

컴퓨터 프로그램을 이용한 접지설계

Grounding Grid Design Using Computer Program

최종기, 안용호, 정길조
(J.K.Choi, Y.H.Ahn, G.J.Jung)

Abstract

Grounding grid design of substation and power generating plant has been conducted based on IEEE Std 80 or 665, which provides simple formula to estimate grounding performance such as grounding resistance, max. step and touch voltage. Although these formula are applicable for many situations, they contains many assumptions and consequent limits of application. This paper shows the limits of IEEE formula and the virtue of estimating grounding performance of grid using numerical method or computer program.

Key Words : substation, grounding, IEEE Std-80, touch voltage, step voltage

1. 서 론¹⁾

전력계통 접지계는 정상상태에서 전력계통의 안정적인 운전과 사고시 고장전류를 대지로 안전하게 분산시켜 작업원과 기기의 안전을 확보하는데 그 목적이 있다. 발변전소 접지설계에서 접지계의 성능을 대표하는 접지저항과 사고시 최대 접촉/보폭전압의 예측은 안전하고 경제적인 설계를 위한 매우 중요한 작업이다.

현행 발변전소 접지설계시 대부분 IEEE Std-80[1,2], Std-665[3]에서 제시한 간략한 접지저항, 접촉/보폭전압 계산식을 이용하고 있다. 그러나 이와 같은 간략한 계산식은 사용이 편리한 대신 많은 가정과 전제를 포함하게 되어 정확한 접지성능 예측이 어렵고, 안전여유를 지나치게 많이 포함하는 경우도 생긴다.

본 논문에서는 IEEE Std-80의 수계산식의 적용상 한계와 그 대안, 즉 컴퓨터 프로그램을 활용한 접지설계에 관하여 기술하였다. 이를 위하여 기존의 설계방식과 유사하면서도 동시에 단순하고 직

관적인 그래픽 사용자 인터페이스를 갖는 접지망 설계 프로그램(GDP; Grounding grid Design Program)을 제작하였다. 사례연구에서는 GDP와 IEEE Std-80 계산식 및 상용 프로그램의 계산결과와 비교하였고, IEEE Std-80 방식에 비하여 보다 정확한 지표면 전위경도와 최대 접촉/보폭전압을 예측할 수 있음을 보였다.

2. 본 론

2.1 수계산 접지설계방식의 적용한계와 대안

2.1.1 접지저항 계산식의 적용한계

접지망의 접지저항 계산에는 다음 네가지 수식이 주로 사용되고 있다. (1)식은 균일토양구조에서의 접지망을 동일한 면적(A)의 원판으로 환산한 계산식이다(매설깊이는 0). 원판이 아닌 접지망에서 도체길이가 고려되도록 수정된 식이 (2)식이다. (3)식은 Sverak이 제안한 식으로 매설깊이를 고려한 식이다. 접지망에 접지봉을 추가한 경우의 접지저항 계산식으로 Schwarz가 제안한 (4)식이 있다.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (1)$$

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \quad (2)$$

한전 전력연구원 송변전기술그룹
(대전시 유성구 문지동 103-16)
Fax: 042-865-5876
E-mail : jkchoi@kepri.re.kr

$$R_g = \rho \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{20/A}} \right) \quad (3)$$

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \quad (4)$$

(단, ρ :대지저항율, A:접지면적, L:도체총길이, h:매설깊이, R_1 :접지망의 접지저항, R_2 :접지봉의 접지저항, R_{12} :접지망과 접지봉의 상호저항)

일반적인 접지망의 경우, 접지도체를 통하여 대지로 누설되는 전류는 접지망 중간보다는 외곽으로 더 많이 빠져나간다. 이는 도체가 조밀히 배열된 중간부분은 전류누설 통로가 중복되나, 외곽은 상대적으로 중복이 덜하기 때문이다. 즉, 도체길이 L은 접지망 외곽에 위치한 경우가 중간에 위치한 경우에 비해 접지저항 저감효과가 더 좋으나, (1)~(4)식은 이러한 효과가 고려되지 않는다. 이러한 불균일한 전류분포는 특히 지표면전위경도에 매우 큰 영향을 준다. 이에 대하여는 2.1.2절에서 보다 자세히 언급하도록 한다. 또한 (1)~(3)식은 수직방향 도체(ex.접지봉)를 고려할 수 없으며, 식(4) 또한 접지망과 접지봉의 상호저항 R_{12} 를 정확히 결정하는 것이 어려운 문제가 있다.

2.1.2 접촉(보폭)전압 계산식의 적용한계

접촉/보폭전압의 계산에는 아래 (5), (6)식이 사용된다.

$$E_{touch} = \rho K_m K_i \frac{I}{L} \quad (5)$$

$$E_{step} = \rho K_s K_i \frac{I}{L} \quad (6)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dh} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_s}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \quad (7)$$

$$K_i = 0.656 + 0.172n \quad (8)$$

(단, ρ :대지저항율, I:접지망 유입전류, L:접지도체 총 길이, K_m :접촉전압 계수, K_s :보폭전압 계수, K_i :전류 분균일 보정계수, D:접지도체 간격, h:매설깊이, d:접지도체 직경, n:접지망 한번 도체갯수, K_{ii} , K_h : 기타 계수)

K_m 계수의 유도는 그림 1과 같이,

- 1) 무한길이의 도체가 등간격으로 매설되어 있으며,
- 2) 도체를 통한 누설전류밀도는 일정하고,
- 3) 최대 접촉전압은 최외곽의 첫째와 둘째 도체의 중간점에서 발생한다는 가정하에 유도되었다.

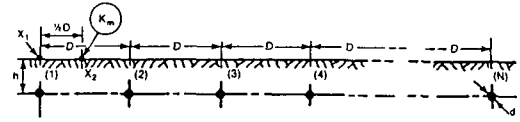


Fig A4
Full Model of Nonsimplified Definition of $K_m E_g$

그림 1. K_m 계수 유도모델

이와 같이 유도된 K_m 계수를 이용하여 유도된 접촉전압은 식(9)와 같다.

$$E_{touch} = \rho K_m J = \rho K_m \frac{I}{L} \quad (9)$$

(단, J:전류밀도, I:접지망 유입전류, L:도체 총길이)

그러나 이 식은 2.1.1절에서 언급한 바와 같이 접촉/보폭전압에 큰 영향을 주는 접지망의 불균일한 누설전류밀도가 고려되지 않은 식이다. 따라서 이를 보정하기 위한 전류 불균일계수 K_i 가 곱해져서 식 (5)와 같이 되었다.

식(8)의 K_i 계수는 1950년 Walter Koch의 실험에 근거하여 유도되었으며, 한쪽 변이 120 mm인 여러 가지 형상의 접지망 축소모델 시험에 근거한 것이다([1] 부록J 참조).

지금까지 기술한 (5)~(8)식에 포함된 많은 가정과 K_i 계수 유도에 사용된 축소모델 실험의 한계로 인하여, 다음과 같은 적용상의 제한을 갖는다([1] pp.151~155 참조).

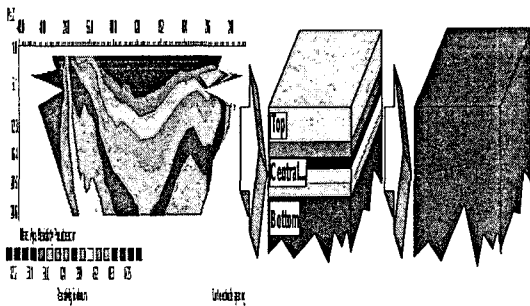
- 1) 평행도체 개수는 25개를 초과할 수 없고,
- 2) 도체간격은 2.5 m 이상이어야 하고,
- 3) 매설깊이는 0.25 m 이상 2.5 m 미만이어야 하고,
- 4) 도체반경은 매설깊이의 1/4보다 작아야 하고,
- 5) 접지망 긴변과 짧은변의 비는 2.5:1 이하이어야 하며,
- 6) 도체간격은 매설깊이의 20배 이상, 접지도체 직경의 10배 이상이어야 한다. 위 적용한계를 벗어나는 경우, IEEE Std 80은 컴퓨터 프로그램의 사용을 권고하고 있다.

2.1.3 등가대지저항을 추정하는 한계

IEEE Std-80 계산식의 근본적인 한계는 실제 모양에 등가인 균일모양모델을 간단한 수작업이나 경험에 의하여 추정하는 작업이 매우 어렵다는 것이다. 모양의 전기적 특성은 접지계의 성능에 결정적인 영향을 미치며 모양모델에 오류가 포함될수록, 접지계의 정확한 성능예측은 어렵다는 것은 자명한 사실이다. 앞서 접지저항이나 보폭/접촉전압

계산식 (1)~(9)는 대지저항을 ρ 만으로 토양특성을 반영하며, 이는 균일토양모델(그림2(c))을 가정한 것이다.

실제토양에 등가인 토양모델을 결정하는 과정은 다음과 같다. Wenner 4전극법에 의하여 그림 2(a)와 같은 실제토양의 겉보기 대지저항을 측정 한 후, 그 측정결과와 Sunderburg / Hummel의 보조곡선을 이용하여 2(b)와 같은 수평다층의 등가토양으로 등가화한 후, 이를 다시 2(c)의 균일토양모델로 등가화한다. 그러나 실제 토양이 균일토양이 아닌 경우, 이를 균일토양으로 등가화하는 것은 매우 어려우며, 무엇에 대한 등가인가도 문제가 된다.



(a) 실제토양 (b) 다층토양 (c) 균일토양
그림 2. 토양의 등가모델링 단계

2.1.4 컴퓨터 프로그램에 의한 접지저항 계산

지금까지 기술한 IEEE Std 80 계산식을 이용한 접지설계방식의 적용상 한계를 극복하기 위한 대안은 컴퓨터 프로그램을 이용하는 방법이다[4~10]. 즉, 접지도체를 작은 조각으로 쪼개고 각 조각들 사이의 전압/전류 관계식의 해를 구하여 접지저항과 접촉/보폭전압을 구하는 것으로써 가정을 최소화한다. 또한 다층토양모델을 직접 사용함으로써 균일토양구조로 등가화하는 과정 없이 접지저항과 접촉/보폭전압을 계산할 수 있다.

아래에 간략한 계산과정을 보였다. V_n, I_n 은 각 n 번째 도체조각의 전압, 전류를 나타내며, 저주파수에서 접지도체내의 전압강하는 접지도체 전위상승에 비하여 매우 작으므로 무시하였다. 따라서 각 접지도체 조각의 전압은 V_{GPR} 로 일정하다고 가정하였다.

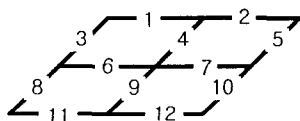


그림 3. 접지망을 도체조각으로 분할

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \dots & Z_{1,12} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & \dots & Z_{2,12} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{12,1} & Z_{12,2} & \dots & Z_{12,12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{12} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$V_1 = V_2 = \dots = V_{12} = V_{GPR} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \dots & Z_{1,12} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & \dots & Z_{2,12} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{12,1} & Z_{12,2} & \dots & Z_{12,12} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1/V_{GPR} \\ I_2/V_{GPR} \\ \vdots \\ I_{12}/V_{GPR} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + \dots + I_{12} \quad (13)$$

$$R_g = \frac{V_{GPR}}{I_{tot}} = \frac{1}{I_1/V_{GPR} + I_2/V_{GPR} + \dots + I_{12}/V_{GPR}} \quad (14)$$

2.2 GDP(Grounding grid Design Program)

2.2.1 그래픽 사용자 인터페이스 모듈

각종 설계조건 입력, 계산모듈과의 통신, 접지저항, 접촉/보폭전압 및 지표면 전위분포 화면출력 등의 기능을 수행한다. 기존의 수계산 설계작업에 익숙한 사용자의 편의성을 위하여 각종 설계조건 입력을 단순화하였다.

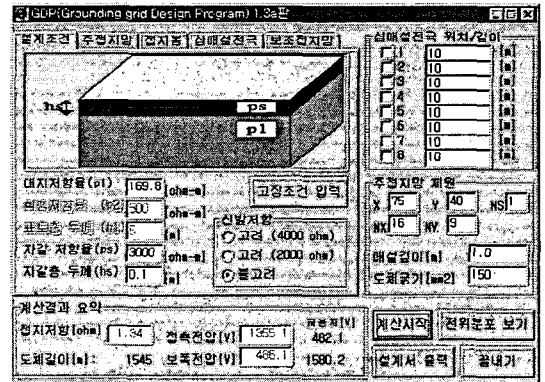


그림 4. GDP 초기화면

2.2.2 계산모듈

계산모듈은 Heffel[4]와 Meliopoulos[5]의 연구결과를 주로 참고하여 작성되었다. 보다 자세한 내용은 참고문헌[6~11,14]을 참조하기 바란다. 계산모듈은 접지망 뿐만 아니라 접지봉에 의한 접지저항저감, 지표면전위 및 접촉/보폭전압의 저감효과의 계산이 가능하도록 작성되었다.

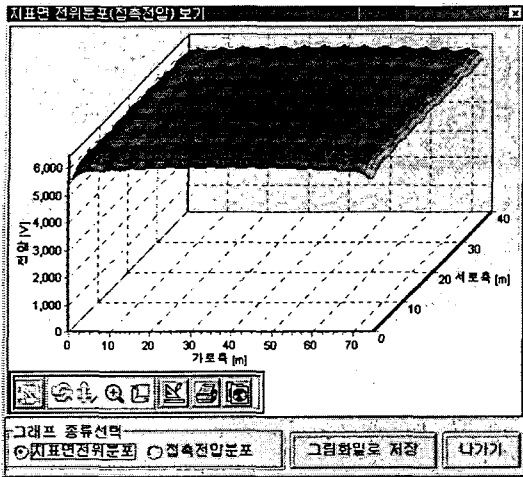


그림 6. 지표면 전위분포 계산결과 출력

3. 사례연구

GDP 계산결과와 신뢰성을 검증하기 위하여, 상용 프로그램인 MALT[6]와 계산결과를 비교하였다. 그림 7과 같은 여러 형상의 접지망 및 토양모델에서 접지망의 접지저항과 가로축 방향(그림 7(a)~(c)의 점선)의 지표면전위분포를 계산한 결과가 그림 11~13과 같았다. 토양모델1은 500[Ωm]의 균일토양, 토양모델2와 3은 각각 표토층은 500[Ωm](층두께 5[m])이고 심층은 1000[Ωm], 표토층이 1000[Ωm](층두께 5[m])이고 심층은 500[Ωm]인 수평2층 토양모델이다. CASE 뒤의 첫 번째 숫자(1~3)는 접지망 제원을 나타내며, 두 번째 숫자는 토양모델을 나타낸다. 즉, CASE-11은 그림 7(a)의 접지망1이 그림 7(d)의 토양모델1에 매설된 경우를 뜻한다. 접지망의 면적은 가로 90m, 세로 60m, 매설깊이 1.0m이며 도체굵기는 150mm²이다. 각각의 접지망 제원을 요약한 것이 표1이다.

표 1. 접지망 제원 요약

	도체 간격	매설 깊이	접지망 시공	접지망 외곽보강	비고
접지망1	10m	1.0	X	X	-
접지망2	10m	1.0	X	0	최외곽 도체 간격은 5m
접지망3	10m	1.0	0	X	접지망 외곽에 3m분 시공

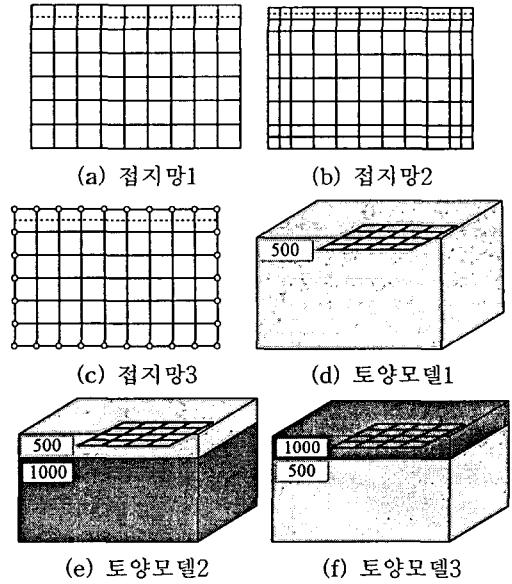


그림 7. 접지망과 토양모델 종류

그림 8은 GDP와 MALT 계산결과 비교를 요약한 그림이다. 균일토양모델에서 접지저항과 지표면전위의 계산결과 최대 오차는 2% 미만이었으며, 2층토양모델에서는 접지저항은 최대 7.7%, 지표면전위는 최대 9.4%의 오차가 있었다. 그림 8은 각각 다른 토양모델 내의 등간격 접지망(그림 7(a))의 지표면 전위분포를 비교한 것이다.

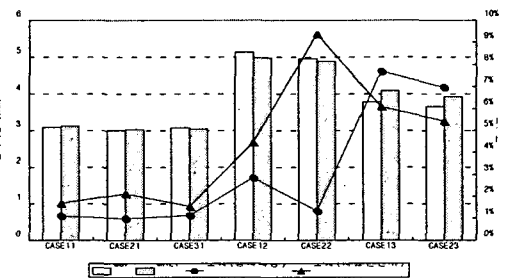


그림 8. GDP와 MALT의 계산결과 비교요약

그림 7의 토양모델1에서 등간격 접지망(그림 7(a))일때와 외곽보강 접지망(그림 7(b))일때 지표면전위 계산결과 비교를 표2에 요약하였다. 계산결과에 의하면 외곽의 도체보강에 의하여 접촉전압이 상당히 저감되며 이는 전위경도가 완화되어 접지도체 전위와의 전위차가 작아지기 때문이다. 그러나 IEEE Std-80의 계산식은 식(5)에서 접지도체의 길이의 증가분밖에 고려되지 않으며 GDP 계산결과에 비해 접촉전압이 절반정도밖에 저감되지 않는 것처럼 계산된다(표 2 참조).

표 2. 외곽도체 보강에 따른 접촉전압 저감

	등간격	접지망 외곽보강	저감율
토양1	569 [V] (case11) (640 [V])	383 [V] (case21) (543 [V])	▽32.7% (▽15.2%)
토양2	665 [V] (case12)	302 [V] (case22)	▽54.6%
토양3	943 [V] (case13)	613 [V] (case23)	▽35.0%

: IEEE Std-80에 의한 결과 (접지전류 1 [kA])

4. 결 론

기존의 IEEE Std-80 계산식에 의한 접지설계 방식과 컴퓨터 프로그램을 이용하는 방법에는 각각의 장단점이 있다. 수계산은 작업이 간단한 대신 안전여유를 많이 포함하게 되며, 컴퓨터 프로그램에 의한 방법은 계산은 정확하나 과정이 복잡하다. 대지저항율이 비교적 높고 부지가 한정된 경우, 컴퓨터 프로그램을 이용함으로써 접지망 외곽의 도체보강이나 접지봉에 의한 접촉/보폭전압 저감효과를 정확히 평가할 수 있다. 그러나 수계산에 비하여 안전여유는 적어지며, 복잡한 연산을 직접 확인할 수 없으므로 계산과정의 직관적 이해가 어려운 불편이 있다.

본 논문에서는 IEEE Std-80 계산식의 적용상 한계를 기술하였으며, 기존의 사용이 복잡한 상용 접지설계 프로그램 인터페이스를 지양한 최대한 단순한 사용자 인터페이스와 접지저항/지표면전위 계산모듈을 통합시킨 접지설계 프로그램을 제작하였고, 이를 이용한 사례연구를 통하여 접지저항, 지표면 전위경도와 접촉/보폭전압을 더 정확히 평가할 수 있음을 보였다.

[참고문헌]

- [1] IEEE guide for safety in AC substation grounding, ANSI/IEEE Std 80-1986
- [2] Practical application of ANSI/IEEE standard 80-1986, IEEE tutorial course
- [3] IEEE guide for generating station grounding, ANSI/IEEE Std 665-1995
- [4] R.J.Heppe, "Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for non-uniform current distribution", IEEE Trans. on PAS, PAS-98, No.6, Nov./Dec., 1979
- [5] A.P.Meliopoulos, Power system grounding &

transients, Marcel Dekker Inc., 1988
 [6] SES ltd., MALT Users' Manual, 1998