지락차단시간	$t_c = 0.5[sec]$
지락시 정상임피던스	$Z_1 = 4 + j10[\Omega]$
지락시 영상임피던스	$Z_0 = 10 + j40[\Omega]$
분류률	$S_f = 0.6$
선간전압	$V = 115[kV]$

그림 1 2중 메시전극 접지설계

Fig. 1 Ground design of the double-mesh electrode

IEEE Std. 80 접지설계 순서에 의해서 계산을 하게 되면 접지공사 구역을 정사각형 30 × 30[m²]로 설정하여 A = 900 [m²]가 되고, 접지구역의 상층인 지하 1.7m까지 대지저항률 $\rho_1 = 400[\Omega \cdot m]$ 과 하층인 지하 1.7m이상의 대지저항률 $\rho_2 = 200[\Omega \cdot m]$ 로 했을 경우 등가 대지저항률은 $\rho = 355[\Omega \cdot m]$

에 지락전류(I_g)는 3,180[A]에 보폭전압 안전한계값(E_{step50})은 1,985[V] 접촉전압의 안전한계값($E_{touch50}$)은 619[V]가 된다. 메시포설면적에서 메시도체의 간격을 $D=3[m]$, 매설깊이를 $h=0.5[m]$ 메시도체 길이(L_c)는 상단에 660[m] 하단에 540[m] 그래서 매설도체의 총길이(L)은 1,200[m]이다. 이 경우의 접지저항은

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

$$= 355 \times \left[\frac{1}{1,200} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 900}} \left(1 + \frac{1}{1+0.5\sqrt{20/900}} \right) \right]$$

$$= 5.4[\Omega]$$

접지도체에 흐르는 지락전류는(I_g) 1,908[A] 대지표면의 전위상승 GPR은 2,862[V]로 접촉전압의 한계값은 619[V]보다 높지만 메쉬전압 E_m 은 479[V], 보폭전압 E_s 는 230 [V]로 안전한 접지설계라 할 수 있다.

3. 대지저항을 변화별 시뮬레이션에 의한 접지저항 및 위험전압 분석

3.1 대지저항률 400[Ω·m] 일 때 접지저항 및 위험전압 분석

접지공사 구역을 정사각형 30[m] × 30[m]로 설정하여 $A=900[m^2]$ 가 되고, 대지는 단층 구조로 대지저항률 $\rho=400[\Omega \cdot m]$ 에서 지락전류(I_g)는 3,180[A]에 보폭전압 안전한계값(E_{step50})은 1,985[V] 접촉전압의 안전한계값($E_{touch50}$)은 619[V]로 하여 전력계통해석 프로그램을 통해 컴퓨터 모의 시뮬레이션한 결과 접지저항은 5.14[Ω]로 시뮬레이션 되었으며, 간격(D) 1.5[m] 한 변의 도체개수(n) 21인 메시 접지의 메시 도체길이(L) 1,260[m]를 시뮬레이션 한 결과 대지표면 전위상승이 최소 7,952[V]부터 최대 10,760[V] 까지 분포

그림 2 메시 전극의 대지표면 전위상승 분포

Fig. 2 Distribution of ground surface potential rise of the mesh electrode

되었고, 보폭전압은 최대 1,096[V], 접촉전압은 최소 142[V]부터 2,950[V]까지 분포 되는 것으로 나타났다.

그림 3 메시 전극의 접촉전압 분포

Fig. 3 Distribution of touch voltage of the mesh electrode

그림 4 메시 전극의 보폭전압 분석

Fig. 4 Distribution of step voltage of the mesh electrode

3.2 대지저항률 400/200[Ω·m] 일 때 접지저항 및 위험전압 분석

대지저항률 상층 400[Ω·m], 하층 200[Ω·m]에서 간격(D) 3[m] 한 변의 도체개수(n) 11인 2중 메시 접지의 메시 도체길이(L) 1,200[m]를 시뮬레이션 한 결과 대지표면 전위상승이 최소 4,104[V]부터 최대 5,218[V]까지 분포 되어 메시 접시보다 많이 낮아진 것을 볼 수 있고, 보폭전압도 최대 446[V], 접촉전압도 최소 12[V]부터 1,126[V]까지 분포 되어 메시 접지보다 상당히 낮아지는 것으로 나타났다.

그림 5 2중 메시 전극의 대지표면 전위상승 분포

Fig. 5 Distribution of ground surface potential rise of the double-mesh electrode

그림 6 2중 메시 전극의 접촉전압 분포

Fig. 6 Touch voltage distribution of the double-mesh electrode

그림 7 2중 메시 전극의 보폭전압 분포

Fig. 7 Step voltage distribution of the double-mesh electrode

그림 8 접지저항 분석

Fig. 8 Analysis of ground resistance

그림 9 접촉전압 분석

Fig. 9 Analysis of Touch voltage

접지저항과 접촉전압을 저감시키기 위해서는 대지 저항률의 영향이 가장 크게 작용을 하고 메시 도체 길이에 의해서 저감이 되지만 메시 간격을 좁혀서 설계를 하는 것보다는 2중 메시 전극으로 접지설계를 하는 것이 더욱더 효과적인 것으로 분석되었다.

그림 10 보폭전압 분석

Fig. 10 Analysis of Step voltage

3. 결 론

우리나라는 건축물 부지가 협소한 경우가 많고 심층토양의 대지 저항률이 각각 다르기 때문에, 접지저항을 낮추기 위해서는 도체 간격을 좁게 설계하거나 깊게 도체를 매설해야 하는 경우가 많다.

좁은 면적에서 접지설계를 IEEE Std. 80의 계산식 그대로 사용하게 되면 접지도체 간격을 좁게 설계하면 과대 설계가 될 수 있고, 접지도체를 깊게 설계하게 되면 대지 저항률이 다층 구조이기 때문에 정확한 접지설계의 계산이 어렵게 된다.

따라서 본 논문에서는 대지구조가 실제에서는 다양한 다층구조로 구성되어 있으므로 접지를 설계 시 정확한 평가를 위해서는 다층구조의 대지저항률을 적용하여 IEEE Std. 80 계산식과 컴퓨터 시뮬레이션으로 모델링하여 접지저항과 위험전압이 가장 작게 발생하는 접지설계 방법을 제안하였다. 제안한 제한된 부지 다층 대지구조에서 위험전압을 고려한 접지설계인 2중 메시접지를 메시접지 와 비교 하였을 때 더욱 효과가 좋은 것으로 결과가 나왔으며 해석결과를 바탕으로 현장에서 접지설계 시 좁은 면적과 다층구조의 대지에서 유용한 접지방법으로 활용 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 한국전기안전공사, "IEC60364 건축전기설비 해설서", 2006. 11.
- [2] 김재철외, IEC 60364 기반 접지계통 비교 분석, 한국조명전기설비학회, Vol. 24 No. 1, 2010
- [3] 대한전기학회, 한국전기연구원, "수배전전력계통 접지계통과 인체 및 기기의 안전성에 관한연구(기술논문자료)", 2006.11.
- [4] ANSI/IEEE Std. 80-1986, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York. 1986
- [5] ANSI/IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York. 2000
- [6] 신복성외, 위험전압 검토에 따른 개선된 접지설비 모델, 한국조명전기설비학회, Vol. 22 No.4, 2008
- [7] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding: IEEE Std.80-2000" August, 2000.
- [8] 이복희외, "접지의 핵심 기초 기술", 의제, 2002
- [9] 김태훈외, "접지제원 변화에 따른 사전 메쉬접지의 특성변화", 한국조명전기설비학회논문집, pp347-350, 2009
- [10] 손석금외, 위험전압 검토에 의한 메시접지설계, 대한전기학회, Vol. 60P, No. 3, 2011
- [11] 손석금 외, 변전소 접지설계를 위한 접지전극 주변의 위험전압 측정과 분석, 대한전기학회, Vol. 60P, No. 4, 2011
- [12] 손석금 외, 제한된 부지에서 위험전압 검토에 의한 메시 접지설계, 한국조명전기설비학회, Vol. 25, No. 11, 2011
- [13] 고교건언저, 이형수역, 동일출판사, 接地設計入門 1993
- [14] 다카하시 다케히코, 정종욱 옮김, 일본 음사-성안당, 접지·등전위 본딩 설계 실무지식, 2008.
- [15] 손이조, IEC 60364 전기설계감리 시공가이드북, 기다리, 2009
- [16] 손이조, 세흥이앤씨, "전력계통해석 프로그램"

저 자 소 개

손 석 금 (孫 錫 金)

1969년 8월 10일생. 1997년 한밭대 전기공학과 졸업. 2000년 성균관대 전기공학과 졸업(석사). 2012년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 발송배전기술사

현재 오산대학 재직

Tel : (031) 370-2677

Fax : (031) 370-2679

E-mail : skson@osan.ac