

최적 접지설계를 위한 대지파라미터의 추정

○ * * * * *
이 형 수, 이 관 형, 이 봉 용, 심 건 보

* 한국산업안전공단 산업안전연구원 ** 홍익대학교 공과대학 전기계이공학과

Estimation of Soil Resistivity Parameter for Optimal Grounding Design

○ * * * * *
Hyung-Soo Lee, Kwan-Hyung Lee, Bong-Yong Lee, Keon-Bo Shim

* Industrial Safety Research Institute, KISCO, ** Hong-Ik University

< Abstract >

Accurate estimation of soil resistivity parameters are very important in the design of grounding systems.

This paper presents a useful methodology for the optimal estimation of soil parameters based on the weighted least square concepts using a set of earth resistivity measurements by Wenner method. And, this paper develops a computer simulation programming for the estimation of soil parameters.

Results are presented and compared with the results of other methods.

1. 서 론

접지는 전력계통에서의 지락사고나 낙뢰 등으로 인한 고장 전류를 안전하게 대지로 방류하여 전기설비에 충전되는 위험을 방지하고 인체를 보호하기 위하여 필수적인 기술이다. 최근에는 전력설비가 대용량화, 대규모화되고, 도시지역에 설치되는 전기설비가 증가하고 있는 반면 설비의 시설을 위한 용지난이 가중됨에 따라 정확한 접지설계의 필요성이 증대되고 있다.

우리나라에서는 대부분의 접지설계가 발전소, 변전소 및 송배전선로 등 대규모 설비인 경우는 IEEE Standard 80 설계기준[1]에 절대적으로 의존하고 있는 실정이다. 그러나, 이 기준은 균질대지를 전제로 송전선로의 변전소를 대상으로 하며, 많은 가정을 전제로 하고 있기 때문에 현장에서 직면하고 있는 여러 가지의 복잡하고 특수한 고려사항을 정확하게 반영하지 못하는 약점을 가지고 있다. 따라서 설계가 과장되고 시공 비용이 많이 드는 반면, 안전하지 못한 접지설계가 되는 결과를 초래하고 있는 실정이다.

접지설계의 첫번째 단계는 접지의 목적을 충분히 달성할 수 있는지의 성패에 직접적인 영향을 주는 파라미터(대지저항율과 지층의 두께)를 구하는 것이다. 대지저항율 측정은 지표면의 특정 지점에 전류를 가하여 이때 전기적 응답으로부터 도전 매개체(대지)의 전기적 특성을 결정하는 것으로, Wenner법[2]이 널리 이용되고 있다. 그러나, 대지는 일반적으로 지층에 따라 대지저항율이 다른 다층구조(multi-layer)이며, 대지저항율은 계절과 온도, 습도 등의 영향을 받는 중속변수이므로 이를 정확하게 추정하는 것은 대단히 복잡한 문제이다.

이와 같은 문제에 대하여 대지를 2층구조로 등가모델링하여 대지파라미터를 구하는 여러가지의 해석적 기법들이 제시되었다[3-4]. 일반적으로 지금까지 제시된 기법들은 컴퓨터에 의한 수치해석법으로서 대지저항율 측정값과 이에 적합한 수학적 모델로 정식화하여 구한 계산값이 잘 맞도록 해를 구하는 방법으로 대부분이 최소자승법을 이용하였으며, 알고리즘의 안정성, 수렴성과 같은 점을 고려하여 선택하고 있다[5-6].

본 연구는 접지시스템 해석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션모델로, 대지저항율의 측정값을 이용하여 대지파라미터를 추정하는 새로운 알고리즘을 제안하고자 한다. 본 연구에서 제안한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 이미 알려진 측정값에 대한 사례연구를 수행하였으며, 다른 방법에 의한 결과와 비교 검토하였다.

2. 대지저항율의 정식화

접지 설계를 위한 대지저항율의 계산을 위하여 여러가지의 파라미터에 대한 내용을 먼저 정리하여 보자.

첫째로 대지가 2층의 수평구조를 이루고 있다는 가정하에 상층의 저항율 ρ_1 과 하층의 저항율 ρ_2 , 상층의 두께를 z 라고 하면 각 층간의 반사계수(reflection factor) K 는 다음과 같이 결정된다.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (1)$$

두번째로 Wenner법에서의 극간격 r_j 를 사용하여 겹보기 대지저항율을 표시하면 식 (2)와 같다.

$$\rho_{aj} = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{\sqrt{A_i}} - \frac{1}{\sqrt{B_i}} \right) \right] \quad (2)$$

$$\text{여기서, } A_i = 1 + \left(\frac{2nz}{r_j} \right)^2$$

$$B_i = A_i + 3$$

z : 상층 두께 (Upper layer thickness)

r_j : 전극 간격

따라서 대지저항율 측정값과 겹보기 대지저항율의 관계는 식 (3)과 같이 정리될 수 있으며, 이 때 같은 극간격에서 계절(온도)이나 습도의 변화에 대하여 여러번의 측정이 이루어졌다면 오차의 평균(mean)과 분산(variance)은 식 (4)와 같다. 또한, 대지저항율의 측정값과 겹보기저항율의 집합은 식 (6)으로 정리된다.

$$\rho_{mj} = \rho_{aj}(x) + \epsilon_j \quad (3)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

여기서,

ρ_{mj} : j 번째 대지저항측정값

$\rho_{aj}(x)$: j 번째 겹보기 대지저항값

표 1. 계산의 최종값 비교

Case # 1

Proposed Method:

- Upper Layer Resistivity[Ohm-m] : 339.049
- Lower Layer Resistivity[Ohm-m] : 143.448
- Reflection Coefficient : -0.405394
- Depth of Upper Layer[m] : 2.97843

Gradient Method:[5]

- Upper Layer Resistivity[Ohm-m] : 368.295
- Lower Layer Resistivity[Ohm-m] : 144.470
- Reflection Coefficient : -0.43651
- Depth of Upper Layer[m] : 2.760

Case # 2

Proposed Method:

- Upper Layer Resistivity[Ohm-m] : 29.4652
- Lower Layer Resistivity[Ohm-m] : 5.85000
- Reflection Coefficient : -0.668698
- Depth of Upper Layer[m] : 9.98481

Gradient Method:[6]

- Upper Layer Resistivity[Ohm-m] : 29.8000
- Lower Layer Resistivity[Ohm-m] : 5.63500
- Reflection Coefficient : -0.68195
- Depth of Upper Layer[m] : 10.2380

표 2. 측정값과 계산 결과의 비교(Case #1)

회수	전극간격	ρ_m 측정	ρ_s 계산	상대오차[%]
1	2.500	320.200	305.373	4.571
2	5.000	245.000	234.432	-4.313
3	7.500	182.000	191.580	-4.714
4	10.000	162.000	169.218	-4.456
5	12.500	168.000	158.835	5.455
6	15.000	152.000	153.456	-0.958

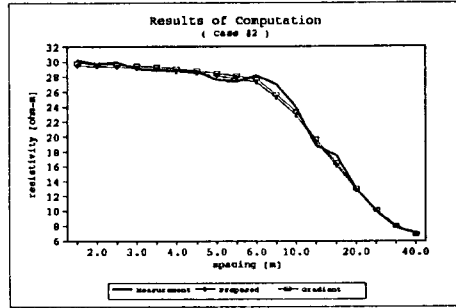


그림 2. Case #2에 대한 계산 결과의 비교

표 3. 측정값과 계산 결과의 비교(Case #2)

회수	전극간격	ρ_m 측정	ρ_s 계산	상대오차[%]
1	1.500	30.200	29.420	2.584
2	2.000	29.700	29.359	1.148
3	2.500	30.000	29.262	2.459
4	3.000	29.000	29.124	-0.426
5	3.500	28.900	28.939	-0.133
6	4.000	28.800	28.705	0.330
7	4.500	28.800	28.422	0.131
8	5.000	27.600	28.091	-1.777
9	5.500	27.400	27.712	-1.140
10	6.000	28.200	27.291	3.224
11	8.000	27.000	25.255	6.461
12	10.000	24.000	22.890	4.625
13	13.000	18.900	19.300	-2.115
14	16.000	17.500	16.130	7.830
15	20.000	13.000	12.856	1.110
16	25.000	10.000	10.148	-1.478
17	32.000	7.800	8.082	-3.619
18	40.000	7.100	7.001	1.396

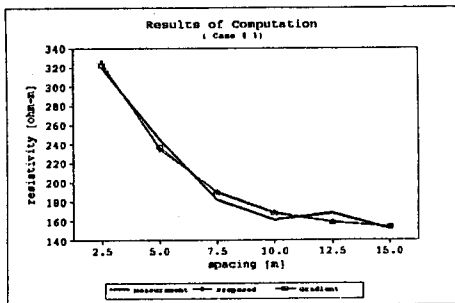


그림 1. Case #1에 대한 계산 결과의 비교

6. 결 론

본 연구에서는 접지설계에서 필요로 하는 대지파라미터를 구하는 문제에 대하여 다루었으며, 제안된 알고리즘을 Wenner법으로 측정된 값에 대하여 적용하였다. 그 결과로부터 얻어진 내용은 다음과 같이 요약할 수 있다.

전력계통에서 접지설계에서 필요로 하는 대지파라미터를 측정된 값으로부터 구하기 위하여 대지를 등가의 2층구조로 모델링하였으며, 컴퓨터에 의한 시뮬레이션의 새로운 알고리즘을 제안하였다. 측정값에 적용하여 시뮬레이션을 통한 대지파라미터의 계산 결과는 측정값과 비교하여 상당히 근접된 결과를 보여주고 있어서 본 내용의 유용성이 입증되고 있다. 현재는 계절변동에 따른 온도 등의 측정값에 대한 본 알고리즘의 적용이 제시되고 있지는 않지만 앞으로 우리나라의 대지에 대한 파라미터의 측정값에 대하여 사례연구를 통한 효율성 평가의 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

1. IEEE Std. 80, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 1986
2. IEEE Std. 81, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Grounding, 1983
3. Dawalibi F., Blatner C. J., "Earth Resistivity Measurement Interpretation Techniques", IEEE Trans. on PAS-103, Feb., pp. 374-382, 1984.
4. Blatner C. J., "Analysis of Resistivity Test Methods in Two-Layer earth". IEEE Trans. on PAS-104, No.12, pp. 3603-3608, 1985.
5. Alamo J. L. del, "A Second Order Gradient Techique for an Improved Estimation of Soil Parameters in a two-layer Earth", IEEE Trans. on PWRD-6, No. 3, pp. 1166-1170, 1991.
6. Alamo J.L.del, "A Comparison Eight Different Techniques to Achieve an Optimum Estimation of Electrical Grounding Parameters in Two-Layer Earth", IEEE Trans. on PWRD-8, No. 4, pp. 1890-1899, 1993.

x : 미지수벡터(대지저항파라미터)

$$x = [\rho_1 \ K \ z]^T$$

ε_j : 오차

n : 측정값의 수

$$E[\varepsilon] = 0$$

$$E[\varepsilon^T \varepsilon] = R$$

여기서,

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}$$

$$E_m = (\rho_{m1}, \rho_{m2}, \dots, \rho_{mn})^T$$

$$E_a = (\rho_{a1}, \rho_{a2}, \dots, \rho_{an})^T$$

다음은 대지파라미터 x 로부터 구해지는 길보기 대지저항률과 대지저항률 측정값과의 상대오차를 식 (7)과 같이 정의하면 상대오차의 집합은 식 (8)로 표현된다.

$$e_j = \frac{\rho_{mj} - \rho_{aj}}{\rho_{mj}} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$E(x) = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n]^T \quad (8)$$

3. 제안된 해법

일반적으로 많이 사용되는 Wenner법을 이용한 대지저항률 측정값으로부터 최적의 대지파라미터를 추정하기 위하여 최적화 문제의 목적함수를 다음과 같이 정의한다.

$$\min J(x) = \frac{1}{2} E(x)^T R^{-1} E(x) \quad (9)$$

그러면, 쿤-터커(Kuhn-Tucker)의 최적조건으로부터

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(x)}{\partial x} &= \left[\frac{\partial E(x)}{\partial x} \right]^T R^{-1} E \\ &= H^T(x) R^{-1} E \\ &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

이 얻어지며, 반복계산에 의하여 미지수벡터를 수정한다면, k 번째 반복과정에서의 미지수벡터 수정값은 다음과 같이 표현된다.

$$x^{(k+1)} = x^k + \Delta x \quad (11)$$

이 미지수벡터 수정값을 최소화 조건식에 대입하면,

$$\begin{aligned} H^T(x^{(k+1)}) R^{-1} E(x^{(k+1)}) &= H^T(x^k + \Delta x) R^{-1} E(x^k + \Delta x) \\ &= [H^T(x^k) + \Delta H^T(x^k)] R^{-1} \cdot \\ &\quad [E(x^k) - H(x^k) \Delta x] + H.O.T \\ &\approx H^T(x^k) R^{-1} E(x^k) \\ &\quad - H^T(x^k) R^{-1} H(x^k) \Delta x \\ &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

이 되고, 식 (12)를 미지수벡터 수정값에 대하여 정리하면,

$$\Delta x = [H^T(x^k) R^{-1} H(x^k)]^{-1} H^T(x^k) R^{-1} E(x^k) \quad (13)$$

이 된다. 이 식을 실제의 관계식으로 정리하면

$$\begin{bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta K \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E}{\partial \rho_1} \\ \frac{\partial E}{\partial K} \\ \frac{\partial E}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial E}{\partial \rho_1} \\ \frac{\partial E}{\partial K} \\ \frac{\partial E}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial E}{\partial \rho_1} \\ \frac{\partial E}{\partial K} \\ \frac{\partial E}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}^{-1} E \quad (5)$$

이 되며, 식 (14)에서 각 성분을 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \rho_1} &= 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[(1 - \frac{n(1-K^2)}{2K})(A_i^{-1/2} - B_i^{-1/2}) \right] \\ \frac{\partial E}{\partial K} &= 4\rho_1 \sum_{n=1}^{\infty} nK^{n-1} (A_i^{-1/2} - B_i^{-1/2}) \\ \frac{\partial E}{\partial z} &= \frac{-16\rho_1 z}{r^2} \sum_{n=1}^{\infty} K^n [A_i^{-3/2} - B_i^{-3/2}] n^2 \end{aligned} \quad (15)$$

4. 본 알고리즘의 계산 과정

본 연구에서 제안된 알고리즘의 주요 과정은 다음과 같다.

1. 초기값 ρ_1^0, K^0, z^0 을 추정한다.
2. 식 (14)을 풀어서 $\Delta \rho_1, \Delta K, \Delta z$ 를 결정한다.
3. 다음 식으로부터 미지수 벡터를 수정한다.

$$\begin{aligned} \rho_1^{(k+1)} &= \rho_1^{(k)} + \Delta \rho_1 \\ K^{(k+1)} &= K^{(k)} + \Delta K \\ z^{(k+1)} &= z^{(k)} + \Delta z \end{aligned} \quad (16)$$

4. $|J(x)|$ 를 계산하여 계산의 허용오차 ε 와 비교한다.
 - a. $|J(x)| < \varepsilon$ 이면 계산을 종료하고,
 - b. $|J(x)| > \varepsilon$ 이면 과정 2 로 가서 반복계산한다.

5. 사례 연구

본 연구에서 제안된 알고리즘을 두 경우의 실측값에 대한 사례연구를 수행하였으며, 그 결과를 다른 해법에 의한 결과와 비교검토하였다. 표 1에는 각 경우에 대한 계산의 최종 결과 값을 비교[5-6]하였으며, 표 2와 3에서는 측정시의 권극간격에 대한 측정값과 계산 결과를 비교하였는데, 두 경우 모두 이미 발표된 다른 해법의 결과와 비슷한 결과를 보여주고 있어서 본 알고리즘의 유용성이 입증되었다고 할 수 있다. 그림 1과 2에서는 각 경우에 대한 계산결과와의 비교를 보여주고 있다.