

500 kV 송전철탑 접지설계를 위한 대지저항률 산정에 관한 연구

최종기, 이성두, 이동일, 정길조, 김경철*
한전 전력연구원, *홍익대학교

A Study on the Identification of Specific Earth Resistivity for Grounding Design of 500 KV Transmission Towers

Jongkee Choi, Sungdoo Lee, Dongil Lee, Giljo Jung, Kyungchul Kim*
Korea Electric Power Research Institute, *Hongik University

Abstract - 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 신세 토양을 균일한 매질로 등가화하는 절차를 필요로 한다. 본 논문에서는 미얀마 500 kV 송전철탑 수작업 접지설계를 위하여 수평다층토양을 균일매질로 등가화하는 절차를 제시하였다.

1. 서 론

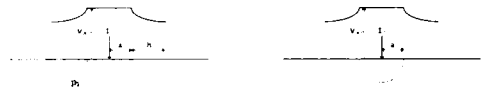
접지설계에 있어서 토양의 전기적 특성은 접지극의 형상과 더불어 가장 중요한 설계요소 중 하나로서 일반적으로 토양의 전기적 특성은 접지극이 매설될 지역의 고유한 저항률, 즉 고유저항률(specific earth resistivity)로 대표되어 왔다. 실제로 토양은 복잡한 매질과 구조로 구성되어 있어 정확한 토양구조나 특성의 모델링에는 많은 측정작업과 복잡한 해석절차가 필요하다. 그러나 토양특성의 기후 등 주변환경에의 의존성과 접지극 매설시 굴착 등에 의한 토양구조와 특성의 변동 등 불확실한 요인이 많기 때문에 2차원 모델 이상의 정밀한 토양모델링은 비현실적일 수 있으며 이런 이유로 접지설계를 위한 토양 모델링에는 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 고유저항률 산정절차를 제시하고자 하며, 사례연구로서 미얀마 500 kV 송전철탑의 수작업 접지설계를 위한 수평다층토양의 균일매질 등가화 절차를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 전극크기와 고유저항률의 관계

이 장에서는 그림 1과 같은 반지름이 a인 반구전극과 균일 및 2층구조 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_{Rg})로 정의한다. 그림에서 ρ_1, ρ_2 는 각각 첫째, 둘째층의 대지저항률이며 h는 첫째 층의 두께, ρ_e 는 균일매질로 가정하였을 때 접지저항에 등가인 고유저항률을 각각 나타낸다.



(a) 반구형 2층모델 (b) 균일 토양모델
그림 1. 2층토양과 그에 등가인 균일토양

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

$$V_{Rg} = \int_a^{\infty} E(r)dr = \int_a^{\infty} \rho(r)I_R(r)dr$$

$$= \int_a^{a+h} \frac{\rho_1 I_R}{2\pi r^2} dr + \int_{a+h}^{\infty} \frac{\rho_2 I_R}{2\pi r^2} dr \quad (1)$$

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

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

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

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

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

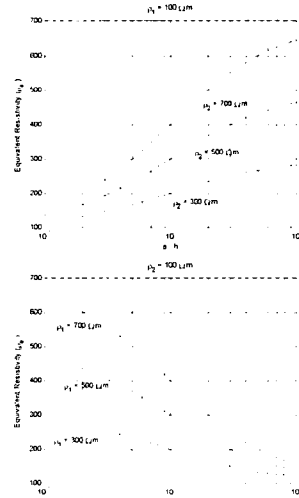


그림 2. 접지극 반지름에 따른 등가저항률

위그림에서 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 전극

이 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.

2.2 탐각구조체 접지저항 및 등가저항률 계산

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

먼저 500 kV 송전선 예정 경과지를 따라 약 20 km 지점마다 한두군데씩 총 21개 지역에서 Wenner법에 의해 결보기저항률을 측정하였다. 지역별로 고유한 결보기저항률 곡선과 수평다층구조 토양모델로부터 계산되는 결보기저항률곡선의 오차를 목적함수로 하는 최적화문제의 해를 구함으로써 수평다층구조 토양의 대지저항률 및 각 층의 두께를 식별하였다.

접지저항 계산을 위한 철탐의 탐각 구조체 모델링을 위하여 그림 3에서 보이는 것과 같이 최소한의 접지도체들로써 탐각구조체 접지를 표현하였다.

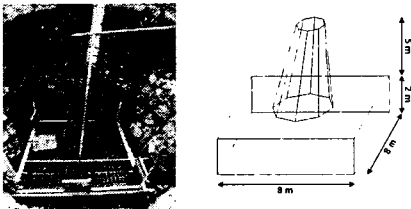


그림 3. 탐각접지 모델

서두에서 언급한 21개 지역에서 식별한 수평다층토양 모델에 매설된 접지저항(R_{min})의 계산결과와 등가고유저항률을 표 1에 요약하였다. 본 논문에서 수평다층의 등가 토양모델의 식별 및 탐각 접지저항의 계산에는 CDECS 프로그램을 이용하였다[3].

표 1. 접지저항 및 등가고유저항률 계산결과

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

2.3 등가저항률 산정깊이의 역산

고유저항률을 역산하는 작업은 컴퓨터 알고리즘을 이용

하여 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.

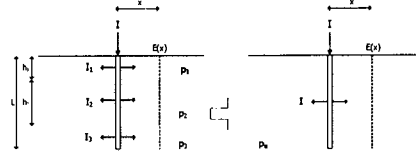


그림 4. 다층토양에 등가인 균일토양 고유저항률 산정

그림 4는 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 3층구조를 가정하였다.

그림 4에서 수평토양 각 층의 두께는 h_1, h_2 이고 세 번째 층의 두께(h_3)는 무한대가 되며 각 층의 저항률은 각각 ρ_1, ρ_2, ρ_3 로 표기한다. k번째 층에서 접지봉으로부터 수평거리 x인 점에서의 전류밀도를 $J_k(x)$ 로 표기하고(식 (5) 참조), 각 층의 저항률과 전류밀도가 반비례 관계에 있다고 가정하면 각각의 층에서 수평거리 x지점의 전계 및 균일토양에서의 전계 사이에는 식 (6)의 관계가 성립하며, k번째 층에 위치한 접지봉에서 누설되는 전류의 합 I_k 는 식 (7)로 표현된다.

$$J_k(x) = \frac{I_k}{2\pi x h_k}, \quad E_k(x) = \rho_k J_k(x) \quad (5)$$

$$\rho_1 J_1(x) = \rho_2 J_2(x) = \rho_3 J_3(x) = \rho_e J(x) \quad (6)$$

$$\frac{\rho_1 J_1}{2\pi x h_1} = \frac{\rho_e J}{2\pi x L} \Leftrightarrow I_1 = \frac{\rho_e \cdot I \cdot h_1}{\rho_1 \cdot L} \quad (7)$$

그림 6에서 수평다층토양 각 층에 매설된 부분의 접지봉에서 누설되는 전류의 총 합은 I 이므로 식 (8)에 식 (7)를 대입하고 등가 고유저항률 ρ_e 로 정리하면 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{\rho_e J}{L} \left(\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{L - h_1 - h_2}{\rho_3} \right) \quad (8)$$

$$\rho_e = \frac{L}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{L - h_1 - h_2}{\rho_3}} \quad (9)$$

식 (9)는 그림 4의 수평3층토양의 예이므로 이를 다층토양에 적용할 수 있는 일반식으로 다시 정리하면 봉길이 L일 때의 등가 고유저항률은 식 (10)과 같다.

$$\rho_e(L) = \frac{L}{\sum_{k=1}^{n-1} \frac{h_k}{\rho_k} + \frac{L - \sum_{k=1}^{n-1} h_k}{\rho_n}} \quad (10)$$

(단, ρ_e : 등가깊이 L일 때의 등가저항률 [Ωm],

h_k : k번째 층의 두께 [m],

ρ_k : k번째 층의 저항률[Ωm],

L : 다음 두 조건을 만족하는 등가깊이 [m]

$$(L > \sum_{k=1}^n h_k \text{ and } L \leq \sum_{k=1}^n h_k))$$

상기 등가저항률 환산식은 수직성분의 전류밀도벡터는 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 m의 등가깊이(L)에 해당하는 저항률을 적용하도록 규정하고 있으며 [4], 유도장애 계산을 위한 정보통신부 기술기준에서는 등가깊이 60 m에 해당하는

저항률을 산정하여 사용하고 있다.

식 (10)과 앞에서 이미 식별한 수평다층 토양모델을 이용하면 표 1에서 구한 등가 고유저항률 참값과 동일한 계산치가 나오는 등가깊이 L을 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 (10)을 이용하여 역산한 등가깊이 L은 식 (11)에 의하여 구해진다.

$$L = \rho_e \cdot h_1 \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1(\rho_e - \rho_2)}$$

$$= 20.79 \times 3.43 \times \frac{50.775 - 14.087}{50.775(20.79 - 14.087)} \quad (11)$$

$$= 7.69 \text{ m}$$

표 1에서 역산한 고유저항률 참값과 각 지역을 대표하는 수평다층 토양모델로부터 역산한 등가깊이 L을 모두 보인 것이 그림 5이다.

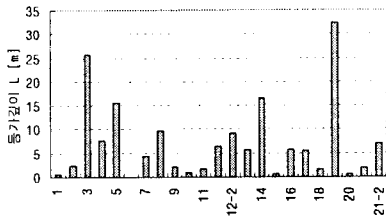


그림 5. 등가깊이 역산결과

위 그림에서 지역별로 등가깊이에 큰 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서 기술한 바와 같이 각 지역의 고유한 대지저항률은 토양특성과 접지전극 크기의 함수인데 본 논문에서는 전극크기 즉 탐각구조체 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 m이며 최대/최소값을 제외했을 때의 평균값은 약 6.6 m를 얻었다. 따라서 등가깊이 평균값을 지침으로 하는 경우, 고유저항률 산정을 위한 등가깊이(L)은 7 m가 적당하다고 판단된다.

일단 고유저항률을 얻게 되면 수작업에 의한 탐각의 접지저항의 계산은 탐각구조체 접지물 그 표면적(S)과 같은 면적을 갖는 반구전극으로 등가화함으로써 구할 수 있다(식(12)~(13)).

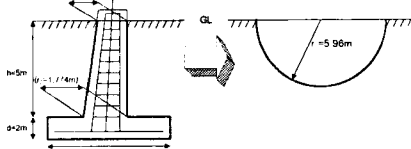


그림 6. 탐각구조체 면적에 등가인 반구전극

현행 한국전력공사의 가공송전 지지물 접지기준[6]을 따르면 탐각접지저항은 4개의 탐각, 즉 반구전극 4개의 병렬접지저항에 전극간 간섭을 고려하여 간섭계수 0.5를 적용한다(식 (14)).

$$S = 2\pi h \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) + (2D^2 - \pi r_2^2) + 4Dd$$

$$= 2\pi \times 4.1 \times \left(\frac{1.774 + 0.84}{2} \right) + (2 \times 8^2 - \pi \times 1.774^2) + 4 \times 8 \times 2$$

$$= 223 \text{ [m}^2\text{]} \quad (12)$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{S}{2\pi}} = \sqrt{\frac{223}{2\pi}} = 5.959 \text{ [m]} \quad (13)$$

$$\therefore R_x = \frac{\frac{1}{4} \times \frac{\rho}{2\pi r_0}}{0.5} \quad (14)$$

참고로 표 2의 고유저항률을 식 (14)에 대입하여 계산한 접지저항과 컴퓨터 알고리즘을 이용한 계산치의 오차는 약 4% 이다.

그림 7은 등가깊이 7 m를 적용하여 계산한 고유저항률을 적용했을 때 식 (14)를 이용하여 계산한 접지저항과 컴퓨터 프로그램의 계산결과(표 1)의 오차를 보인 것이며, 절대값으로 환산한 평균오차는 약 20% 였다.

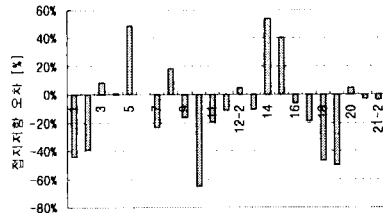


그림 7. 수계산한 접지저항의 오차

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 서론에서 기술한 바와 같이 이러한 등가깊이는 전극크기와 토양특성의 함수이므로 토양조건이 미양마와 다른 우리나라에 적용하기 위해서는 추가적인 검토가 필요하다.

3. 결 론

본 논문에서는 미양마 500 kV 송전철탐의 접지설계를 위하여 수평다층구조의 토양에 등가인 균일매질토양의 고유저항률을 산정하기 위한 등가깊이 지침제시의 기술적 근거를 기술하였다. 이같은 작업은 수평다층 토양구조에 근거한 컴퓨터 알고리즘의 이용이 불가능하여 등가의 균일토양 고유저항률을 구하고 이를 토대로 수작업 접지설계를 해야만 하는 경우를 위한 것이다.

[참고 문헌]

- [1] F.P.Dawalibi, 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