

## 전류 및 전위 측정선의 평행배치에서 접지임피던스 상호유도 분석

조성철·임주홍·이태형  
기초전력연구원

### Inductive Coupling Analysis of Ground Impedance on Parallel Orientation of Current and Potential Conductors

Sung-Chul Cho·Ju-Hong Eom·Tae-Hyung Lee  
KESRI

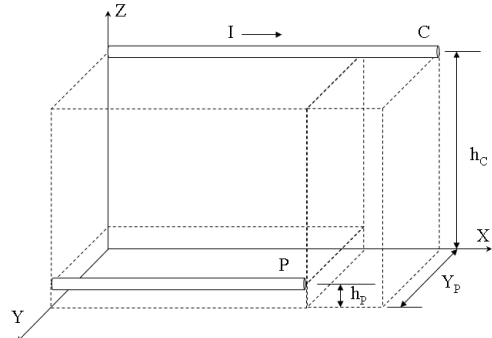
**Abstract** - The mutual coupling between the current and potential measuring wires makes serious effect on the measurement of the ground impedance. For analyzing the effect of mutual coupling, we compared the ground impedance measured on site with the ground impedance calculated with MATLAB. When the parallel length is 10 [m], the measured ground impedance is similar with the calculated ground impedance. As the parallel length is extended over 10 [m], the error between measured ground impedance and calculated ground impedance is also increased on a large scale. We analyzed the mutual coupling by the frequency and present the inaccuracy of ground impedance quantitatively.

에서 보는 바와 같이 90°의 각도로 배치되고 측정선이 보조전극에 직선으로 접촉되면 유도결합은 없다. 하지만, 현장에서 접지임피던스 측정을 할 때 보조전극들을 정확히 90°로 배치하기 힘든 경우도 있으며, 측정선을 포설하는 과정에서 곡선부분이 존재하기도 한다.[2][3]

본 연구에서는 전류 및 전위도체의 이격거리 없이 배치되거나 일정한 간격으로 이격되어있는 평행상태에서의 접지임피던스를 측정하였다.

#### 2.2 평행배치에서의 이론적 유도결합

측정선으로 사용되는 전류도체와 전위도체가 평행한 상태를 그림 2에 나타내었다.[4]



〈그림 2〉 전류 및 전위도체의 평행배치

여기에서 전류 인가선의 높이가 hc이고 전위 보조선의 높이가 hp이다. 두 도체가 대지에 나란한 방향으로 놓여있다고 가정하면 각각의 파라미터들은 다음과 같다.

- C = 전류 인가선의 길이, [m]
- hc = 전류 인가선의 높이, [m]
- P = 전위 보조선의 길이, [m]
- hp = 전위 보조선의 높이, [m]
- ρ = 대지저항률, [Ω · m]
- Yp = 수평의 선간 이격거리, [m]
- θ = C와 P 사이의 각 (0° < θ < 180°)
- ω = 2πf
- f = 주파수, [Hz]

$$d = \sqrt{\frac{10}{2\pi}} \times 10^3 \times \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 503.292 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \text{ 대지의 침투깊이, [m]}$$

이 파라미터들을 사용하여 계산한 상호 임피던스에 대한 일반적인 공식은 식(1)과 같다. 상호 임피던스에 대한 공식은 단일지층 구조의 대지, 실험 도체의 길이에 비해 매우 낮은 도체 높이, 도체길이와 비교해서 매우 긴 과정, 그리고 대지에 대한 용량성 전류가 무시될 수 있는 측정전류 주파수를 기본적인 조건으로 하고 있다.

$$Z_M = R_M + jX_M = j \frac{\omega}{10^7} \left[ C \ln \left( \frac{C-P+A}{C-P+B} \cdot \frac{C+D}{C+E} \right) + P \ln \left( \frac{P-C+A}{P-C+B} \cdot \frac{P+G}{P+H} \right) - A + B - D + E - G + H + J - K \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 전위 보조극의 길이 P가 전류 인가선과 반대 방향일 때 -P가 식 (1)에서 사용된다. 또한 측정 도체가 대지면상에 놓여있을 때

### 1. 서 론

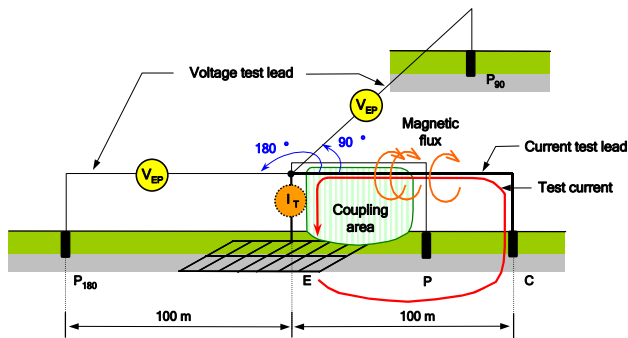
전위강하법을 이용한 대형 접지임피던스 측정에서 유도결합의 영향에 의한 오차는 크게 나타난다. 유도결합에 의한 측정오차는 대규모 접지시스템의 측정에서 매우 중요하게 다루어져야 하며, 특히 높은 주파수의 측정전류를 인가하는 측정에서는 보조전극과 측정선의 배치에 세심한 주의가 필요하다. 유도결합은 교류의 측정전류가 인가되는 측정선으로부터 전위측정선에 유기기전력을 발생시키게 되고, 측정되는 접지전위상승 파형은 실제의 접지전위에 유기기전력이 백터적으로 합성된 값으로 나타난다. 유도결합에 의해 실제의 접지임피던스에서 변동되는 임피던스를 상호임피던스라 하는데, 이러한 상호임피던스에 의한 오차는 측정선이 나란하게 포설되는 경우에 최대가 된다. 상호임피던스는 이론적인 수식으로 계산될 수 있지만, 상호임피던스의 크기가 접지임피던스의 크기와 비슷하거나 더 커지게 되면 수식에 의해 상호임피던스를 보정하더라도 접지임피던스를 결정하는데 큰 오차를 포함하게 된다. 특히 상용주파수에서 접지임피던스가 1 [Ω] 이하인 경우에는 IEEE Std.에서 유도결합의 영향을 반드시 고려할 것을 권고하고 있다.[1]

본 연구에서는 측정선의 상호결합에 의한 접지임피던스를 실측하여 얻은 값과 이론적 수식을 MATLAB을 통하여 얻은 값을 서로 비교하여 전류 및 전위 측정선의 평행배치시의 상호유도를 비교하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 접지임피던스 측정선의 유도결합

접지임피던스를 측정하기 위해서는 인가전류가 흐르는 전류 도체가 있어야 하며, 이 때 상승되는 전위를 측정하기 위한 전위도체가 있어야 한다. 그림 1은 접지임피던스를 측정하기 위한 실험계에서 전위도체와 전류도체간의 가능한 배치를 보여준다.



〈그림 1〉 측정선의 유도결합

수식에 의해 분석한 이상적인 결과에서 보조전극 C와 P극이 그림 1

$h_p=h_C=0$ 이 되며, 식 (1)의 A, B, D, E, G, H, J 그리고 K는 다음과 같이 간략화 된다.

$$A = \sqrt{(C-P)^2 + Y_p^2 - j2d^2} \quad B = \sqrt{(C-P)^2 + Y_p^2}$$

$$D = \sqrt{C^2 + Y_p^2} \quad E = \sqrt{C^2 + Y_p^2 - j2d^2}$$

$$G = \sqrt{P^2 + Y_p^2} \quad H = \sqrt{P^2 + Y_p^2 - j2d^2}$$

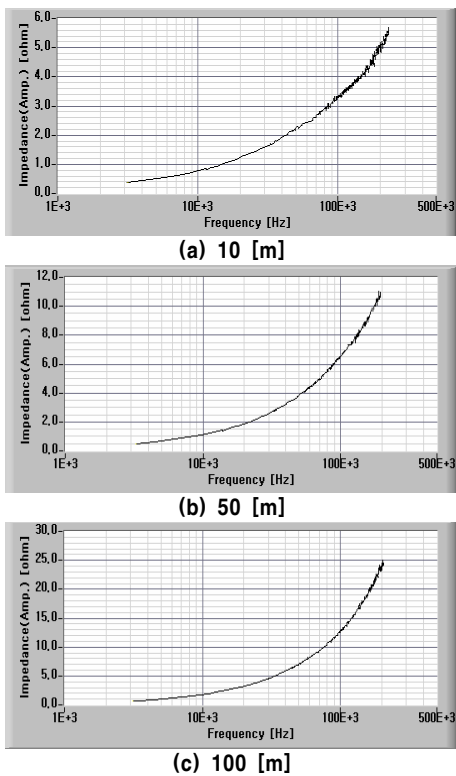
$$J = Y_p \quad K = \sqrt{Y_p^2 - j2d^2}$$

$$d = 503.292 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

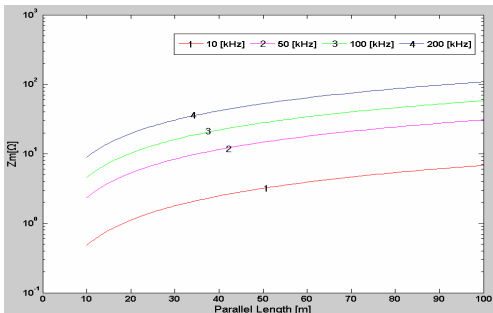
이렇게 간소화된 식을 이용하여 대지저항률, 주파수, 평행길이에 따라 MATLAB을 이용하여 접지임피던스를 계산하였다.

### 2.3 접지임피던스의 실험값과 계산값

그림 1의 실험계로 구성하여 접지임피던스를 실제 측정된 것을 그림 3에 나타내었다. 측정장소의 대지저항률은 약 80 [ $\Omega \cdot m$ ]이며, 두 측정선은 중첩되게 포설하여 이격거리는 0 [m]로 고려할 수 있다.



〈그림 3〉 주파수와 측정선 길이에 따른 접지임피던스[실험값]



〈그림 4〉 주파수와 측정선 길이에 따른 접지임피던스[계산값]

측정선을 10 [m], 50 [m], 100 [m]의 간격으로 평행하게 배치시키고 주파수를 증가시켜가면서 각각의 접지임피던스의 값을 연속적으로 측정하였다. 그림 3에서와 같이 주파수와 측정선의 길이가 증가할수록 접지임피던스의 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 특정 주파수에서의 접지임피던스를 읽어 표 1과 같이 실험값으로 나타내었다.

MATLAB을 이용하여 접지임피던스를 계산한 것을 그림 4에 나타내

었다. 대지저항률은 100 [ $\Omega \cdot m$ ], 두 측정선의 이격거리는 0.2 [m]로 설정하고 측정선의 길이를 10 [m]에서 100 [m]까지의 모든 접지임피던스를 계산하였다. 그림 4에서 보는바와 같이 주파수와 측정선 길이가 증가함에 따라 MATLAB을 이용하여 계산된 접지임피던스 역시 증가하는 것을 알 수 있다. 유도결합에 의한 접지임피던스의 계산값과 실험값을 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉 유도결합에 의한 접지임피던스의 계산값과 실험값 비교

측정선 길이 [m]	10 [kHz]		50 [kHz]		100 [kHz]		200 [kHz]	
	실험값	계산값	실험값	계산값	실험값	계산값	실험값	계산값
10	0.8	0.5	2.3	2.3	3.3	4.6	5.0	8.9
50	1.1	3.2	3.9	14.7	6.5	28.0	11.0	52.8
100	1.8	6.8	7.0	30.7	12.5	57.9	24.0	108

측정선의 길이가 10 [m]일 때 주파수에 따른 접지임피던스의 실험값과 계산값은 비슷한 것을 알 수 있다. 하지만 측정선의 길이가 증가할수록 실험값과 계산값 사이의 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 주파수가 50 [kHz]일 때 측정선의 길이가 10 [m]에서는 실험값과 계산값이 동일하지만 측정선의 길이가 100 [m]에서는 4배 이상의 차이가 나타나고 있다. 측정선 길이가 50 [m]일 때는 약 3배 정도의 차이가 나타나고 있음을 확인 할 수 있다. 이는 실험값은 측정선 자체의 저항 및 인덕턴스에 의한 손실, 측정장소의 일정하지 않은 대지저항률, 측정장치에서의 손실 및 오차 등에 의해 상대적으로 작게 나타나는 것으로 추정할 수 있다.

이상의 결과로부터 접지임피던스 측정시 중첩되는 측정선의 길이와 인가되는 주파수에 따라 접지임피던스가 크게 달라지기 때문에 유도결합의 영향을 최소화하는 방법으로 접지임피던스를 측정하여야 한다. 즉, 상호유도에 의해 나타나는 상호임피던스 성분을 수식을 통해 분석하여 보정하는 방법을 측정장소의 대지나 측정시 조건에 따른 오차가 크게 발생할 수 있으므로 측정용 보조전극과 리드선의 배치에 있어서 자기결합에 의한 상호유도작용을 최소화하기 위해 자속이 통과하는 루프면적을 작게 유지하는 것이 정확한 접지임피던스 측정에 효과적이라고 할 수 있다.

### 3. 결 론

접지임피던스를 측정할 때 오차를 유발하는 요인 중에 대규모 접지 측정시 유도결합이 심각한 영향을 미치게 된다. 전류 도체와 전위도체간의 유도결합을 알아보기 위하여 영향을 가장 크게 받을 수 있는 평행배치를 통해 영향분석을 위한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다. 실제 실험계를 구성하여 접지임피던스를 측정하고, MATLAB을 이용하여 이론적인 수식으로 접지임피던스를 계산하여 서로 비교한 결과, 전류의 주파수와 측정선의 길이가 증가할수록 접지임피던스는 증가하였다. 측정선의 길이가 10 [m]일 때는 실험값과 계산값이 비슷하였지만, 10 [m] 이상일 때는 실험값과 계산값에 큰 차이가 발생하였다. 따라서 접지임피던스를 측정할 때 상호유도 성분에 대한 이론적 계산값을 산출하고 보정하는 방법보다는 측정선간의 유도결합을 최소화하는 전극 또는 측정선 배치를 사용하여 상호유도작용을 최소화 하는 것이 보다 효과적임을 알 수 있다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호 : R-2005-7-143)주관으로 수행된 과제임.

### [참 고 문 헌]

- [1] IEEE Std 81-2-1991, IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, IEEE Inc., pp.17~21, pp.82~95, 1992.
- [2] H. G. Sarmiento, D. Mukhedkar, V. Remachandran, "An Extension to the Study of Earth-Return Mutual Coupling Effects in Ground Impedance Field Measurement", IEEE Trans. on PD, Vol.3, No.1, pp.96~101, 1988.
- [3] J. Ma, F. P. Dawalibi, "Influence of Inductive Coupling Between Leads in Ground Impedance Measurements Using the Fall-of-Potential Method", IEEE Trans. on PD, Vol. 16, No.4, pp.739~743, 2001.
- [4] Eldon J. Rogers, John F. White, "Mutual Coupling between finite lengths parallel or angled horizontal earth return conductors", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.4, No.1, Jan. 1989.