

전위강하법에 의한 접지임피던스 측정 시 오차요인 분석

(Analysis of error factors of the Fall-of-potential test method in measurements of grounding impedance)

전병욱* · 이수봉 · 정동철 · 이복희 · 안창환¹

(Byung-Wook Jeon · Su-Bong Lee · Dong-Cheol Jung · Bok-Hee Lee · Chang-Hwan Ahn)
 인하대학교 IT 공과대학 전기공학부, 인하공업전문대학¹

Abstract

This paper presents the error factors of Fall-of-potential test method used in measurements of the grounding-system impedance. This test methods inherently can introduce two possible errors in the measurements of grounding-system impedance: (1) ground mutual resistance due to current flow through ground from the ground electrode to the current probe, (2) ac mutual coupling between the current test lead and the potential test lead. The errors of ground mutual resistances and ac mutual coupling are expressed by the equation in calculating grounding impedance. These equations were calculated by Matlab that is commercial tool using mathematical calculation. The results of calculation were applied to correct grounding impedance.

Keywords: *Fall-of-potential method , Mutal resistance, AC coupling and Matlab*

1. 서 론

접지임피던스를 측정하는 경우 전위강하법을 사용하고 있다. 전위강하법으로 접지임피던스를 측정할 때, 측정값의 오차를 줄이기 위해 접지시스템으로부터 전위보조극과 전류보조극을 90 [°]로 배치하여 측정한다. 하지만 장애물 때문에 충분한 공간이 확보되지 못함으로 임의의 위치에 전위보조극과 전류보조극을 배치해야 하는 경우가 발생한다. 이때 전위보조극과 전류보조극의 각도와 전극간의 거리에 따라 전극 상호간의 전위간섭 및 유도결합에 의한 오차가 발생한다. 이 두 가지 요인이 측정 시 주로 발생하는 오차이며 이 오차의 요인을 대지저항률과 인가되는 전류의 주파수, 전극간의 거리로 분석하여 수식적으로 정리한 방정식이 IEEE std.에 제시되어 있다.[1]~[4]

본 연구는 도전유도에 의한 오차를 구하는 수식과 전자유도에 의한 오차를 구하는 수식을 Matlab을 이용하여 각 경우의 조건에 대한 오차값을 계산할 수 있도록 코딩하였다. 이 값을 이용하여 실제 대지에서 접지임피던스를 측정할 때 측정된 값으로부터 정확한 접지임피던스 값으로 보정하기 위한 오차표를 작성하였다.

2. 관련 이론

2.1. 측정계의 도전유도 현상

접지임피던스를 측정 시, 측정대상 접지전극(E극)에서 전류보조전극(C극)으로 전류를 인가할 때 E극과 C극 주변의 대지표면에 전위분포가 나타난다. 위의 전위분포로 E극과 C극, E극과 전위보조전극(P극) 그리고 C극과 P극 상호간의 전위간섭으로 인하여 오차가 발생할 수 있다. 이 오차를 도전유도에 의한 오차라 한다. 이 도전유도 오차는 대지저항률과 전극간의 거리를 이용하여 수식적으로 정의할 수 있다.[1]

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{C^2 - P^2 - 2CP \cos \Phi}} - \frac{1}{C} - \frac{1}{P} \right] \quad (1)$$

표 1. 식(1)의 파라미터

Table 1. Parameters of the equation(1)

기호	명칭 및 수식	단위
C	전류 인가선의 길이	m
P	전위 보조선의 길이	m
Φ	C와 P 사이의 각	(0° < θ < 180°)
ρ	대지저항률	$\Omega \cdot m$

2.2. 측정계의 전자유도 현상

전위강하법을 이용하여 접지임피던스를 측정할 때 측정용 전류로 인해 자계가 형성된다. 일반적으로 자계가 도체 루프를 통과할 때 도체에 유기되는 기전력은 Faraday의 법칙에 의해

$$v = - \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

와 같이 된다. 이 때 도체루프를 통과하는 전체 자속 ϕ 는 도체가 둘러싼 경계면을 통해 자속밀도의 B 의 법선성분을 적분한 값과 같다.

$$\begin{aligned} v &= - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \int_s B \cdot dS \\ &= - \int_s \frac{dB}{dt} \cdot dS = \oint E \cdot dl \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 도체루프가 고정되어 있는 경우 시간에 따라 자속밀도 B 에서 $B = B_0 \cos \omega t$ 라 하면 식(3)은 다음과 같이 정의된다.

$$v = - \int_s \frac{dB}{dt} \cdot dS = S \omega B_0 \sin \omega t \quad (4)$$

유도되는 기전력은 루프의 면적과 주파수, 그리고 자속밀도의 요소로 결정된다. 따라서 자기결합에 의한 상호유도작용이 접지임피던스에 미치는 영향은 측정전류의 주파수가 증가할수록 커지게 되므로 높은 주파수에서 접지임피던스를 측정하는 경우에는 위의 오차 요소를 고려하여야 한다.

또한 대지에 설비된 접지전극과 전위강하법을 적용하기 위해 시설한 보조전극들을 연결하는 측정용 리드선에서 자기결합에 의한 유도작용이 나타난다. 이에 인가되는 전류의 주파수, 전극간의 각도와 거리 그리고 대지저항률을 요소로 하여 오차값을 이론적으로 구할 수 있다. 전자유도작용의 영향을 위와 같은 원리를 바탕으로 수식으로 정의할 수 있다.[1]

$$\begin{aligned} Z_M &= R_M + jX_M \\ &= \frac{\omega}{10^7} \cos \Phi \left[\frac{2}{3} \frac{CP}{d} + j(C \ln k_1 + P \ln k_2 - \frac{2}{3} \frac{CP}{d}) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} K_1 &= \sqrt{C^2 + P^2 - 2CP \cos \Phi} \\ K_2 &= (P - C \cos \Phi + K_1) / [C(1 - \cos \Phi)] \\ K_3 &= (C - P \cos \Phi + K_1) / [P(1 - \cos \Phi)] \\ d &= \sqrt{\frac{10}{2\pi}} \times 10^3 \times \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 503.292 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \end{aligned}$$

전자유도에 의한 오차는 C극과 P극이 평행하게 설치된 경우에 가장 크다. 그리고 C극과 P극이 90 [°]로 배치된 경우에는 오차가 발생하지 않는다. 임의로 C극과 P극을 배치하고 위의 식(5)에 의해 전자유도에 의한 오차 값을 구할 수 있다.[5]

도전유도와 전자유도에 의한 오차의 요인을 각 조건으로 계산하여 구한 값을 실제 측정된 데이터의 보정데이터로 적용할 수 있다. 실제 접지시스템에서 측정된 접지임피던스 값을 Z_s 라 하면

$$Z_g = Z_s - R_e - Z_M \quad (7)$$

Z_g = 접지시스템의 실제 접지임피던스 값 [Ω]

Z_s = 접지시스템에서 측정된 접지임피던스 값 [Ω]

R_e = 도전유도에 의한 오차값 [Ω]

Z_M = 전자유도에 의한 오차값 [Ω]

와 같이 된다. 접지시스템의 실제 측정된 값에서 이 두 요인의 오차를 보정한다면 보다 신뢰할 만한 데이터를 얻을 수 있고, 오차 요인을 분석하여 최적의 접지임피던스를 측정할 수 있는 조건을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Matlab을 이용한 데이터 분석 결과

Matlab은 일반적으로 수학적 수식을 계산 및 그래프 표현할 수 있는 상용 툴이다. 실제 대지를 구성하는 요소를 Matlab으로 코딩하여 오차값을 계산할 수 있다. 측정된 접지임피던스 값에 측정시의 조건을 입력하면 그 조건에 맞는 오차값을 구할 수 있다. 이를 대지와 측정 조건을 일반적으로 산정하여 오차값을 계산하였는데 산정된 조건은 다음과 같다.

- 대지저항률 (10, 1000 [Ω · m])
- C극의 거리 (10, 30, 50 [m])
- P극의 거리 (10 [m]에서 100 [m] 까지 10 [m] 간격)
- C극과 P극이 배치된 각도 (30, 60, 90, 150, 180 [°])
- 인가 전류 주파수 (120, 25000 [Hz])

표 2. 대지저항률 10 [$\Omega \cdot m$], 주파수 120 [Hz] 에서의 오차표

Table 2. Error table at soil resistivity of 10 [$\Omega \cdot m$] and the frequency of 120 [Hz]

C극 10m										
120Hz	10m	20m	30m	40m	50m	60m	70m	80m	90m	100m
0°	8.8078	-0.0725	-0.1255	-0.1388	-0.1441	-0.1468	-0.1483	-0.1492	-0.1498	-0.1503
30°	-0.0088	-0.1083	-0.1376	-0.1468	-0.1508	-0.1528	-0.154	-0.1548	-0.1553	-0.1557
60°	-0.1584	-0.146	-0.1513	-0.154	-0.1555	-0.1563	-0.1568	-0.1572	-0.1574	-0.1576
90°	-0.2058	-0.1676	-0.1619	-0.1603	-0.1596	-0.1595	-0.1594	-0.1593	-0.1593	-0.1592
150°	-0.235	-0.1831	-0.1705	-0.1655	-0.1631	-0.1617	-0.1608	-0.1602	-0.1598	-0.1595
180°	-0.2377	-0.1847	-0.1714	-0.1661	-0.1635	-0.1619	-0.161	-0.1604	-0.1599	-0.1596
C극 30m										
120Hz	10m	20m	30m	40m	50m	60m	70m	80m	90m	100m
0°	-0.1241	0.0419	2.9548	0.0872	0.0158	-0.0053	-0.0148	-0.0199	-0.023	-0.025
30°	-0.1367	-0.0294	0.0023	-0.0094	-0.0228	-0.0309	-0.0357	-0.0387	-0.0406	-0.042
60°	-0.1509	-0.0706	-0.0508	-0.0464	-0.0461	-0.0466	-0.0473	-0.0479	-0.0484	-0.0488
90°	-0.1619	-0.0885	0.0686	0.061	0.0576	0.0559	0.0549	0.0543	0.054	0.0537
150°	0.17	-0.0976	-0.0761	-0.0668	-0.0618	-0.0588	-0.0569	-0.0556	-0.0546	-0.0539
180°	-0.1708	-0.0985	-0.0768	-0.0673	-0.0622	-0.0591	-0.0571	-0.0557	-0.0547	-0.0539
C극 50m										
120Hz	10m	20m	30m	40m	50m	60m	70m	80m	90m	100m
0°	-0.1423	-0.0419	0.0181	0.1169	1.7951	0.1351	0.0599	0.0363	0.0253	0.0191
30°	-0.1495	-0.0593	-0.0215	1E-04	0.0074	0.0042	-0.0015	-0.0063	-0.0099	-0.0125
60°	-0.1549	-0.0726	-0.0455	-0.0335	-0.0281	-0.0261	-0.0254	-0.0254	-0.0254	-0.0257
90°	-0.1598	-0.0819	-0.0576	-0.0468	-0.0412	-0.038	-0.0361	-0.0349	-0.0341	-0.0335
150°	-0.1623	-0.0855	-0.0612	-0.0497	-0.0432	-0.0394	-0.0369	-0.0351	-0.0338	-0.0328
180°	-0.1626	-0.0859	-0.0615	-0.0499	-0.0433	-0.0395	-0.0369	-0.0351	-0.0337	-0.0327

저항률 100m

최근 접지시스템을 평가 할 때, 임펄스를 인가하거나 가변주파수 전압 발생기를 이용하여 접지시스템의 높은 주파수에 대한 응답특성을 평가한다. 따라서 주요 임펄스의 주파수 스펙트럼을 참고하여 주파수의 범위를 산정하였다. 위의 조건으로 계산된 오차값을 표로 작성하였는데 이 논문에는 대지저항률 10 [$\Omega \cdot m$], 인가 전류 주파수 120 [Hz] 에서 나타나는 대표적인 오차표를 표 2에 나타내었다.

3.2 대지저항률에 따른 오차

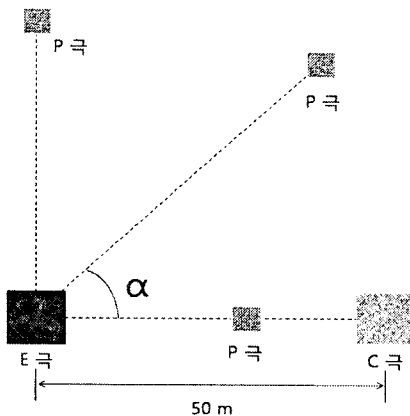
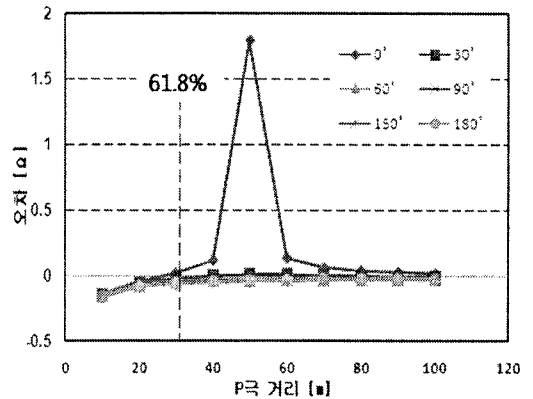
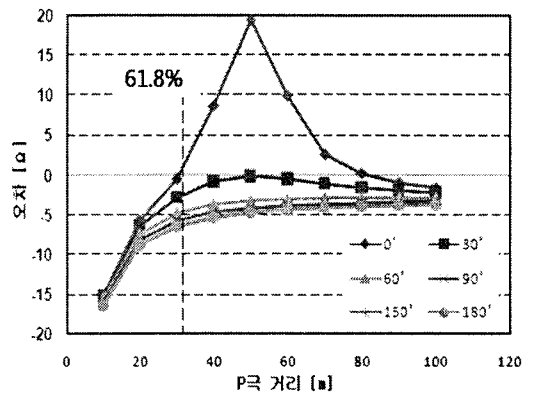


그림 1. 측정 전극 배치
Fig. 1 Arrangement of measured electrode

배치도를 그림 1에 나타내었다.



(a) 10 [$\Omega \cdot m$]



(b) 1000 [$\Omega \cdot m$]

인가전류 120 [Hz], E극과 C극 사이의 거리 50 [m], E극과 P극 사이의 각도에 따른 측정 전극의

그림 2. 대지저항률에 따른 오차
Fig. 2 Errors caused by the soil resistivity

그림 2는 대지저항률에 따른 오차의 차이를 나타내었다. 대지저항률이 10 [$\Omega \cdot m$]의 경우 오차값은 1000 [$\Omega \cdot m$]의 대지저항률을 갖는 대지보다 전반적으로 낮은 값을 갖는다. 대지저항률이 높은 대지에 전극간의 거리가 가까울수록 오차값은 증가하고 C극과 P극의 각도가 0 [$^\circ$]일 때 C극과 P극이 같은 거리 즉, 50 [m] 지점에서 가장 큰 오차의 값을 갖는다.

120 [Hz]의 주파수에서 오차값은 주로 도전유도에 의해 주로 영향을 받으며 C극과 P극이 0 [$^\circ$]일 때, 61.8 [%] 지점에 P극이 배치되면 도전유도에 의한 오차는 0이 된다. 이 때 전자유도에 의한 오차는 0.018로 미세한 값을 가지며 이는 주파수가 낮아서 전자유도에 의한 영향이 거의 나타나지 않기 때문이다.

3.2 인가전류의 주파수에 따른 오차

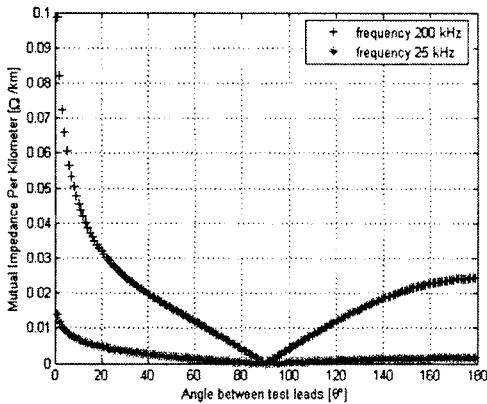


그림 3. 인가전류의 주파수에 따른 오차
Fig. 3 Errors caused by the frequency of injection current

그림 2는 대지저항률 10 [$\Omega \cdot m$], E극과 C극, E극과 P극 거리 10 [m]에서 측정 전류의 주파수별 오차값을 그래프로 나타내었다. 25 [kHz]의 오차보다 높은 주파수인 200 [kHz]에서 높은 오차가 발생한다. 주파수가 높은 경우 전극간의 각도 배치가 90 [$^\circ$]인 경우는 오차값이 0에 가까우나 각도가 90 [$^\circ$]에서 멀어지면 오차가 커진다. 그리고 P극의 거리가 길어질수록 쇄교되는 자속이 증가하여 오차가 커진다. 따라서 높은 주파수에서 오차는 전자유도 성분에 크게 의존적이다. 접지임피던스를 측정

하기 위해 임펄스나 높은 주파수의 전류를 사용할 시, 전자유도 성분의 영향을 최소화시킬 수 있도록 전극을 배치하여야 한다.

4. 결론

접지임피던스 측정 시, IEEE에서 권고하는 전위강하법을 이용하여 측정할 때에 발생하는 오차 요인을 분석하고 그에 따른 오차값을 계산하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

도전유도에 의한 오차는 주파수 보다 대지저항률에 의한 영향이 크게 나타난다. 인가전류의 주파수가 높을 때는 도전유도보다 전자유도에 의한 오차가 지배적이다. 따라서 접지임피던스를 측정할 시 E극과 C극을 충분히 이격시키고 E극과 C극의 61.8 [%] 지점에 P극을 배치하여 도전유도에 의한 오차를 줄이고 C극과 P극의 배치를 90 [$^\circ$]로 하여 전자유도에 의한 오차를 최소한으로 줄여서 측정하여야 한다.

참고 문헌

- (1) IEEE Std 81.2-1991, "IEEE guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding System", IEEE Inc., pp.1731, Dec. 1991
- (2) IEEE Std 80-2000, " IEEE guide for safety in AC Substation Grounding", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.
- (3) J. Ma, F. P. Dawalibi, W. Ruan, "Ground impedance measurement and interpretation in various soil structures", Trans. IEEE, 2000
- (4) J. Ma, F. P. Dawalibi, "Effects of inductive coupling between leads in ground impedance measurements using the fall-of-potential method", Trans. IEEE, 1999
- (5) Eldon J, Rogers and John F. White, "Mutual coupling between Finite lengths parallel or angled horizontal earth return conductors", Trans. IEEE, on PD, Vol. 4, No.1, pp.103~113. 1989.