Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 19, No.6, pp. 22~28 September 2005 논문 19-6-4

500[kV] 송전철탑 접지설계를 위한 다층토양구조의 균일매질 등가화에 관한 연구

(A Study on the Identification of Equivalent Uniform Soil Model for Grounding Design of 500[kV] Transmission Towers)

최종기* · 이성두 · 이동일 · 정길조 · 김경철
(Jong-Kee Choi · Sung-Doo Lee · Dong-Il Lee · Gil-Jo Jung · Kyung-Chul Kim)

요 약

접지설계에 있어서 토양의 전기적 특성은 접지극의 형상과 더불어 가장 중요한 설계요소 중 하나이며 이러한 토양의 전기적 특성은 접지극이 매설될 지역의 고유한 저항률, 즉 고유저항률(specific earth resistivity)로 대표되어 왔다. 이처럼 고유저항률에 근거한 수작업 접지설계는 복잡한 구조와 특성을 갖는 실제 토양을 균일한 매질로 등가화하는 절차를 필요로 한다. 본 논문에서는 미얀마 500[kV] 송전철탑 수작업 접지설계를 위하여 수평다층토양을 균일매질로 등가화하는 절차를 제시하였다.

Abstract

The electrical characterstic of earth is the most dominant factor for grounding design and an earth is typically represented by a uniform medium with the specific earth resistivity, which is unique for a specific site. For a hand-working grounding design using a specific earth resistivity requires a process converting a real earth of complex medium into a simple uniform medium. In this paper, we suggest a procedure to convert a multi-layered earth s into a simpler uniform earth for grounding design of Myanmar 500[kV] transmission towers.

Key Words : specific earth resistivity, grounding design, 500[kV] transmission tower

1. 서 론

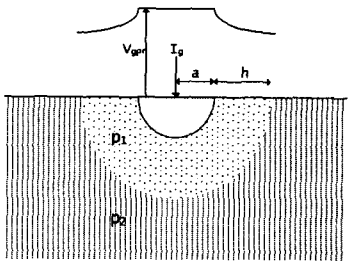
접지저항은 접지극의 성능을 정량적으로 보여주는 가장 대표적인 지수이며 접촉 및 보폭전압과 더불어 접지설계의 중요한 요소이다. 이같은 접지설계에 있어서 토양의 전기적 특성은 접지극의 형상과 더불어 가장 중요한 설계요소 중 하나로써 일반적으로 토양의 전기적 특성은 접지극이 매설될 지역의 고유한 저항률, 즉 고유저항률(specific earth resistivity)로 대표되어 왔다. 실제로 토양은 복잡한 매질과 구조로 구성되어 있어 정확한 토양구조나 특

*. 주저자 : 한전전력연구원 전력계통연구실 선임연구원
Tel : 042-865-5854, Fax : 042-865-5844
E-mail : jkchoi@kepco.co.kr
접수일자 : 2005년 4월 18일
1차심사 : 2005년 4월 20일, 2차심사 : 2005년 5월 17일
심사완료 : 2004년 5월 20일

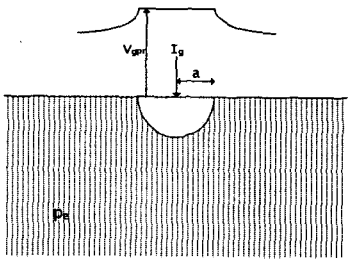
성의 모델링에는 많은 측정작업과 복잡한 해석절차가 필요하다. 그러나 토양특성의 기후 등 주변환경에의 의존성과 접지극 매설시 굴착 등에 의한 토양구조와 특성의 변동 등 불확실한 요인이 많기 때문에 2차원 모델 이상의 정밀한 토양모델링은 비현실적일 수 있으며 이런 이유로 접지설계를 위한 토양모델링에는 수평다층구조 또는 균일구조로 등가화하여 사용하는 것이 일반적이다. 정확한 접지성능의 예측을 위해서는 수평다층 토양구조에 근거한 컴퓨터 알고리즘을 이용하는 것이 가장 좋은 방법이지만, 이를 위한 컴퓨터 프로그램이 없는 경우에는 고유저항률로 대표되는 균일토양모델에 근거한 수작업 설계를 해야만 한다.

본 논문에서는 수작업 접지설계를 위한 고유저항율 산정절차를 제시하고자 하며, 사례연구로서 미얀마 500[kV] 송전철탑의 수작업 접지설계를 위한 수평다층토양의 균일매질 등가화 절차를 제시하였다.

2. 전극크기와 고유저항률의 관계



(a) 반구형 2층토양모델
(a) 2 Layered Hemispheric Soil



(b) 균일 토양모델
(b) Equivalent Uniform Soil

그림 1. 2층 토양과 그에 등가인 균일토양
Fig. 1. 2 Layered soil and its equivalent uniform soil model

이 장에서는 그림 1과 같은 반지름이 a인 반구전극과 균일 및 2층 구조 반구형 토양모델의 예를 통하여 접지전극의 크기와 고유저항률의 상관관계에 대하여 기술하고자 한다. 먼저 그림 1(a)과 같은 2층의 반구형 토양을 등가의 균일토양으로 변환하기 위한 등가화 대상은 반경 a인 반구전극의 접지저항 또는 전위(V_{gpr})로 정의한다. 그림에서 ρ_1, ρ_2는 각각 첫째, 둘째층의 대지저항률이며 h는 첫째 층의 두께, ρ_e는 균일매질로 가정하였을 때 접지저항에 등가인 고유저항률을 각각 나타낸다.

그림 1(a)의 반구전극에 전류 I_g를 주입한 경우 전극의 전위는 다음 식에 의해 구해진다.

$$V_{gpr} = \int_a^\infty E(r)dr = \int_a^\infty \rho(r)J(r)dr = \int_a^{a+h} \frac{\rho_1 I_g}{2\pi r^2}dr + \int_{a+h}^\infty \frac{\rho_2 I_g}{2\pi r^2}dr \quad (1)$$

접지저항(R_g)은 식 (2)로 표현되며, 그림 1(b) 전극의 접지저항과 같아지기 위한 균일매질의 등가저항률 ρ_e는 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$R_g = \frac{V_{gpr}}{I_g} = \frac{\rho_1}{2\pi}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+h}\right) + \frac{\rho_2}{2\pi}\left(\frac{1}{a+h}\right) \quad (2)$$

$$R_g = \frac{\rho_e}{2\pi a} \Leftrightarrow \rho_e = \frac{\rho_1 h + \rho_2 a}{a+h} \quad (3)$$

전극의 크기(a)와 등가저항률(ρ_e)의 관계를 알아보기 위하여 아래 식 (4)를 이용하여 등가저항률을 계산한 결과가 그림 2와 같았다.

$$\rho_e = \frac{\rho_1 + k\rho_2}{1+k} \quad (\text{단}, \ k = \frac{a}{h}) \quad (4)$$

그림 2에서 볼 수 있듯이 첫 번째 반구토양의 두께(h)가 같다면 전극의 반지름(a)가 클수록 등가저항률은 두 번째 반구토양 저항률(ρ_2)에 가까워지며, 반대로 전극이 작을수록 등가저항률은 첫 번째 반구토양의 저항률(ρ_1)과 유사한 값이 된다.

이상의 기술에서 알 수 있듯이 토양의 고유저항률은 토양의 전기적 특성과 더불어 접지전극의 크기와 밀접한 관계가 있다.

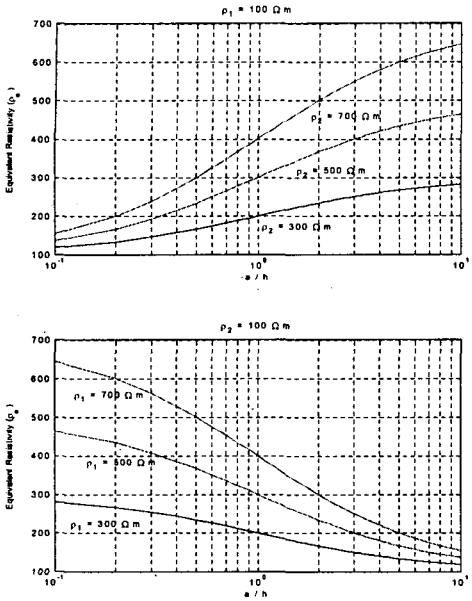


그림 2. 접지극 반지름에 따른 등가저항률
Fig. 2. Equivalent Resistivity vs. Ratio of electrode radius to top layer thickness

3. 컴퓨터를 이용한 고유저항률 계산

본 장에서는 500[kV] 송전선 경과지의 대지저항률 측정, 등가토양 식별, 접지저항 계산 및 등가저항률의 산정절차 및 결과를 기술한다. 그림 3은 겉보기저항 측정회로를 보인 것이며, 전극간격(a)이 커질수록 심층토양에 해당하는 정보를 얻게되므로 측정된 저항을 저항률로 환산하여 전극간격에 대한 저항률곡선으로부터 그 토양의 대략적인 구조를 예측할 수 있게 된다.

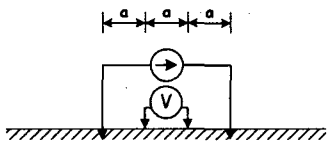


그림 3. Wenner 4전극법
Fig. 3. Wenner's 4-pin method

먼저 500[kV] 송전선 예정 경과지를 따라 약 20[km] 지점마다 한두군데씩 총 21개 지역에서 Wenner법에 의해 겉보기저항률을 측정하였다. 지역별로 고유한 겉보기저항률 곡선과 수평다층구조 토양모델로부터 계산되는 겉보기저항률곡선의 오차를 목적함수로 하는 최적화문제의 해를 구함으로써 수평다층구조 토양의 대지저항률 및 각 층의 두께를 식별하였다. 그림 4는 4군데 대표지역의 측정치 및 수렴 후 계산치를 비교한 것이다(표 1은 등가토양 식별결과).

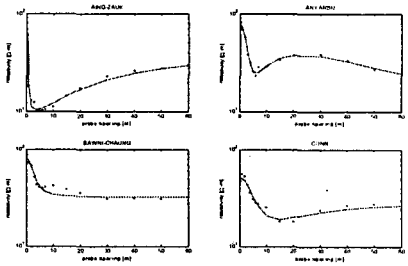


그림 4. 겉보기저항률 측정 및 계산치 비교사례
Fig. 4. Examples of measured and computed apparent resistivity curves

표 1. 등가의 수평다층토양구조 식별예
Table 1. Examples of the identified equivalent horizontal layered soil structure

지역:AING_ZAUK	대지저항율[[Ωm]]	층 두께[m]
표토층	133.579	0.31
중간층	10.335	12.19
심 층	42.896	∞
(ANYARSU)	대지저항율[[Ωm]]	층 두께[m]
표토층	79.494	1.82
중간층1	9.836	2.74
중간층2	78.884	14.11
심 층	12.318	∞
(BAWNI)	대지저항율[[Ωm]]	층 두께[m]
표토층	80.356	1.75
심 층	32.567	∞
(CONN)	대지저항율[[Ωm]]	층 두께[m]
표토층	50.775	3.43
중간층	14.087	10.32
심 층	29.892	∞

접지저항 계산을 위한 철탑의 탑각 구조체 모델링을 위하여 그림 5에서 보이는 것과 같이 최소한의 접지도체들로써 탑각구조체 접지를 표현하였다.

탑각의 접지저항 계산알고리즘은 다음과 같다. 우선 4개의 탑각접지극(그림 5 右)을 m개의 세그먼트들로 분할하여 각 세그먼트들의 전압과 누설전류간

방정식을 기술한다(식 (5)). 쪼개진 접지도체의 i번째 세그먼트와 j번째 세그먼트 사이의 간섭저항을 r_{ij}, j번째 세그먼트들로부터 누설되는 전류와 전압을 각각 i_j, v_j 표시한다(식 (6)). 접지도체의 임피던스에 의한 전압강하를 무시하여 모든 도체세그먼트는 같은 전위(V_{gpr})를 갖는다고 가정하면 식(6)의 전압벡터의 미지수는 m개에서 1개로 줄어들고, 주입되는 전류는 사용자가 지정하는 값이므로 전류벡터의 합은 기지의 값이므로(식 (7)), 미지수와 방정식의 개수가 동일해지고 유일한 해를 얻을 수 있다[1,2].

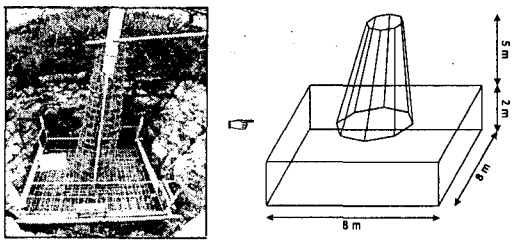


그림 5. 탑각접지 모델
Fig. 5. Tower footing model

$$V = R \cdot I \tag{5}$$

$$R = \begin{pmatrix} r_{1,1} & \cdots & r_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m,1} & \cdots & r_{m,m} \end{pmatrix},\quad V = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{pmatrix},\quad I = \begin{pmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_m \end{pmatrix} \tag{6}$$

$$V_{gpr} = v_1 = v_2 \ \cdots \ v_m, \qquad I_{grid} = \sum_{j=1}^{m} i_j \tag{7}$$

$$\frac{1}{V_{gpr}} I = R^{-1} \cdot 1 \qquad (\text{단, } 1 = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}) \tag{8}$$

행렬 R의 역행렬을 식 (9)로 표현하면 철탑접지극의 전위와 접지저항은 식 (10)과 (11)에 의해 구해진다.

$$R^{-1} = \begin{pmatrix} r_{1,1}' & \cdots & r_{1,m}' \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m,1}' & \cdots & r_{m,m}' \end{pmatrix} \tag{9}$$

$$V_{gpr} = \frac{I_{grid}}{\sum_{k=1}^{m}\left(\sum_{j=1}^{m} r_{k,j}' \cdot i_j\right)} \tag{10}$$

$$\therefore R_g = \frac{V_{gpr}}{I_{grid}} \tag{11}$$

균일매질 토양을 상정한 경우 접지극의 접지저항은 토양의 고유저항률에 비례한다. 즉, 저항률이 2배가 되면 접지저항도 2배가 된다. 따라서 일정한 저항률, 예를 들어 100[Ωm]의 토양에 매설된 탑각의 접지저항을 R_{100}이라 하고 수평다층 토양모델에 매설된 탑각저항을 R_{multi}라고 하면, R_{multi}와 동일한 접지저항이 나오는 균일매질의 고유저항률(ρ_e)은 다음식에 의해 구해진다.

$$\rho_e = \frac{R_{multi}\ \Omega}{R_{100}\ \Omega} \times 100\ \Omega m \tag{12}$$

3장 서두에서 언급한 21개 지역에서 식별한 수평다층토양모델에 매설된 접지저항(R_{multi})의 계산결과와 식 (12)를 이용하여 환산한 고유저항률을 표 2에 요약하였다. 본 논문에서 수평다층의 등가 토양모델의 식별 및 탑각 접지저항의 계산에는 CDEGS 프로그램을 이용하였다[3].

표 2. 접지저항 및 등가고유저항률 계산결과
Table 2. Calculation result of ground resistances and specific earth resistivities

No	접지저항[Ω]	등가고유저항률[[Ωm]]
1	0.26	18.63
2	0.46	33.50
3	0.47	33.94
4	0.29	20.79
5	0.31	22.60
6	0.31	22.67
7	0.08	5.92
8	0.40	28.88
9	0.26	18.48
10	1.17	84.33
11	0.80	57.98
12-1	0.06	4.26
12-2	0.08	5.99
13	0.25	17.91
14	0.24	17.04
15	1.57	113.36
16	0.59	42.45
17	0.24	17.40
18	0.28	20.14
19	0.33	23.61
20	0.85	61.23
21-1	0.14	9.82
21-2	0.07	4.98

4. 수작업설계를 위한 고유저항률 환산

3장의 고유저항률을 역산하는 작업은 컴퓨터 알고리즘을 이용하여 이미 접지저항을 알고 있는 상태에서 역산한 것이므로 큰 의미가 없는 작업이다. 그러나 접지저항 계산을 위한 컴퓨터 프로그램이 없는 경우에는 접지저항을 계산하기 위해서는 먼저 고유저항률을 알아야만 한다. 이 장에서는 이같은 수작업 접지설계를 위하여 수평다층구조의 토양을 균일매질로 환산하는 절차에 대하여 기술한다.

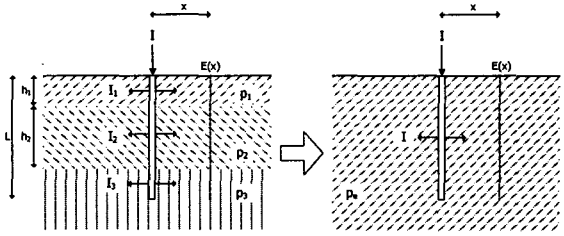


그림 6. 수평다층토양에 등가인 균일토양의 고유저항률 산정모델

Fig. 6. Mathematical model for converting multi-layered soils into equivalent uniform soils

그림 6은 수평다층토양에 길이 L인 접지봉이 매설되었을 때 접지봉으로부터 수평거리 x만큼 떨어진 곳의 전계 E(x)에 등가인 균일토양의 고유저항률을 유도하기 위한 모델을 보인 것이며, 여기서는 수평 3층 구조를 가정하였다.

그림 6에서 수평토양 각 층의 두께는 h_1, h_2이고 세 번째 층의 두께(h_3)는 무한대가 되며 각 층의 저항률은 각각 ρ_1, ρ_2 ,ρ_3로 표기한다. k번째 층에서 접지봉으로부터 수평거리 x인 점에서의 전류밀도를 $J_k(x)$ 로 표기하고(식 (13) 참조), 각 층의 저항률과 전류밀도가 반비례 관계에 있다고 가정하면 각각의 층에서 수평거리 x지점의 전계 및 균일토양에서의 전계 사이에는 식 (14)의 관계가 성립하며, k번째 층에 위치한 접지봉에서 누설되는 전류의 합 I_k는 식 (15)로 표현된다.

$$J_k(x)=\frac{I_k}{2\pi x h_k},\quad E_k(x)=\rho_k J_k(x) \tag{13}$$

$$\rho_1 J_1(x)=\rho_2 J_2(x)=\rho_3 J_3(x)=\rho_e J(x) \tag{14}$$

$$\frac{\rho_1 I_1}{2\pi x h_1}=\frac{\rho_e I}{2\pi x L} \Leftrightarrow I_1=\frac{\rho_e \cdot I \cdot h_1}{\rho_1 \cdot L} \tag{15}$$

그림 6에서 수평다층토양 각 층에 매설된 부분의 접지봉에서 누설되는 전류의 총 합은 I이므로 식 (16)에 식 (15)를 대입하고 등가 고유저항률 ρ_e로 정리하면 식 (17)을 얻을 수 있다.

$$I=I_1+I_2+I_3=\frac{\rho_e I}{L}\left(\frac{h_1}{\rho_1}+\frac{h_2}{\rho_2}+\frac{L-h_1-h_2}{\rho_3}\right) \tag{16}$$

$$\rho_e=\frac{L}{\dfrac{h_1}{\rho_1}+\dfrac{h_2}{\rho_2}+\dfrac{L-h_1-h_2}{\rho_3}} \tag{17}$$

식 (17)은 그림 5의 수평3층토양의 예이므로 이를 다층토양에 적용할 수 있는 일반식으로 다시 정리하면 봉길이가 L일 때의 등가 고유저항률은 식 (18)과 같다.

$$\rho_e(L)=\frac{L}{\displaystyle\sum_{k=1}^{n-1}\frac{h_k}{\rho_k}+\frac{L-\displaystyle\sum_{k=1}^{n-1}h_k}{\rho_n}} \tag{18}$$

(단, ρ_e : 등가깊이 L일 때의 등가저항률[[Ωm]],
h_k : k번째 지층의 두께[m],
ρ_k : k번째 지층의 저항률[[Ωm]],
L : 다음 두 조건을 만족하는 등가깊이[m]
$\left(L > \displaystyle\sum_{k=1}^{n-1}h_k \text{ and } L \le \sum_{k=1}^{n}h_k\right)$)

상기 등가저항률 환산식은 수직성분의 전류밀도 벡터는 고려하지 않는 등 엄밀한 이론에 근거한 식은 아니지만, 다층토양모델의 고려가 가능한 별도의 컴퓨터 해석프로그램이 없는 경우의 대안으로써 국내에서는 널리 사용되고 있다. 실제로 한전의 변전소 접지설계기준에서는 수작업 접지설계시 154[kV] 변전소는 15[m], 345[kV] 변전소는 20~25[m]의 등가깊이(L)에 해당하는 저항률을 적용하도록 규정하고 있으며[4], 유도장애 계산을 위한 정보통신부 기술기준에서는 등가깊이 60[m]에 해당하는 저항률을

산정하여 사용하고 있다.

식 (18)과 2장에서 이미 식별한 수평다층 토양모델들을 이용하면 표 2에서 구한 등가 고유저항률 참값과 동일한 계산치가 나오는 등가깊이 L의 역산이 가능하다. 예를 들어 표 2의 4번째 지역은 수평2층 토양구조로 식별되었는데 표토층 저항률(ρ_1)이 50.775[Ωm], 심층 저항률(ρ_2)이 14.087[Ωm], 표토층 두께(h_1)가 3.43[m]이었고 등가 고유저항률(ρ_e)의 참값은 20.79[Ωm]이다(표 1 참조). 이 경우 식 (18)을 이용하여 역산한 등가깊이 L은 식 (20)에 의하여 구해진다.

$$\begin{aligned} L &= \rho_e \cdot h_1 \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1(\rho_e - \rho_2)} \\ &= 20.79 \times 3.43 \times \frac{50.775 - 14.087}{50.775(20.79 - 14.087)} \\ &= 7.69 \ m \end{aligned} \tag{19}$$

표 1에서 역산한 고유저항률 참값과 각 지역을 대표하는 수평다층 토양모델들로부터 역산한 등가깊이 L을 모두 보인 것이 그림 7이다.

그림 7에서 지역별로 등가깊이에 큰 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 1장에서 기술한 바와 같이 각 지역의 고유한 대지저항률은 토양특성과 접지전극 크기의 함수인데 본 논문에서는 전극크기 즉 탑각구조체 크기는 모든 지역에서 동일한 반면 토양특성은 지역마다 다르기 때문에 초래되는 일이다. 이같은 결과는 컴퓨터 해석프로그램 없이 정확한 고유저항률 또는 접지저항을 계산하는 것이 매우 곤란함을 반증하고 있다. 어느 정도의 오차를 감수하고서라도 수작업에 의한 접지설계를 해야만 하는 경우 고유저항률 산정을 위한 등가깊이(L)의 결정에 어떤 방법으로든 지침제시가 필요하다. 이를 위하여 이상의 역산한 등가깊이 평균을 취한 값이 약 7.4[m]이며 최대/최소값을 제외했을 때의 평균값은 약 6.6[m]을 얻었다. 따라서 등가깊이 평균값을 지침으로 하는 경우, 고유저항률 산정을 위한 등가깊이(L)은 7[m]가 적당하다고 판단된다.

일단 고유저항률을 얻게 되면 수작업에 의한 탑각의 접지저항의 계산은 탑각구조체 접지를 그 표면적(S)과 같은 면적을 갖는 반구전극으로 등가화함으로써 구할 수 있다(식 (20)~(21)).

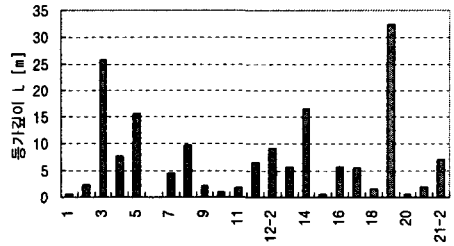


그림 7. 등가깊이 역산결과
Fig. 7. Results of back-calculated depths

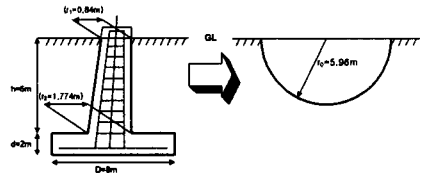


그림 8. 탑각구조체 면적에 등가인 반구전극
Fig. 8. Hemispheric electrode whose surface area is equal to tower footing ground

현행 한국전력공사의 가공송전 지지물 접지기준[6]을 따르면 탑각접지저항은 4개의 탑각, 즉 반구전극 4개의 병렬접지저항에 전극간 간섭을 고려하여 간섭계수 0.5를 적용한다(식 (22)).

$$\begin{aligned} S &= 2\pi h\left(\frac{r_1 + r_2}{2}\right) + (2D^2 - \pi r_2^2) + 4Dd \\ &= 2\pi \times 4.1 \times \left(\frac{1.774 + 0.84}{2}\right) \\ &\quad + (2 \times 8^2 - \pi\, 1.774^2) + 4 \times 8 \times 2 \\ &= 223 \ [m^2] \end{aligned} \tag{20}$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{S}{2\pi}} = \sqrt{\frac{223}{2\pi}} = 5.959 \ [m] \tag{21}$$

$$\therefore \ R_g = \frac{\frac{1}{4} \times \frac{\rho}{2\pi r_0}}{0.5} \tag{22}$$

참고로 표 2의 고유저항률을 식 (22)에 대입하여 계산한 접지저항과 컴퓨터 알고리즘을 이용한 계산치의 오차는 약 4[%]이다.

그림 9는 등가깊이 7[m]를 적용하여 계산한 고유저항률을 적용했을 때 식 (22)를 이용하여 계산한 접지저항과 컴퓨터 프로그램의 계산결과(표 1)의 오차를 보인 것이며, 절대값으로 환산한 평균오차는 약 20[%]였다.

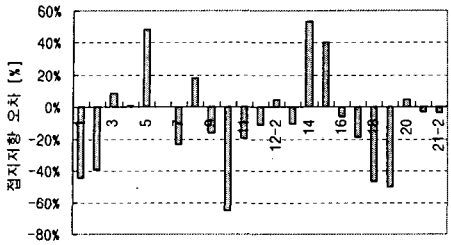


그림 9. 수계산한 접지저항의 오차
Fig. 9. Errors of hand-calculated ground resistance

이같은 오차는 수작업에 의해 접지설계를 해야만 하는 경우에 감수해야만 하는 필연적인 것이며, 이를 감소시키기 위한 최선의 대안은 다층구조 토양의 고려가 가능한 컴퓨터 프로그램을 이용하는 것이다. 그러나 이것이 불가능한 경우, 등가깊이(L)를 적절히 조절하여 고유저항률을 가혹한 방향으로 산정함으로써 수작업에 따르는 오차발생 가능성을 최소화하는 노력이 요구되며 이는 접지설계자의 경험과 기술적 판단의 문제이다. 또한 2장의 기술한 바와 같이 이러한 등가깊이는 전극크기와 토양특성의 함수이므로 토양조건이 미얀마와 다른 우리나라에 적용하기 위해서는 추가적인 검토가 필요하다.

5. 결 론

본 논문에서는 미얀마 500[kV] 송전철탑의 접지설계를 위하여 수평다층구조의 토양에 등가인 균일매질토양의 고유저항률을 산정하기 위한 등가깊이의 지침으로서 7[m]를 제시하게 된 기술적 근거를 보였다. 이같은 작업은 수평다층 토양구조에 근거한 컴퓨터 알고리즘의 이용이 불가능하여 등가의 균일토양 고유저항률을 구하고 이를 토대로 수작업 접지설계를 해야만 하는 경우를 위한 것이다.

References

[1] F.P.Dawailibi, D.Mukhedkar, "Optimum design of substation grounding in two-layer earth structure; Part I-Analytical study", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-94, No.2, pp.252-261, Mar./Apr. 1975.
[2] R.J.Heppe, "Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for nonuniform current distribution", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No.6, pp.1978-1989, Nov./Dec. 1979.
[3] F. P. Dawalibi, F. Donoso, "Integrated Analysis Software for Grounding, EMF, and EMI", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, No. 2, April 1993, pp. 19-24.
[4] 한국전력공사, 변전설계기준 2602, 2000.
[5] IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, pp.63-64.

◇ 저자소개 ◇

최종기 (崔鍾基)
1969년 2월 1일생. 1992년 동국대학교 전기공학과 졸업. 1995년 홍익대학교 전기제어과 졸업(석사). 1995년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

이성두 (李性斗)
1973년 10월 10일생. 1996년 경상대학교 전기공학과 졸업. 1998년 부산대학교 전기공학과 졸업(석사). 1999년 한국전력공사 입사 1999년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 연구원.

이동일 (李東一)
1958년 3월 15일생. 1979년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1983년 인하대학교 졸업(석사). 1992년 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 1978년 한국전력공사 입사. 2004년~현재 한전 전력연구원 송전기술그룹 그룹장.

정길조 (鄭吉朝)
1949년 8월 16일생. 1983년 중앙대 전기공학과 졸업. 1995년 연세대 공학대학원 전기공학과 졸업(석사) 2002년 숭실대학교 전기공학과 졸업(박사). 1974년 한국전력공사 입사. 1996년~현재 한전 전력연구원 차세대전력기술그룹 그룹장.

김경철 (金慶哲)
1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982년 국방과학연구소 연구원. 1982~1984년 NMSU 전기공학과 석사. 1984~1988년 UTA 전기공학과 박사. 1988~1991년 한국 전기연구소 선임연구원. 1991년~현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수.