

접지설비 절차에 따른 개선된 접지설비 모델

(An Improved Model for Grounding System Using process of Grounding Design)

송영주*

(Young-Joo Song)

요 약

국내 접지시스템 설계시 가장 널리 사용되는 것은 ANSI/IEEE Std. 80-2000이나 국내 접지설계 환경의 적정성 여부는 검토되고 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 국내 접지설계 환경을 고려한 새로운 접지도체의 굵기 산정방법과 접지도체의 위험전압 산정방법, 접지도체의 Grid간격 산정방법을 적용하여 ANSI/IEEE Std.80-2000을 보완한 새로운 접지시스템 설계 방법을 제시하였다. 또한 ANSI/IEEE Std. 80-2000 Annex B의 사례연구를 통해 IEEE Std. 80에 의한 방식과 비교 검토하여 신뢰성과 경제성을 검증하였다.

Abstract

The ANSI/IEEE Std. 80-2000 method has been commonly used to design grounding system for the South Korea domestic market. However, the appropriateness of this method to the ground design environment has not yet been examined. This paper presents a new design grounding system method that complements the ANSI/IEEE Std. 80-2000 method, when the new method is applied to thickness, dangerous voltage, and grid spaced computations for grounding conductors. Furthermore, this paper examines reliability and economic efficiency issues by comparing of the ANSI/IEEE Std. 80-2000 Annex B's case study with the original method.

Key Words : Grounding design, Dangerous voltage, Grid spaced, ANSI/IEEE Std. 80-2000

1. 서 론

최근 건축물은 대형화, 고층화, 인텔리전트화, 밀폐화 됨에 따라 전력을 공급하는 전원설비, 전력을 전달하는 배전설비, 전력을 소비하는 부하설비, 그리고 방재설비, 방법설비, 정보 통신설비, 빌딩관리 시

스템, 통합감시제어 시스템 등 다양한 설비가 혼재 설치 운영되고 있어 안전성과 신뢰성을 바탕으로 한 시스템을 구축하여야 한다. 이러한 시스템의 안전성과 신뢰성을 확보하기 위하여 요구되는 것 중의 하나가 접지 시스템이다.

접지 시스템의 근본적인 목적은 내부의 단락, 지락 고장이나 외부의 낙뢰 등에 의해 높은 고장전류가 흐를 때 대지표면의 전위상승을 억제하여 전기설비의 기능향상은 물론 인간의 안전성을 확보하는 것이다. 높은 고장전류는 접지시스템의 단락이나 낙뢰

* 주저자 : 홍익대학교 전기설비연구센터 수석연구원
Tel : 041-860-2610, Fax : 041-863-7605
E-mail : dewangell@dreamwiz.com
접수일자 : 2008년 3월 13일
1차심사 : 2008년 3월 18일
심사완료 : 2008년 4월 4일

현상 등에 의해서 발생되며, 발생된 고장전류가 흐르면 전위차가 발생되고 발생된 전위차는 인간의 손과 발 사이 또는 두발 사이를 통해 전기적인 전류경로를 형성한다. 만약 이 경로에 흐르는 전류가 인간의 허용한계(심실세동전류)보다 크면 충격으로 죽음에 이를 수 있으므로 인간의 허용한계 접촉전압, 보폭전압을 고려한 최적의 저임피던스 접지 시스템을 구축해야 한다.

따라서 본 논문에서는 접지 시스템 설계시 일반적으로 사용하는 ANSI/IEEE Std.80-2000을 바탕으로 새로운 접지도체의 굵기 산정, 접지도체의 위험전압 산정, 접지도체의 Grid간격 산정방법을 적용하여 보완된 새로운 접지시스템 설계 방법을 제시하고 사례 연구를 통해 검증하여 건설현장에서 엔지니어들이 쉽게 적용할 수 있고 접지시스템의 신뢰성을 높이고자 한다.

2. 본 론

2.1 접지설계 기호

표 1. 접지설계 기호
Table 1. The Index of grounding design

기 호	내 용
ρ	대지 고유저항을[$\Omega \cdot m$]
ρ_s	표면층 고유저항을[$\Omega \cdot m$]
$3I_0$	대칭 고장전류(= I_f)[A]
A	접지망 포설면적[m^2]
C_s	표면층 감소계수
C_p	계통확장 계수
d	접지도체 직경[m]
D	접지도체 접지Grid 간격[m]
D_f	대지전류 I_G 를 구하기 위한 감소계수
D_m	접지망의 대각선 최대길이[m]
E_m	최대예상 Mesh전압[V]
E_s	최대예상 보폭전압[V]
$E_{step\ 50}$	50[kg] 사람의 최대허용 보폭전압[V]
$E_{step\ 70}$	70[kg] 사람의 최대허용 보폭전압[V]
$E_{touch\ 50}$	50[kg] 사람의 최대허용 접촉전압[V]
$E_{touch\ 70}$	70[kg] 사람의 최대허용 접촉전압[V]

기 호	내 용
h	접지도체 매설깊이[m]
h_s	표면층 두께[m]
I_G	대지전류, 최대 접지전류[A]
I_g	대칭 접지전류[A]
K	반사계수
K_h	접지도체 매설깊이에 따른 보정계수
K_i	전위경도 변화에 따른 보정계수
K_{ji}	외곽도체에 대한 내부도체의 보정계수
K_m	Mesh전압 산출을 위한 간격계수
K_s	보폭전압 산출을 위한 간격계수
K_a	수계산 보정계수
L_c	접지망 총길이[m]
L_R	접지봉 총길이[m]
L_M	Mesh전압 접지계 총길이(L_c+L_r)[m]
L_r	각 위치에서의 접지봉의 길이[m]
L_s	보폭전압을 접지계 총길이(L_c+L_r)[m]
L_T	접지계 총길이(L_c+L_r)[m]
L_x	접지망 x축 방향 최대길이[m]
L_y	접지망 y축 방향 최대길이[m]
n	접지망 한변의 도체수[개]
n_R	접지봉 수[개]
R_g	접지저항[Ω]
S_f	고장전류 분류계수
t_c	접지도체 굵기-고장전류 지속시간[s]
t_f	감쇠계수-고장전류 지속시간[s]
t_s	인체 안전전류를 위한 감전시간[s]
a	도체전류의 분류율

2.2 접지설계

최대허용보폭전압 및 최대허용 접촉전압의 한계를 결정한 후 다음과 같은 순서로 접지계통을 설계한다.

- 단계 1 : 현장 데이터 정보를 파악한다.
- 단계 2 : 접지도체의 굵기를 결정한다.
- 단계 3 : 감전방지를 위한 안전한계의 기준값을 결정한다.
- 단계 4 : 예비설계의 접지도체 재원을 설정한다.

접지설비 절차에 따른 개선된 접지설비 모델

- 단계 5 : 접지저항을 계산한다.
- 단계 6 : 대지전류를 결정한다.
- 단계 7 : GPR과 최대허용 접촉전압의 크기를 비교 · 판정한다.
- 단계 8 : 구내의 전위경도를 평가하기 위한 위험 전압을 결정한다.
- 단계 9 : 최대예상 Mesh전압과 최대허용 접촉 전압의 크기를 비교 · 판정한다.

- 단계 10 : 최대예상 보폭전압과 최대허용 보폭 전압의 크기를 비교 · 판정한다.
- 단계 11 : 단계 9, 10에서 최대허용 접촉, 최대 허용 보폭전압의 안전 기준값을 만족하지 못하는 경우, 설계 제원을 수정하고 단계 5 이하를 다시 검토한다.
- 단계 12 : 설계완료

2.3 접지설계 흐름도

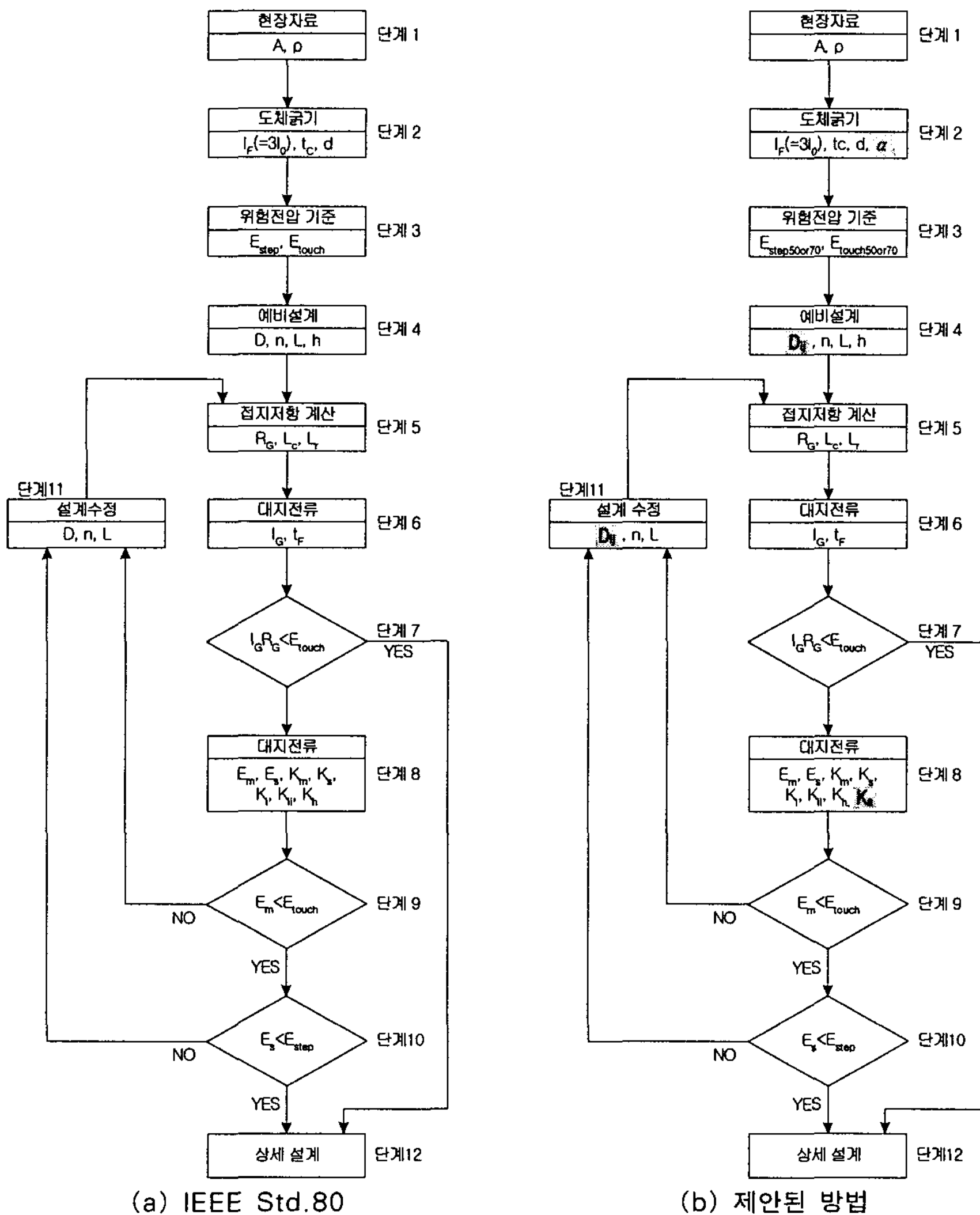


그림 1. 접지설계 흐름도
Fig. 1. The flowchart of grounding design

2.4 제안된 접지설계 세부 설명

2.4.1 단계 2(접지도체 굵기 산정)

접지도체는 지락전류나 뇌전류가 흘렀을 경우 용단되거나 피복이 소손되면 주위의 가연물 등에 위험이 미치게 되므로 이 온도에 견딜 수 있도록 도체의 단면적을 충분히 해야 한다. 그리고 이외에 기계적 강도와 내식성에 대한 검토도 함께 이루어져야 한다.

1) IEEE Std. 80

IEEE Std. 80에서 사용하는 접지도체의 굵기는 고장전류크기, 고장지속시간, 온도, 재료의 특성값 등을 적용하여 수식 (1)과 같이 구한다.

$$A = I \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \times 10^4}{TCAP}}{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_0} \right) \right]}} \quad [mm^2] \quad (1)$$

이에 필요한 재료의 물리적 정수는 표 2와 같다.

표 2. 접지도체 상수
Table 2. The constant of grounding conductor

도체 종류	도전율 [%]	α_r [20°C]	K_0 [0°C]	T_m [°C]	ρ_r [20°C]	TCAP
연동선	100.0	0.0039	234	1083	1.7241	3.422
경동선	97.0	0.0038	242	1084	1.7774	3.422
동복강선	40.0	0.0037	245	1084	4.397	3.846

2) 제안된 접지도체 굵기 제안식[4]

제안된 접지도체 굵기 제안식은 IEEE Std. 80-2000 수식과 같이 고장전류크기, 고장지속시간, 최대허용온도, 주위온도, 접지도체 재료에 쓰이는 금속의 물리적인 정수를 고려한 도체 재질에 따른 비례상수 등을 적용하여 수식 (2)와 같이 구한다.

$$A = \frac{aKN\sqrt{t_c}}{[a + b(T_m - T_a)]^c} \quad [mm^2] \quad (2)$$

여기서 상수 $a=-1.21$, $b=0.91$, $c=0.64$

이에 필요한 도체 재질에 따른 비례상수 K는 표 3과 같다.

표 3. 도체 재질에 따른 비례상수
Table 3. The proportional constant of conduction's material

도체 종류	연동선	경동선	알루미늄선	동복강선	아연도금강선	스테인레스강 #304
K	5.714	5.780	8.500	8.575	17.748	30.549

접지도체의 굵기 산정 시 종전까지는 지락고장전류에 해당하는 접지도체를 선정함으로써 필요이상으로 과설계되었다. 실제 접지망으로 유입되는 고장전류는 접속점에서 연결된 각도체로 분산되므로 최대 50[%]에서 최소 25[%] 정도가 된다. 그러므로 경제성이 신뢰성보다 중요하게 생각되는 장소에는 전류분류율 50[%] 적용하고 경제성 보다 신뢰성이 중요하다고 생각되는 장소에는 여유를 두어 100[%]를 적용한다.

3) 공통 사항

전류유입 시간은 계통에 적용된 보호계전 방식을 감안하여 1.0~3.0초로 결정한다. 최대허용온도 T_m 은 압축접속 방식에서는 350[°C]를 적용하며, 경납땜 (Brazed Connection)에서는 450[°C], Exothermic Weld에서는 원래 도체의 용단온도를 적용한다. 그리고 접지도체의 최소 굵기는 기계적 강도와 설치 후 유지보수가 어려운 점을 감안하여 100[mm]로 한다.

2.4.2 단계 4(예비설계)

1) IEEE Std. 80

예비설계에서는 접지망 매설깊이 h를 결정하고, 접지망 Grid 간격 D를 정하여 단계 1에서 구한 접지망의 포설면적으로부터 접지망 한 변의 도체수 n을 구하고 접지계 도체의 총길이 L을 구한다.

2) 제안된 예비설계 방법[2]

제안된 예비설계에서는 접지망 매설깊이 h를 결정하고, 최대허용 접촉전압을 넘지 않는 범위 내에서 비등간격 접지 Grid 간격비율 D_i 와 한 변의 도체수 n을 구하고 접지계 도체의 총길이 L을 구한다.

접지설비 절차에 따른 개선된 접지설비 모델

3) 공통사항

접지봉의 타설 위치는 대지전류 I_G 의 크기와 접지망이 포설될 면적을 감안하여 결정한다.

2.4.3 단계 8(위험전압 계산)

1) IEEE Std. 80

가. 최대예상 접촉전압(E_m)

Mesh전극은 대규모 접지계통에서 많이 이용되는 접지전극이다. Mesh를 포설하는 경우 Mesh전극의 중심부와 4개 모서리 사이에 전위차가 발생한다. 최대예상 접촉전압은 최대접지 전위상승에서 Mesh전위를 뺀 것으로 수식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad [V] \quad (3)$$

여기서, L : 접지도체 전체길이 [m]

$$L_M = L_c + \left\{ 1.15 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right\} L_R$$

이 때 사용되는 Mesh전압 산출을 위한 간격계수 K_m 은 수식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

나. 최대예상 보폭전압(E_s)

접지망 주변의 보폭전압은 수식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_S} \quad [V] \quad (5)$$

여기서 L : 접지도체 전체길이 [m]

$$L_S = 0.75L_c + 0.85L_r$$

이 때 사용되는 보폭전압 산출을 위한 간격계수 K_s 는 수식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right\} \quad (6)$$

보폭전압 산출을 위한 간격계수 K_s 는 매설깊이에 따라 결정되며 매설깊이가 깊을수록 보폭전압이 낮아진다.

다. 전위경도 변화에 따른 보정계수(K_i)

접지망으로 흐르는 전류밀도는 접지망의 가장자리인 모서리 부분이 중심부분 보다 높으므로 이것을 보정하기 위한 보정계수 K_i 를 적용한다. 보정계수 K_i 는 접지도체개수 n 에 대한 일차함수로 표시되며 수식 (7)과 같다.

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (7)$$

여기서 n : 도체개수 [개], $n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4$

$$n_1 = \frac{2L_c}{L_p}$$

$$n_2 = 1(\text{정방형}), \quad n_2 = \sqrt{\frac{L_p}{4VA}} \quad (\text{그외})$$

$$n_3 = 1(\text{정, 직사각형}), \quad n_3 = \left[\frac{L_x L_y}{A} \right]^{\frac{0.7A}{L_x L_y}} \quad (\text{그외})$$

$$n_4 = 1(\text{정, 직사각형, L형}), \quad n_4 = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (\text{그외})$$

2) 제안된 위험전압 계산

가. 최대예상 접촉전압(E_m)

IEEE Std. 80의 접촉전압 계산식은 한 변의 도체개수 보다는 접지도체 간격과 관련이 있으며, 접지도체 간격이 10~12[m]를 초과하는 경우에는 컴퓨터 모의실험 결과보다 크게 나오고 10~12[m]이하에서는 컴퓨터 모의실험 결과보다 작게 나오는 오차가 발생하였다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 IEEE Std. 80 접촉전압 계산식에 접지도체 간격에 따른 컴퓨터 모의실험 보정계수 K_a 을 곱하여 IEEE Std. 80 접촉전압 계산식의 정확도를 높였다.

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot K_a \cdot I_G}{L_M} \quad [V] \quad (8)$$

여기서 L : 접지도체 전체길이 [m]

$$L_M = L_c + \left\{ 1.15 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_2^2}} \right) \right\} L_R$$

이 때 사용되는 최대예상 접촉전압 산출을 위한 접지도체 간격에 따른 컴퓨터 모의실험 보정계수 K_a 는 수식 (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_a = \frac{0.754}{1 - 0.713e^{-0.0924D}} \quad (9)$$

그리고 이 때 사용되는 최대예상 접촉전압 산출을 위한 간격계수 K_m 과 전위경도 변화에 따른 보정계수 K_s 는 IEEE Std. 80의 수식과 동일하다.

2.5 사례연구

사례연구는 IEEE Std. 80-2000 Annex B의 예제 1인 접지봉이 없는 등간격 접지Grid의 Mesh 접지전극을 대상으로 본 논문에서 제안한 접지도체의 굵기, 접지도체의 위험전압, 접지도체의 Grid간격 산정방법을 적용하여 비교 검토 하였다.

2.5.1 접지설계 제원

접지설계에 필요한 기초적인 제원은 표 4와 같다.

표 4. 접지설계의 제원
Table 4. The specification of grounding design

접지설계의 제원	내 용
접지공사 가능구역(A)	63×84[m ²]
대지 저항율(ρ)	400[Ω·m]
자갈(표면층)의 저항율(ρ_s)	2500[Ω·m]
자갈(표면층)의 두께(h_s)	0.102[m]
매설깊이(h)	0.5[m]
고장지속시간(t_s)	0.5[s]
지락시 정상 임피던스(Z_1)	4.0+j10.0[Ω]
지락시 영상 임피던스(Z_0)	10.0+j40.0[Ω]
변압기 임피던스($Z_1=Z_2$)	0.034+j1.014[Ω]
분류계수(S_f)	0.6
선간전압(V)	115/13[kV]
도체 전류 분류율(α)	1.0

2.5.2 접지설계 계산

그림 1의 접지설계 흐름도에 따른 단계별 접지설계 계산은 다음과 같다.

1) 단계 1(현장 자료조사)

주어진 접지설계 제원으로부터 접지공사 구역을 70[m]×70[m]로 포설하면 접지면적은 $A=4900[m^2]$ 이고 대지 저항율은 $\rho=400[\Omega \cdot m]$ 이다.

2) 단계 2(접지도체 굵기 산정)

예상되는 최대 지락전류 I_F 는 장기 계통확장에 의한 1선 지락전류인 다음 식을 적용한다.

$$I_F = (3I_0) = \frac{3E}{3R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)}$$

115[kV] 모선의 고장인 경우

$$I_F = \frac{3 \times 115000 / \sqrt{3}}{3(0) + (4.0 + 4.0 + 10.0) + j(10.0 + 10.0 + 40.0)} = -3045.655 + j3179.757 \approx 3180[A]$$

여기서 $X/R=3.33$

13[kV] 모선의 고장인 경우

$$I_F = \frac{3 \times 13000 / \sqrt{3}}{(0.085 + 0.085 + 0.034) + j(1.142 + 1.142 + 1.014)} = -420.7 - j6801.34 \approx 6814[A]$$

여기서

$$Z_1 = \left(\frac{13}{115} \right)^2 (4.0 + j10) + 0.034 + j1.014 = 0.085 + j1.142$$

$$Z_0 = 0.034 + j1.014$$

$$X/R = 16.2$$

그러므로 6,814[A]가 접지도체의 굵기를 산정하는데 사용된다.

(1) IEEE Std. 80

만약, 도체재료로 경동선을 사용한다면 재료의 물

접지설비 절차에 따른 개선된 접지설비 모델

리적인 정수인 표 2와 수식 (1)을 적용해서 접지도체의 굵기를 구한다.

$$A = I \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \times 10^4}{TCAP}}{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_0} \right) \right]}}$$

$$= 6.814 \sqrt{\frac{\frac{0.5 \times 0.00381 \times 1.7774 \times 10^4}{3.422}}{\ln \left[1 + \left(\frac{1084 - 40}{242 + 40} \right) \right]}}$$

$$= 17.277 \approx 22 [mm^2]$$

이때의 주위온도는 40[°C], 최고허용온도는 1,084 [°C]이며 고장지속시간은 0.5[s]이다.

(2) 제안된 접지도체의 굵기 제안식

만약, 도체재료로 경동선을 사용한다면 도체재질에 따른 비례상수인 표 3과 수식 (2)를 적용해서 접지도체의 굵기를 구한다.

$$A = \frac{aKN\sqrt{t_c}}{[a + b(T_m - T_a)^c]}$$

$$= \frac{1.0 \times 5.780 \times 6.814 \times \sqrt{0.5}}{[-1.21 + 0.91(1084 - 40)^{0.164}]}$$

$$= 17.031 \approx 22 [mm^2]$$

3) 단계 3(안전한계 위험전압 결정)

대지 저항을 $\rho=400[\Omega \cdot m]$ 인 접지 시공 장소에서 자갈(표면층)의 저항을 $\rho_s=2500[\Omega \cdot m]$ 인 자갈을 깔면 반사계수 K는 다음 수식을 적용해서 구한다.

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

$$= \frac{400 - 2500}{400 + 2500} = -0.72$$

반사계수 $K=-0.72$ 와 자갈(표면층)의 두께 $h_s=0.1[m]$ 를 표면층 감소계수로 나타내면 $C_s=0.74$ 이다.

고장지속시간 $t_s=0.5[S]$ 일 때 체중 70[kg]인 사람의 최대허용 보폭전압과 최대허용 접촉전압은 다음 식을 적용해서 구한다.

$$E_{step70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$= (1000 + 6 \cdot 0.74 \cdot 2500) \frac{0.157}{\sqrt{0.5}}$$

$$= 2686.6 [V]$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$= (1000 + 1.5 \cdot 0.74 \cdot 2500) \frac{0.157}{\sqrt{0.5}}$$

$$= 838.2 [V]$$

4) 단계 4(예비설계)

(1) IEEE Std. 80

접지설계의 제원으로부터 접지망 매설깊이 $h=0.5[m]$ 이고, 접지망 포설면적 $A=4900[m^2]$ 에 접지망 Grid간격 $D=7.0[m]$ 로 등간격 배치하는 예비 접지망은 그림 2와 같다. 접지망의 도체개수(n)과 접지망의 외곽길이(L_p), 접지망의 총길이($L_c=L_T$)는 다음 식을 적용해서 구할 수 있다.

$$L_p = (70 + 70) \times 2 = 280 [m]$$

$$L_c = L_T = (70 \times 11) \times 2 = 1540 [m]$$

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4$$

$$= \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \frac{2 \cdot 1540}{280} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 11$$

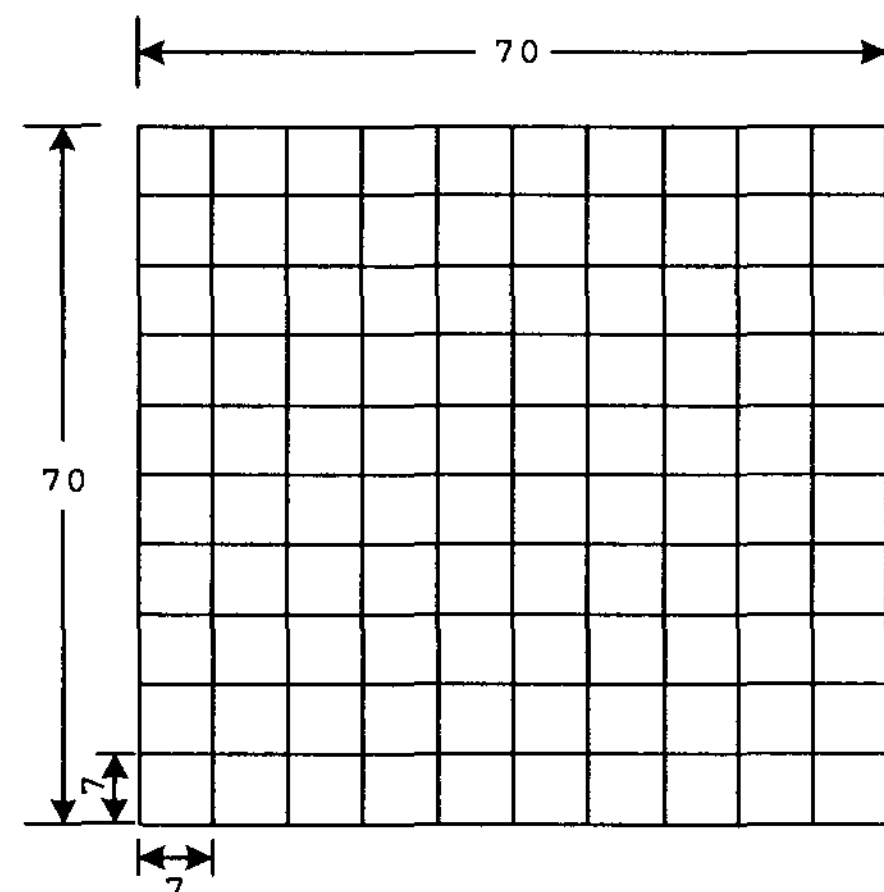


그림 2. 등간격 예비 접지Grid

Fig. 2. The equally spaced preparation grounding grid

(2) 제안된 예비설계 방법(j=8)

접지설계의 제원으로부터 접지망 매설깊이 $h=0.5$ [m]이고, 접지망 포설면적 $A=4,900$ [m²]에 다항함수 형태의 비등간격 접지Grid 수식과 계수[2]를 적용하여 구획개수가 $j=8$ 인 접지Grid 간격을 비등간격으로 배치하는 예비 접지망은 그림 3과 같다.

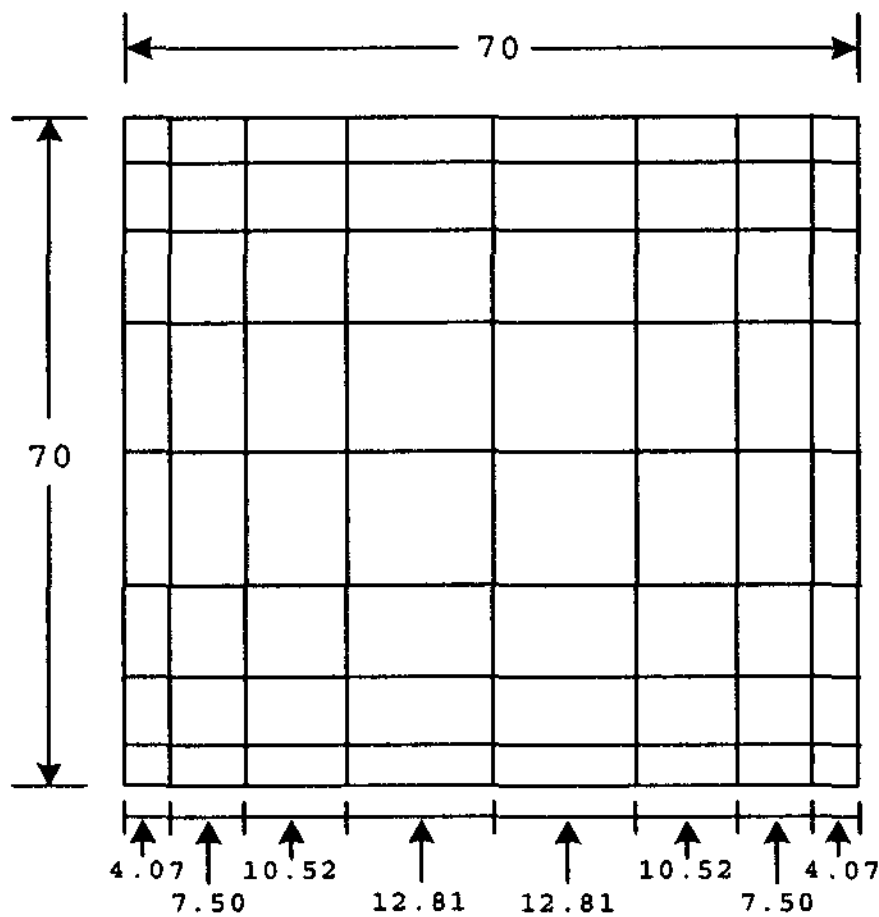


그림 3. 비등간격 예비 접지Grid(j=8)
Fig. 3. The unequally spaced preparation grounding grid(j=8)

표 5. 접지Grid 간격 비율과 실제길이(j=8)
Table 5. The rate of grounding grid intervals and real length(j=8)

구획개수(j=8)		
구획순서(i)	간격비율(D _{ig})	실제길이(L _{ig})
1	5.81	4.07
2	10.86	7.60
3	15.03	10.52
4	18.30	12.81
5	18.30	12.81
6	15.03	10.52
7	10.86	7.60
8	5.81	4.07

단계 3의 최대허용 접촉전압 838.2[V]를 넘지 않는 비등간격 구획 개수(j)는 8개이고, 그때의 비등간격 접지Grid 간격 비율 수식은 $D_8 = -0.4453i^2$

+ 6.3880i - 0.1308이며, 각 구획 순서에 따른 최적의 접지Grid 간격 비율과 실제길이는 표 5와 같이 나타낼 수 있다.

접지망의 도체개수(n)과 접지망의 총길이는 다음 식을 적용해서 구할 수 있다.

$$L_c = L_T = (70 \times 9) \times 2 = 1260 [m]$$

$$n = j + 1 = 9$$

(3) 제안된 예비설계 방법(j=10)

접지설계의 제원으로부터 접지망 매설깊이 $h=0.5$ [m]이고, 접지망 포설면적 $A=4,900$ [m²]에 다항함수 형태의 비등간격 접지Grid 수식과 계수[2]를 적용하여 구획개수가 $j=10$ 인 접지Grid 간격을 비등간격으로 배치하는 예비 접지망은 그림 4와 같다.

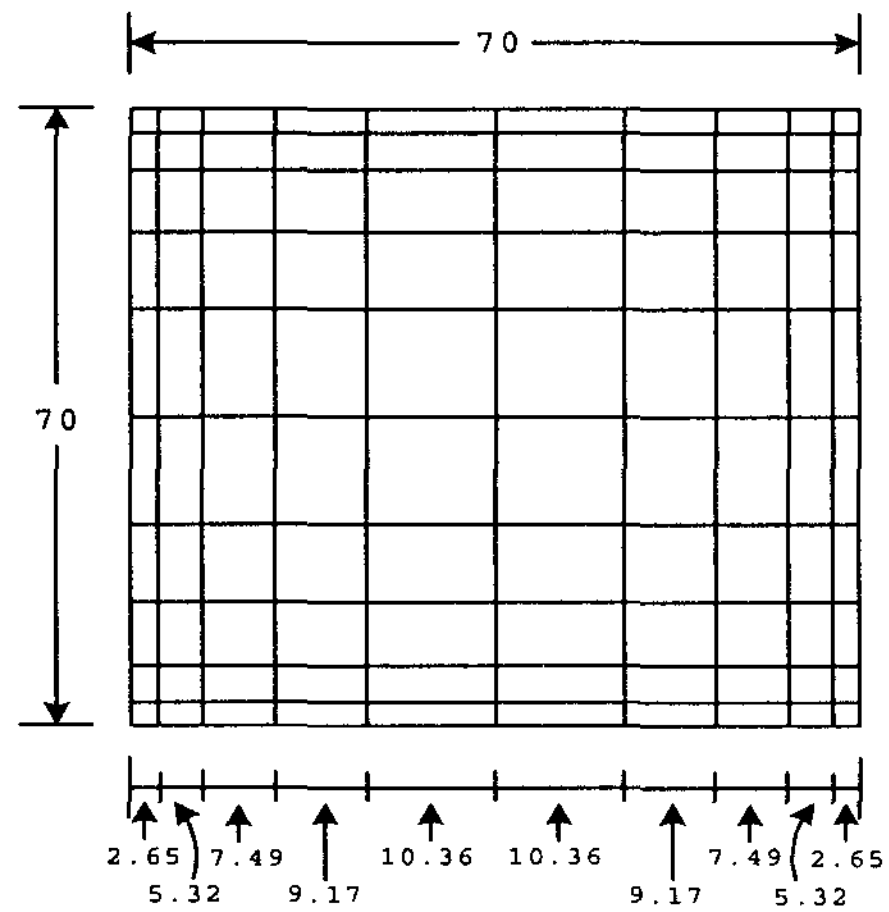


그림 4. 비등간격 예비 접지Grid(j=10)
Fig. 4. The unequally spaced preparation grounding grid(j=10)

등간격 접지Grid와 같은 접지망의 도체개수 $n=11$ 개일 때의 비등간격 접지Grid 간격 비율 수식은 $D_{10} = -0.3514i^2 + 4.8626i - 0.722$ 이며, 각 구획 순서에 따른 최적의 접지Grid 간격 비율과 실제길이는 표 6과 같이 나타낼 수 있다.

접지설비 절차에 따른 개선된 접지설비 모델

표 6. 접지Grid 간격 비율과 실제길이(j=10)
Table 6. The rate of grounding grid intervals and real length(j=10)

구획개수(j=10)		
구획 순서(i)	간격비율(D _{i10})	실제길이(L _{i10})
1	3.79	2.65
2	7.60	5.32
3	10.70	7.49
4	13.11	9.17
5	14.81	10.36
6	14.81	10.36
7	13.11	9.17
8	10.70	7.49
9	7.60	5.32
10	3.79	2.65

접지망의 도체개수(n)과 접지망의 총길이는 다음 식을 적용해서 구할 수 있다.

$$L_c = L_T = (70 \times 11) \times 2 = 1540 [m]$$

5) 단계 5(접지저항 계산)

(1) IEEE Std. 80

접지저항은 다음 식을 적용해서 구한다.

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

$$= 400 \left[\frac{1}{1540} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 4900}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5\sqrt{\frac{20}{4900}}} \right) \right]$$

$$= 2.7756 \approx 2.78 [\Omega]$$

(2) 제안된 방법(j=8)

접지설계 제원과 단계 4에서 구한 구획개수(j)가 8개인 예비 접지망을 CDEGS의 MALT모듈에 적용하여 컴퓨터 모의실험한 결과 접지저항 R_g=2.6463[Ω]이다.

(3) 제안된 방법(j=10)

접지설계 제원과 단계 4에서 구한 구획개수(j)가 10개인 예비 접지망을 CDEGS의 MALT모듈에 적용

하여 컴퓨터 모의실험한 결과 접지저항 R_g=2.5863[Ω]이다.

6) 단계 6(대지전류 계산)

단계 2에서 최대지락전류는 6814[A]의 13[kV] 모선 고장인 경우가 3180[A]의 115[kV] 모선 고장인 경우보다 크지만 다중접지 계통에서의 13[kV] 변압기 권선은 고장전류 일부가 사고지점의 중성점으로 귀로하고 나머지는 다른 접지점으로 흘러 GPR에는 영향을 미치지 않으므로 최대지락전류는 3180[A]이다.

접지설계의 제원으로부터 S_f=0.6, 계통확장계수 C_p=1.0, 비대칭분의 감소계수 D_f=1.0이고 단계 2로부터 최대지락전류 I_F=3180[A]일 때 대지전류는 다음 식을 적용해서 구한다.

$$I_G = S_f \cdot D_f \cdot C_p \cdot I_F$$

$$= 0.6 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 3180 = 1908 [A]$$

7) 단계 7(최대대지전위상승과 최대허용접촉전압 비교, 평가)

최대대지전위상승(GPR)은 단계 5에서 구한 대지전류 I_G와 단계 6에서 구한 접지저항 R_g를 다음 식을 적용해서 구한다.

(1) IEEE Std. 80

$$GPR = I_G \cdot R_g$$

$$= 1908 \cdot 2.78 = 5304 [V]$$

(2) 제안된 방법(j=8)

$$GPR = I_G \cdot R_g$$

$$= 1908 \cdot 2.6463 = 5049.1 [V]$$

(3) 제안된 방법(j=10)

$$GPR = I_G \cdot R_g$$

$$= 1908 \cdot 2.5863 = 4934.7 [V]$$

GPR이 단계 3에서 구한 최대허용 접촉전압 832.8 [V] 보다 크므로 다음단계로 넘어간다.

8) 단계 8(최대예상 접촉전압 E_m 계산)

(1) IEEE Std. 80

접지망의 기준매설깊이 $h_0=1.0[m]$ 이고, 접지망 매설깊이 $h=0.5[m]$ 이므로 매설깊이에 따른 보정계수 K_h 는 다음과 같다.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1.0}} = 1.225$$

접지망 한변의 도체개수는 단계 4에서 구한 $n=11$ [개]를 적용한다. 외곽도체에 대한 내부도체의 보정계수 K_{ii} 는 접지망에 접지봉을 타설하지 않았으므로 다음과 같다.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} = \frac{1}{(2 \cdot 11)^{2/11}} = 0.57$$

지금까지 구한 계수와 단계 4에서 정한 접지망 Grid 간격 $D=7.0[m]$, 접지망 도체의 직경 $d=0.005$ [m] 일 때 최대예상 접촉전압 산출을 위한 간격계수 K_m 은 다음 식을 적용해서 구한다.

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left\{ \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right\} + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left\{ \frac{8}{\pi(2n-1)} \right\} \right] \\ &= \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left\{ \frac{7^2}{16 \cdot 0.5 \cdot 0.005} + \frac{(7+2 \cdot 0.5)^2}{8 \cdot 7 \cdot 0.005} - \frac{0.5}{4 \cdot 0.005} \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{0.57}{1.225} \ln \left\{ \frac{8}{\pi(2 \cdot 11 - 1)} \right\} \right] = 0.994 \end{aligned}$$

전위경도 변화에 대한 보정계수 K_i 는 단계 4에서 구한 한변의 도체개수 $n=11$ 을 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_i &= 0.644 + 0.148n \\ &= 0.644 + 0.148 \cdot 11 = 2.272 \end{aligned}$$

지금까지 구한 계수와 접지설계의 제원으로부터 $\rho=400[\Omega \cdot m]$ 일 때 최대예상 접촉전압(E_m)은 다음 식을 적용해서 구한다.

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \\ &= \frac{400 \cdot 0.994 \cdot 2.272 \cdot 1908}{1540} \\ &= 1119.21[V] \end{aligned}$$

(2) 제안된 방법(j=8)

접지설계 제원과 단계 4에서 구한 구획개수(j)가 8개인 예비 접지망을 CDEGS의 MALT모듈에 적용하여 컴퓨터 모의실험한 결과 최대예상 접촉전압 $E_m=812.26[V]$ 이다.

(3) 제안된 방법(j=10)

접지설계 제원과 단계 4에서 구한 구획개수(j)가 10개인 예비 접지망을 CDEGS의 MALT모듈에 적용하여 컴퓨터 모의실험한 결과 최대예상 접촉전압 $E_m=621.87[V]$ 이다.

9) 단계 9(최대예상접촉전압과 최대허용접촉전압 비교, 평가)

(1) IEEE Std. 80

최대예상 접촉전압(1119.21[V])이 최대허용 접촉전압(838.2[V])보다 높아 단계 11로 넘어가서 예비설계를 수정해야 한다.

(2) 제안된 방법(j=8)

최대예상 접촉전압(812.26[V])이 최대허용 접촉전압(838.2[V])보다 낮아 단계 10으로 넘어가서 최대예상 보폭전압과 최대허용 보폭전압 비교, 평가한 후 최대예상 보폭전압이 최대허용 보폭전압보다 낮으면 단계 12인 상세설계를 한다.

(3) 제안된 방법(j=10)

최대예상 접촉전압(621.87[V])이 최대허용 접촉전압(838.2[V])보다 낮아 단계 10으로 넘어가서 최대예상 보폭전압과 최대허용 보폭전압 비교, 평가한 후 최대예상 보폭전압이 최대허용 보폭전압보다 낮으면 단계 12인 상세설계를 한다.

2.5.3 접지설계 검토

접지면적 $A=70 \times 70=4,900[m^2]$ 에 ANSI/IEEE Std.80

접지설비 절사에 따른 개선된 접지설비 모델

방법(=한변의 도체간격 $D=10[m]$ 인 등간격 접지Grid)과 제안된 접지설계 방법(=구획개수(j)가 8개, 10개인 비등간격 접지Grid)를 비교하면 표 7과 같다.

표 7. 등간격 접지설계와 비등간격 접지설계의 비교
Table 7. The comparison of equally with unequally spaced grounding design

구 분	Std.80 ($j=10$)	제안된 방법	
		$j=10$	$j=8$
최대허용 접촉전압[V]	838.2	838.2	838.2
최대예상 접촉전압[V]	1119.2	621.87	812.26
지표면 대지전위상승[V]	5304	4934.7	5049.1
접지저항[Ω]	2.78	2.5863	2.6463
전체 도체길이[m]	1540	1540	1260

ANSI/IEEE Std.80 방법은 최대허용 접촉전압보다 최대예상 접촉전압이 더 높아 재설계해야하나 제안된 방법은 최대허용 접촉전압보다 최대예상 접촉전압이 낮아 조건을 만족하므로 다음 단계를 수행하면 된다.

구획개수가 $j=10$ 인 ANSI/IEEE Std.80과 제안된 방법을 비교하면 전체 도체길이 $L_T=1540[m]$ 만 같고 나머지는 제안된 방법이 적은 것을 알 수 있다. 이것은 같은 재료비를 사용할 경우 ANSI/IEEE Std. 80보다 제안된 방법이 신뢰성 면에서 더 우수하다는 것을 의미하며 구획개수가 $j=10$ 인 ANSI/IEEE Std.80과 $j=8$ 인 제안된 방법을 비교하면 모든 면에서 제안된 방법이 적으므로 제안된 방법을 사용하는 것이 신뢰성과 경제성 면에서 우수하다는 것을 의미한다.

3. 결 론

본 논문에서는 접지 시스템 설계시 일반적으로 사용하는 ANSI/IEEE Std.80-2000을 기본으로 새로운 접지도체의 굽기 산정방법, 접지도체의 위험전압 산정방법, 접지도체의 Grid간격 산정방법을 적용하여 보완된 새로운 접지시스템 설계 방법을 제시하고 ANSI/ IEEE Std. 80-2000 Annex B의 사례연구를 통해 IEEE Std. 80방식과 비교 검토하여 신뢰성 및 경제성을 검증하였다.

References

- [1] ANSI/IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2000.
- [2] 최홍규, 송영주 "최적 접지도체간격에 관한 대수함수제어", 한국조명전기설비학회, Vol. 20, No. 5, 2006.
- [3] 최홍규, 송영주 "접지도체의 간격배치에 따른 개선된 접지설비 모델", 한국조명전기설비학회, Vol. 19, No. 3, 2005.
- [4] 최홍규, 송영주 "접지도체 굽기 산정에 관한 수식제어 모델링", 한국조명전기설비학회, Vol. 20, No. 4, 2006.
- [5] B.Phithakwong, M.Kando "New Techniques the Computer-Aided Design for Substation Grounding", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Vol 3, 2000.

◇ 저자소개 ◇

송영주 (宋榮柱)

1970년 11월 21일생. 1993년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995~2001년 포스콘 기술연구소 연구원. 2004년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001년~현재 홍익대학교 전기설비연구센터 수석연구원. (주)한국이알이시 이사.