

측정선의 상호유도작용이 접지임피던스의 측정에 미치는 영향

이복희, 엄주홍, 조성철
 인하대학교 차세대 고전압전력기술연구센터

Effect of Mutual Coupling Between Test Leads on
 Ground Impedance Measurement

Bok-Hee Lee, Ju-Hong Eom, Sung-Chul Cho
 HEIRC, INHA University.

Abstract - Fall-of-potential method is used usually to measure the ground impedance of large scale grounding system exactly. Because the interlinked magnetic flux between closed loops to inject test current and to measure potential rise is existed in E-P-C straight line arrangement, mutual(or inductive) coupling influences greatly on the measurement correctness. Measurement errors produced from inductive coupling could be reduced by the arrangement methods of auxiliary electrodes. Right angle or P-E-C order arrangement methods were effective to reduce the inductive coupling and the decrease degree of measurement error was analysed as quantitative through an experiment.

1. 서 론

전위강하법을 이용한 대형 접지임피던스 측정에서 유도결합에 의한 오차는 크게 나타난다. 특히 상용주파수에서 접지임피던스가 1 [Ω] 이하인 경우에는 IEEE STANDARD에서 유도결합의 영향을 반드시 고려할 것을 권고하고 있다.[1] 본 연구에서는 지금까지 주로 수식적인 해석으로 유도결합을 분석하던 연구사례를 바탕으로 실험적인 분석결과를 제시하였다. 유도결합은 높은 주파수 영역까지 접지임피던스 측정이 이루어지는 분야에서 매우 중요하게 다루어져야 함을 실험을 통하여 입증하였으며, 측정의 정확도 향상을 위한 보조전극 및 측정선의 배치기법을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 시변자장에 의한 유도작용

시변하는 자장이 도체 루프를 통과할 때 도체에 유기되는 기전력은 Faraday의 법칙에 의해

$$v = - \frac{d\phi}{dt} \tag{1}$$

와 같이 된다. 이때 도체루프를 통과하는 전체 자속 Φ 는 도체가 둘러싼 경계면을 통해 자속밀도 B 의 법선성분을 적분한 값과 같다. 따라서 식 (1)은 다음과 같다.

$$v = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \int_s B \cdot ds \tag{2}$$

$$= - \int_s \frac{dB}{dt} \cdot ds = \int E \cdot dl$$

도체루프가 고정되어 있는 경우 시변하는 자속밀도 B 를 $B = B_0 \cos \omega t$ 라 하면 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$v = - \int_s \frac{dB}{dt} \cdot ds = A \omega B_0 \sin \omega t \tag{3}$$

식 (3)에서 알 수 있듯이 유기되는 기전력은 루프의 면적과 주파수, 그리고 자속밀도의 변화에 비례한다. 따라서 자기결합에 의한 상호유도작용이 접지임피던스 측정에 미치는 영향은 시험전류의 주파수가 증가할수록 커지게 되므로 높은 주파수에서 접지임피던스를 측정하는 경우에는 특히 주의하여야 한다.

대지에 시설된 접지전극과 전위강하법을 적용하기 위해 시설한 보조전극들을 연결하는 측정용 리드선에서 자기결합에 의한 유도작용은 식 (3)과 같이 간단하지는 않다. 대지를 통해 귀환하는 전류의 분포가 리드선을 통하여 흐르는 전류와는 다르며, 쇄교하는 면적을 결정하는 것도 쉽지 않다. 수식에 의한 수리적인 접근은 참고 문헌 [2]를 통하여 알 수 있으며, 이러한 접근은 실제의 측정오차를 예측하는데 효과적이다. 하지만 수식적인 고찰이 정확한 실험결과를 예측하기에는 한계가 있으며, 특히 접지분야에서는 다양한 대지의 구조와 측정에 사용하는 보조전극들, 측정용 리드선의 배치 등으로 인하여 더욱 어려움이 많다. 따라서 본 논문에서는 상호유도작용에 있어서 높은 주파수의 측정전류가 접지임피던스의 측정에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 실험적인 연구를 수행하였으며, 측정용 보조전극과 리드선의 배치에 있어서 자기결합에 의한 상호유도작용을 최소화하기 위해서는 자속이 통과하는 루프면적을 작게 유지하는 것이 효과적이라는 가정 하에 실험적인 연구를 수행하였다.

2.2 전위강하법에서 측정선 사이의 유도결합

유도결합에 의한 측정오차는 대규모 접지시스템의 측정에서 매우 중요하게 다루어져야 하며, 특히 높은 주파수의 시험전류를 인가하는 측정에서는 보조전극과 측정선의 배치에 세심한 주의가 필요하다. 유도결합은 교류의 시험전류를 인가하는 측정선으로부터 전위측정선에 유기기전력을 발생시키게 되고, 측정되는 접지전위상승 파형은 실제의 접지전위에 유기기전력이 벡터적으로 합성된 값으로 나타난다. 유도결합에 의해 실제의 접지임피던스에서 변동되는 임피던스를 상호임피던스(mutual impedance)하는데, 이러한 상호임피던스에 의한 오차는 측정선이 나란하게 포설되는 경우에 최대가 된다. 상호임피던스는 수식에 의해 이론적으로 계산할 수 있지만 [3], 상호임피던스의 크기가 접지임피던스의 크기와 비슷하거나 더 커지게 되면 수식에 의해 상호임피던스값을 보정하더라도 접지임피던스를 결정하는데 큰 오차를 포함하게 된다.

유도결합에 의한 측정오차는 수식적인 보정이나 이론적 분석에 앞서서 측정방법을 적절히 선택하면 줄일 수 있다. 즉, 유도결합은 전류인가 측정선과 전위상승 측정선 사이의 상호유도작용에 기인한 것이므로 상호유도작용이 최소가 되는 측정선 배치방법을 적용하면 된다. 측정선의 배치방법은 문헌[3]에 의거하여 보조전극

의 배치와 이에 따른 측정선의 배치방법이 제안되었으며, 특히 규모가 크고 접지저항이 매우 낮은 접지시스템에서 효과적인 것으로 기술하고 있다. 각각의 문헌들은 주로 공간상에 존재하는 유한도체에 대하여 수학적인 모델을 선정하고 유도결합의 영향을 분석하였다. 각각의 결과들은 유도결합의 영향을 예측하고 이를 이론적으로 저감시키기에 적절한 보조전극 시설위치를 제시하고 있다. 이에 반하여 참고문헌[4]는 실제의 접지임피던스 측정에서 발생하는 유도결합의 영향을 측정선 배치에 따라서 비교하여 제시하고 있다.

수식에 의해 분석한 이상적인 결과에서 보조전극 C와 P극이 그림 1에서 보는 바와 같이 90°의 각도로 배치되고 측정선이 보조전극에 직선으로 접속되면 유도결합은 없다. 하지만 현장에서 접지임피던스 측정을 할 때 보조전극들을 정확히 90°로 배치하기 힘든 경우도 있으며, 측정선을 포설하는 과정에서 곡선부분이 존재하기도 한다. 측정용 보조전극이 90°보다 작은 각도로 배치된 경우에 측정전류 인가선과 전위측정선 사이의 유도결합에 의하여 측정되는 전위를 증가시키는 효과를 나타내게 되며, 접지임피던스는 실제의 값보다 큰 값으로 측정된다. 반대로 90°보다 크게 배치되는 경우에는 상호유도작용이 반대극성으로 작용하므로 접지임피던스의 값이 실제의 값보다 작게 측정된다. 유도작용이 접지임피던스 측정에 미치는 영향은 나란한 방향으로 측정선이 포설될 때 가장 크므로 보조전극과 측정선을 배치함에 있어서 0°~90°와 270°~360°일 때보다는 90°~270°의 범위가 측정정확도 향상에 효과적이다.

따라서 본 연구에서는 유도결합에 의한 상호임피던스를 최소화시키는 보조전극 및 측정선 배치를 실험을 통하여 분석하였다. 그림 2와 같이 보조전극과 측정선의 배치를 4가지 경우로 나누어서 각각의 접지임피던스 측정결과를 비교하였다.

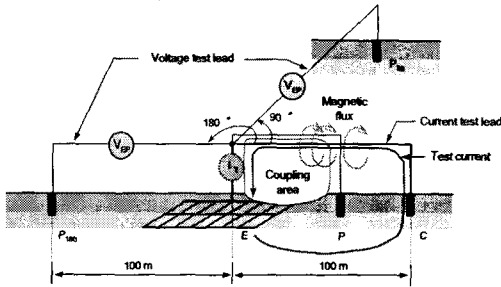


그림 1 측정선의 유도결합
Fig. 1 Inductive coupling of test lead

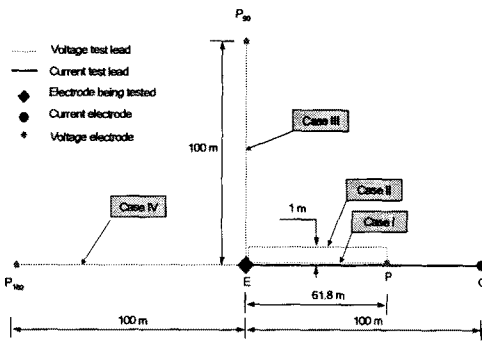
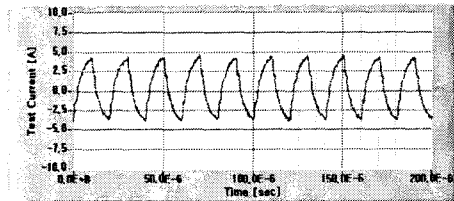
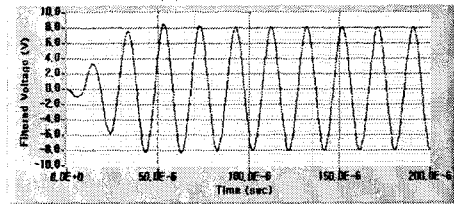


그림 2 유도결합 측정을 위한 전극배치
Fig. 2 Electrode arrangement for inductive coupling analysis

접지임피던스 측정회로에 가변주파수 인버터를 사용하여 그림 3과 같은 측정전류 파형의 주파수는 50 [kHz]이며, 이 때의 접지전위상승 파형을 4가지 조건에 대하여 그림 4~7에 나타내었다. 접지전위상승 파형에서 알 수 있듯이 측정선이 나란히 배치하였을 때 접지전위상승 파형이 제일 크게 측정되었다. 또한 측정선의 배치가 나란하더라도 측정선간 거리가 1 [m] 떨어져 배치되면 그림 5와 같이 전위측정파형이 상당히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그림 6과 7에서는 각각 측정선을 90°와 180°로 배치하였을 때 측정된 접지전위상승 파형으로 나란히 배치한 경우에 비하여 접지전위가 매우 낮다. 다만 참고문헌 [2]에서 수식을 통한 이론적 해석과 일치하는 것은 측정된 파형에서 180°인 경우에 90°로 배치하였을 때보다 구형파의 상승부가 다소 낮아졌음을 알 수 있다. 필터를 통과한 파형으로 비교하였을 때 정현파의 진폭이 180°인 경우가 조금 작게 측정되었음을 알 수 있다. 이와 같이 90°와 180°로 측정선을 배치하고 측정된 결과는 나란한 방향보다 측정된 결과와 비교할 때 근소한 차이를 보이고 있으며, 이론적으로는 90° 각도로 배치하였을 때 유도작용이 없지만 실험에서는 두 가지 방법 모두 유도전위의 저감에 효과적인 것으로 보인다.

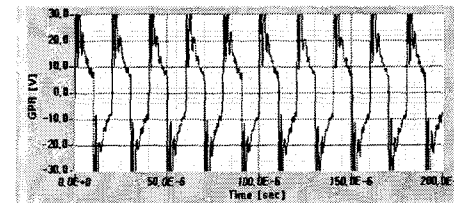


(a) Test current

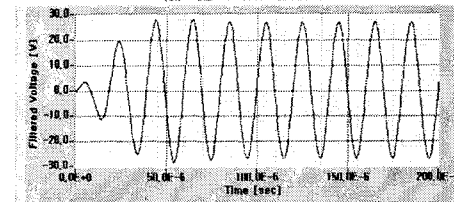


(b) Filtered waveform of test current
(f = 50 kHz)

그림 3 시험전류 파형
Fig. 3 Test current waveform



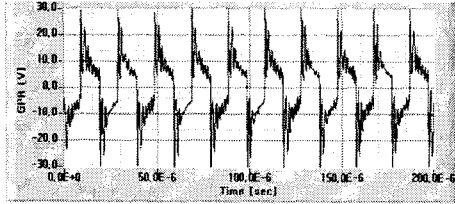
(a) GPR waveform



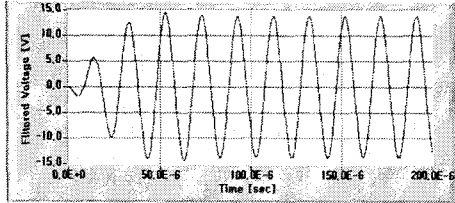
(b) Filtered waveform of GPR

(Case I : Lead separation distance is 0 m.)

그림 4 측정선 평행배치시 접지전위상승 측정파형
Fig. 4 Measurement waveform of GPR when test leads are paralleled



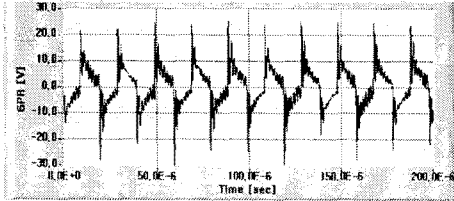
(a) GPR waveform



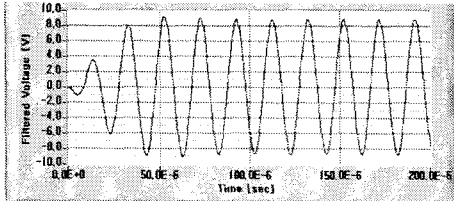
(b) Filtered waveform of GPR

(Case II : Lead separation distance is 1 m.)

그림 5 측정선 평행배치시 접지전위상승 측정파형
Fig. 5 Measurement waveform of GPR when test leads are paralleled



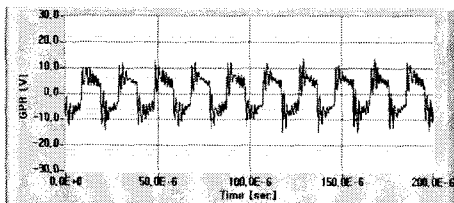
(a) GPR waveform



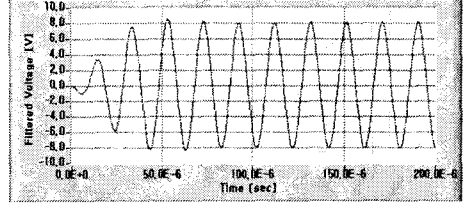
(b) Filtered waveform of GPR

(Case III : The angle between P and C is 90°.)

그림 6 측정선 각도배치시 접지전위상승 측정파형
Fig. 6 Measurement waveform of GPR when test leads are paralleled



(a) GPR waveform



(b) Filtered waveform of GPR

(Case IV : The angle between P and C is 180°)

그림 7 측정선 각도배치시 접지전위상승 측정파형
Fig. 7 Measurement waveform of GPR when test leads are paralleled

2.3 측정선 배치에 따른 접지임피던스

유도결합이 접지임피던스에 미치는 영향은 접지전위상승 과정에서 본 바와 같이 매우 큰 것으로 나타났다. 실제로 접지임피던스 측정결과 그림 8에서 접지임피던스의 크기가 측정선을 나란한 방향으로 시설하였을 때 각도배치한 경우보다 매우 큰 값으로 측정되었음을 알 수 있다. 접지임피던스를 측정할 때 동일한 규모의 접지시스템이라도 측정용 보조전극과 측정선의 배치에 따라 접지임피던스는 크게 달라진다. 게다가 측정주파수가 증가함에 따라 측정된 접지임피던스가 급격히 커지는 양상을 나타내고 있다. 특히 시험전류를 인가하는 측정선과 접지전위측정선이 나란한 방향으로 중첩되어 있을 때 접지임피던스는 실제의 값보다 매우 큰 값으로 측정되므로, 이 측정선 배치법은 대규모 접지시스템의 접지임피던스 측정에 적용할 수 없다. 측정선간 거리를 1 [m] 떨어뜨려 배치하는 방법도 접지임피던스 측정에서 큰 오차를 포함하므로 실제의 측정에는 적용하기 어렵다. 결과적으로 대규모 접지시스템의 접지임피던스 측정에 E-P-C 일직선 전극배치와 61.8%법칙을 적용한 측정 방법은 측정오차가 매우 크게 나타나게 됨을 알 수 있다. 90° 각도로 측정선을 배치한 CaseIII의 측정결과를 바탕으로 각각의 측정선 배치법에 대한 접지임피던스 측정결과를 표 1에 나타내었다.

접지임피던스의 측정결과는 유도결합의 영향이 매우 크게 작용하고 있음을 보여주고 있다. 측정선을 나란하게 배치하였을 때 접지임피던스는 100 [kHz]의 주파수에서 90°의 각도로 배치하였을 때보다 약 3.8배 정도 큰 값으로 측정되었다. 10 [kHz]의 주파수에서도 약 1.8배로 매우 큰 오차를 나타내고 있으며, 이러한 값은 중첩된 측정선의 길이가 약 61 [m]인 점을 감안할 때 매우 큰 값이다. 대규모 접지시스템에서 측정선이 수백 [m]에 이르게 되면 유도결합에 의한 접지임피던스 측정 오차는 매우 커지게 된다. 이에 비하여 측정선을 180°도로 시설한 Case IV의 경우는 90°로 배치한 Case III의 측정결과와 거의 동일하게 나타났다.

표 1 유도결합에 의한 접지임피던스 측정오차

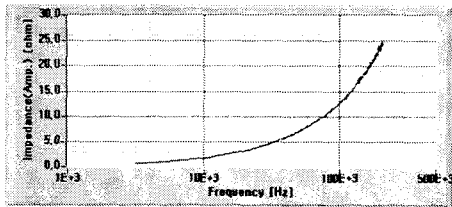
Table 1 Measurement error of ground impedance by inductive coupling

Freq.	10 [kHz]		50 [kHz]		100 [kHz]		200 [kHz]	
	Z[Ω]	Z/Z ₀ ³	Z[Ω]	Z/Z ₀	Z[Ω]	Z/Z ₀	Z[Ω]	Z/Z ₀
Case I ¹	1.8	2.3	7.0	3.0	12.8	3.8	24.0	4.8
Case II ²	1.2	0.7	3.9	1.7	6.5	1.9	11.5	2.3
Case III ³	0.8	1.0	2.3	1.0	3.4	1.0	5.0	1.0
Case IV ⁴	0.8	1.0	2.3	1.0	3.4	1.0	5.0	1.0

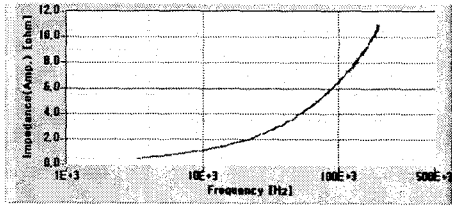
1 Lead separation distance is 0 [m].
2 Lead separation distance is 1 [m].
3 The angle between P and C is 90°.

- 4 The angle between P and C is 180°.
- 5 Measured ground impedance under Case III.

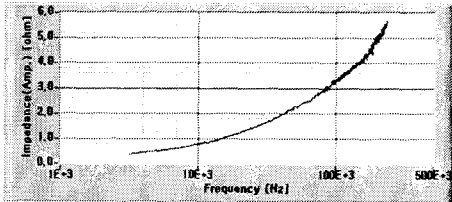
접지임피던스의 크기뿐만 아니라 위상그래프에서도 측정선의 배치에 따른 유도결합의 영향은 매우 뚜렷이 나타났다. 측정결과 저항성분은 측정선의 배치에 거의 영향을 거의 받지 않았으며, 측정선의 중첩에 따른 상호임피던스는 쇄교자속에 의한 전자유도현상으로 접지임피던스의 리액턴스 성분의 증가에 주로 기여하고 있음을 알 수 있었다.



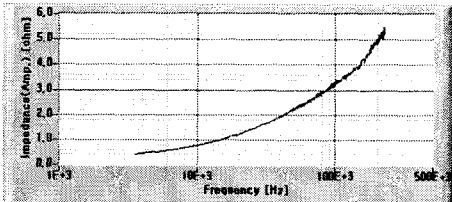
(a) Case I



(b) Case II



(c) Case III



(d) Case IV

그림 8 측정선의 배치에 따른 접지임피던스
Fig.8 Ground impedance according to the test lead arrangement

3. 결 론

전위강하법을 사용하여 대규모 접지시스템의 접지임피던스를 측정할 때 측정선의 유도결합이 측정값의 정확도에 큰 영향을 미친다. 특히 높은 주파수 영역에서 접지임피던스를 측정하는 실험에서는 측정용 보조전극과 측정선의 배치에 따른 유도결합의 영향을 반드시 고려하여야 함을 알 수 있었다. 또한 전위강하법의 적용에 있어서 대규모 접지시스템에서는 피측정 접지전극과 전류 및 전위보조전극을 일직선으로 하여 전위측정선과 전류인가선이 중첩되는 배치는 큰 오차를 포함할 수 있으므로 반드시 90° 또는 90°~270°의 각도로 배치하는 방법

을 적용하여 측정하는 것이 정확도가 높다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE Std 81-1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, IEEE Inc, p7, 1983.
- [2] H. G. Sarmiento, D. Mukhedkar, V. Ramachandran, "An Extention to the Study of Earth-Return Mutual Coupling Effects in Ground Impedance Field Measurements", IEEE Trans. on PD, Vol.3, No. 1, 1988.
- [3] IEEE Std 81-2-1991, IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, IEEE Inc., pp.81~95, pp. 17~21, 1992.
- [4] J. Ma, F. P. Dawalibi, "Influence of Inductive Coupling Between Leads on Ground Impedance Measurements Using the Fall-of-Potential Method", IEEE Trans. on PD, Vol.16, No.4, 2001.
- [5] 이복희, 임주홍, 김태두, 조성철, 김형준, "가변주파수 인버터를 이용한 접지임피던스의 새로운 측정기법", 고전압 및 방전응용기술연구회 춘계학술대회논문집, pp.92~95, 2003.