

회로모델을 이용한 봉상전극 접지임피던스의 분석

(Analysis of Ground Impedance of a Ground Rod Using Circuit Models)

이복희 · 이태형* · 임주홍¹

(Bok-Hee Lee · Tae-Hyung Lee · Ju-Hong Eom)

(인하대 차세대고전압전력기술연구센터, ¹기초전력연구원)

Abstract

A systematic approach of measurement, modeling and analysis of grounding system impedance in the field of lightning protection systems is presented. The measurement and analysis of ground impedance are based on a computer aided technique. The magnitude and phase of ground impedance were measured and analyzed by the modified fall-of-potential method and the proposed computer program algorithm using the waveforms of the test current and potential rise. The theoretical analysis of ground impedance were performed with the equivalent circuit models, and the theoretical results were compared with the measured data.

1. 서 론

접지시스템의 성능의 평가에는 접지저항을 측정하는 방법을 많이 사용하고 있다. 그러나 접지저항은 상용주파수 접지전류가 흐를 때 적용되며, 접지임피던스 차원의 고려는 뇌서지전류와 같이 높은 주파수 성분을 가지는 접지전류가 흐를 때 적용된다.[1-2]

접지시스템이 소규모이거나 시설하는 장소의 대지저항률이 큰 경우에 접지임피던스는 저항 성분이 큰 값을 가지므로 접지저항측정기를 사용하여 측정한 접지저항이 접지임피던스와 거의 동일하다. 하지만 접지전류가 뇌서지와 같이 빠른 상승시간을 가지는 높은 주파수 성분을 포함하는 경우에는 접지저항 보다는 접지임피던스를 측정하여 접지시스템의 리액턴스 성분을 분석한 후 성능평가의 지표로 하는 것이 바람직하다.[3-4]

대형 봉상접지전극은 표준규격의 봉상접지전극에 비하여 굵고, 보링머신을 사용하여 깊게 굴토한 후 시설하므로 낮은 접지저항을 얻기 위해서 넓은 면적을 차지하지 않는다. 하지만 길이가 길어짐에 따라 높은 주파수에서는 접지전극의 인덕턴스에 따른 접지임피던스의 특성이 크게 변동하는 경우가 많으므로 접지임피던스의 주파수 의존성에 대한 평가가 필요한 전형적인 접지전극 형태이다. 따라서 본 연구에서는 대형 봉상접지전극의 주파수에 따른 접지임피던스의 측정 및 분석기법을 제안할 목적으로 PC기반의 접지임피던스 측정 장치를 개발하였다. 대형 봉상접지전극의 접지임피던스를 주파수를 파라미터로 측정하고 회로모델을 이용하여 이론적으로 분석한 결과를 보고한다.

2. 실 험

2.1. 측정방법

대형 봉상접지전극에서 전위강하법을 이용한 접지임피던스의 측정회로를 그림 1에 나타내었으며, 측정전류는 설정된 시간동안 주파수제어가 선형적으로 이루어지는 인버터를 사용하여 인가하였다. 측정전류의 주파수를 5~300 [kHz]의 범위에서 가변시키면서 측정대상인 접지전극(E)과 전류보조전극(C) 사이에 인가하여 기준 전위전극인 전위보조전극(P)에 대한 피측정 접지전극의 전위상승을 측정하였다.

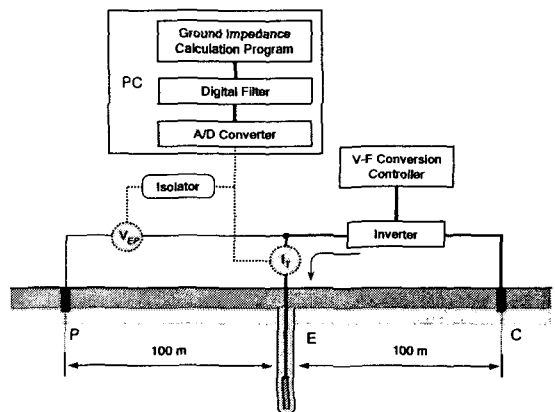


그림 1. 수정된 전위강하법을 이용한 접지임피던스의 측정회로

Fig. 1. Circuit diagram for measuring the ground impedance using the modified fall-of potential method

전위보조전극은 측정대상 접지전극으로부터 100 [m] 지점에 길이 1 [m]의 접지전극을 사용하여 시설하였으며, 전류보조전극은 전위보조전극 반대 방향으로 100 [m] 지점에 시설된 다른 봉상접지전극을 사용하였다. 이 측정방법은 전위보조전극을 전류보조전극과 반대 방향으로 시설함으로써 측정선의 유도결합의 영향을 줄일 수 있는 수정된 전위강화법을 적용하였다.

2.2. 측정대상의 접지전극

측정대상의 접지전극의 형상을 그림 2에 나타내었으며, 직경 5 [cm], 길이 10 [m]의 동관을 접지전극으로 사용하였다.

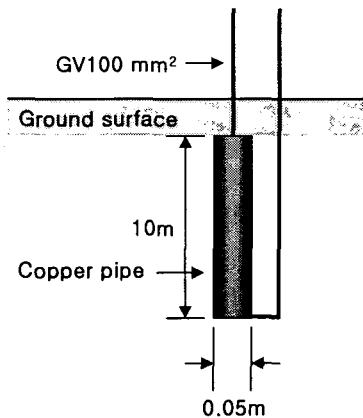


그림 2. 본 연구에 사용된 봉상접지전극의 형상
Fig. 2. Shapes of grounding rods used in this work

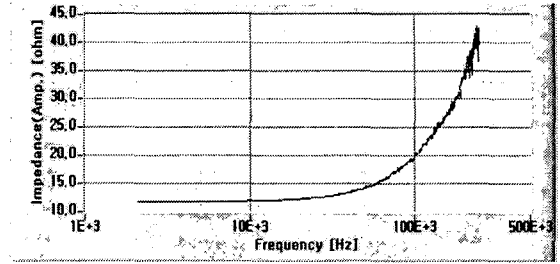
봉상접지전극이 묻히는 깊이만큼 굴착한 후 봉상접지전극을 시설하고, GV전선을 지면 1 [m] 지점까지 접속한 후 되메우하였다. 봉상접지전극까지 연결하는 도체는 동봉의 상부와 하부에서 인출하였다. 사용한 GV전선은 100 [mm] 이며, 동봉과의 접속부는 볼트로 3지점에서 견고하게 접속하였다.

3. 결과 및 고찰

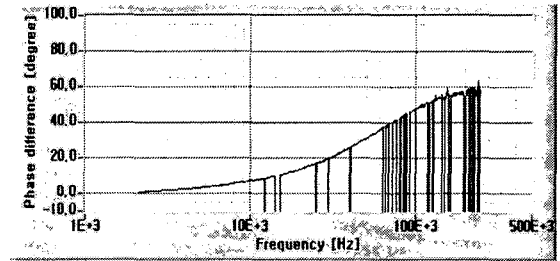
3.1. 측정결과

그림 3(a)는 주파수의 증가에 따라 변화하는 접지임피던스를 접지전위상승과 인가전류 파형의 amplitude값을 사용하여 연산하여 산출한 접지임피던스에 대한 결과이다. 약 4 [kHz]의 주파수에서 접지임피던스는 11.9 [Ω]이며, 주파수의 증가함에 따라 증가하여 200 [kHz]에서는 34.2 [Ω]을 넘어서는 것으로 측정되었다. 접지임피던스는 약 50 [kHz]를 넘어서면서 급격히 증가하며, 100 [kHz]에서는 60 [Hz]에서의 접지저항값의 약 2배로

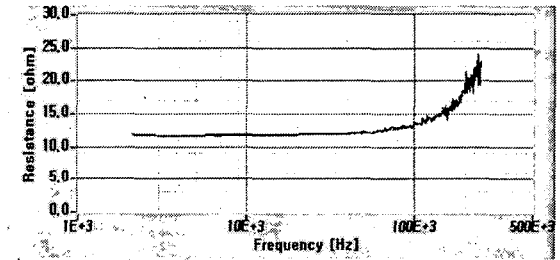
측정되었다. 접지임피던스의 위상그래프는 200 [kHz]에서 약 60 [°]에 가까운 값으로 근접하는 결과를 얻었다.



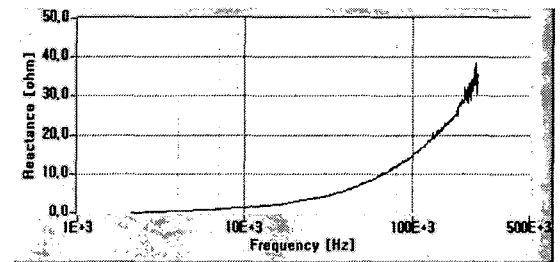
(a) Ground impedance



(b) Phase



(c) Resistive component



(d) Reactive component

그림 3. 10 [m] 봉상 접지전극의 접지임피던스
Fig. 3. Ground impedance of the ground rod of 10 [m]

접지임피던스와 위상그래프로부터 저항 성분과 리액턴스 성분을 계산한 결과는 그림 3(c)와 (d)에 나타내었다. 저항 성분은 약 100 [kHz]를 넘어서면서 급격히 증가하는 양상을 보이며, 리액턴스 성분은 약 10 [kHz]에서부터 지속적으로 증가하고 있다. 약 80 [kHz]의 주파

수에서의 저항 성분과 리액턴스 성분은 비슷한 값을 가지며, 이후 주파수가 증가함에 따라 리액턴스 성분이 훨씬 커지는 것으로 나타났다.

접지임피던스의 주파수 의존성은 많은 주목을 받고 있으나 측정 장치와 방법상의 어려움이 여전히 큰 문제로 남아 있다. 지금까지 접지임피던스의 주파수 의존성에 대하여 봉상접지전극을 사용한 실험결과에서는 대체로 다음과 같은 특성들이 나타나고 있다.

① 수 [kHz] 이하의 주파수에 대한 접지임피던스는 대부분 저항성이다.

② 수 [kHz]를 넘는 주파수에 대한 접지임피던스는 용량성 리액턴스가 나타나기도 하는데 이러한 특성은 접지전극의 형상, 시공방법, 대지저항률에 따라 다르다.

③ 수십 [kHz]를 넘는 주파수에 대한 접지임피던스는 접지전극의 형상과 길이에 따라 차이가 있지만 자기인덕턴스에 의해 유도성 경향이 지배적으로 나타난다.

3.2. 접지임피던스의 이론적 분석

접지임피던스의 주파수 의존성에 대하여 저항성, 용량성, 유도성으로 분류하고, 주파수의 증가에 따라 표피효과를 고려하고 있다. 접지임피던스의 주파수 의존성에 대하여 보다 세밀한 이론적 분석을 위하여 회로모델링을 적용하는 방법이 있다.[5] 접지전극이 대지에 시공되고 전극과 토양의 접합면이 어떻게 형성되며, 전극 주위의 토양 특성과 사용한 접지도체의 특성 등이 중요한 변수로 작용한다. 이러한 파라미터들 중에서 대지저항률은 실제의 대지에서 측정하여 적용할 수 있지만 R , L , C 값들은 계산식에 의해서 얻는다.

계산식에 의한 파라미터의 결정은 접지전극의 정확한 설계도면을 필요로 하며 오래된 접지시스템에서는 정확한 값의 계산이 어려운 경우도 있다. 몇몇 문헌들에서 [6-7] 특정모델에서 산출한 접지시스템의 R , L , C 값들은 유사한 형태나 규모를 가지는 접지시스템에서 근사적으로 추정하여 사용할 수 있다. 하지만 이러한 분석방법에서도 대지와 접지도선의 표피효과와 대지저항률의 주파수 의존성에 대한 정확한 파라미터가 산출되어야만 정확한 결과를 얻을 수 있다.

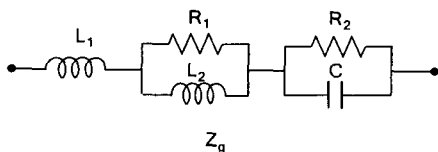


그림 4. 봉상접지전극의 접지임피던스 모델
Fig. 4. Ground impedance model of ground rod

본 연구에서는 접지전극의 형상이 비교적 간단하고 정형화된 봉상접지전극에 대하여 접지임피던스 측정결과와 회로모델을 이용하여 이론적으로 분석한 결과를 비교하였다. 회로모델은 그림 4와 같다.[6] 회로의 구성은 접지전극의 인덕턴스, 표피효과에 의한 접지전극의 저항증가를 고려하였다. 또한 대지구조가 저항과 커패시터의 병렬구조인 점을 감안하였다. 모델의 접지임피던스는 식 (1)과 같으며, 회로모델에 사용되는 각종 파라미터들은 표 1과 같다.

$$Z_g = \frac{(2\pi f L_2)^2 R_1}{R_1^2 + (2\pi f L_2)^2} + \frac{R_2^2}{1 + (2\pi f C R_2)^2} + j \left(2\pi f L_1 + \frac{2\pi f L_2 R_1^2}{R_1^2 + (2\pi f L_2)^2} - \frac{2\pi f C R_2^2}{1 + (2\pi f C R_2)^2} \right) \quad (1)$$

표 1에서 반지름 r 은 접지저감제를 사용한 전극에서 저감제가 사용된 직경 0.15 [m]의 원통을 전극으로 가정하여 산출하였다. 일반적인 토양의 비유전율 ϵ_r 은 대략 14 정도의 값을 가지며, 바닷물은 80, 도심지의 토양은 3 정도의 값을 가지는 것으로 보고되어 있다.[8-9]

표 1. 회로의 파라미터
Table 1. Circuit parameters

Parameters	10 m rod		50 m rod	
l	10 [m]		50 [m]	
r	0.025 [m]		0.025 [m]	
μ_0	1.26 × 10 ⁻⁶ [H/m]			
ϵ_0	8.85 × 10 ⁻¹² [F/m]			
ϵ_r	14	80	14	80
ρ	80 [Ω · m]			
L_1	4.91 [μH]		45.69 [μH]	
R_1	100.0 [Ω]		500.0 [Ω]	
L_2	7.0 [μH]		30.0 [μH]	
R_2	11.9 [Ω]		7.1 [Ω]	
C	1.22 [nF]	6.97 [nF]	4.87 [nF]	27.83 [nF]

봉상접지전극의 L 과 C 의 계산은 참고문헌에 자세히 기술되어 있으며,[8] 본 논문에서 사용한 식은 식 (2) 및 식 (3)과 같다. 인덕턴스 L 은 그림 4에서 L_1 과 L_2 가 합해진 값이며, 접지임피던스를 계산할 때에는 접

지전극의 규모에 따라 L_1 과 L_2 의 크기가 정해진다. 대지저항률 ρ 와 60 [Hz]에서의 접지저항 R_2 의 값은 실제로 측정된 값을 사용하였다.

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{l}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{r} \right)^2} \right) + \frac{r}{l} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{l} \right)^2} \right) \quad (2)$$

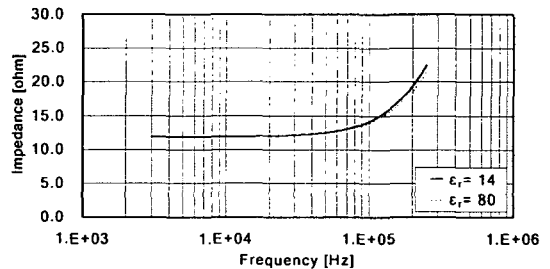
$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \left(\frac{2l}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{2l}{r} \right)^2} \right) + \frac{r}{2l} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l} \right)^2}} \quad (3)$$

접지임피던스의 모델링과 수식에 의한 분석에서 접지 임피던스의 주파수 의존성에 크게 기여하는 값은 L 이며, L 의 정확한 계산이 이루어져야만 높은 주파수에서 접지임피던스의 크기를 정확하게 계산할 수 있다. C 의 값은 일반적으로 수 [nF] 정도로 계산되어 무시할 수 있는 정도의 크기이나 접지임피던스의 용량성 특성을 결정하는 요소로 본 연구에서는 그 영향을 고려할 필요가 있다. 접지임피던스의 주파수 의존성에 대한 수식적 분석에서 가장 어려운 부분이 접지전극의 계산된 L 값으로부터 L_2 값을 결정하는 것이다. 또한 L_2 와 병렬로 접속되어 있는 R_1 을 적절한 값으로 설정하여 주파수가 증가함에 따라 나타나는 접지도체와 대지의 표피효과를 실제의 측정값에 근접하게 표현해 주어야 한다. 접지임피던스의 수식적인 모델링은 그 사례가 매우 적고 또한 대지와 관련된 파라미터들이 복잡하게 존재하므로 실제로 측정결과와 잘 일치하지는 않는다. 또한 측정결과를 바탕으로 모델링의 파라미터를 역으로 결정하는 연구가 수행되기도 한다. 본 연구에서도 기존의 모델링 사례와 측정된 결과를 바탕으로 가능한 실측결과의 경향성을 비교적 근접하게 표현해 주는 봉상접지전극의 모델링 결과를 그림 5에 나타내었다.

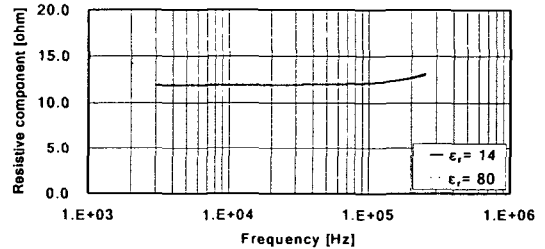
계산된 C 값이 매우 작아서 용량성 특성이 나타나지 않는다. 실제로 측정된 접지임피던스의 주파수 의존성은 접지저감제를 사용한 10 [m] 봉상접지전극의 경우 용량성 특성이 나타났으며, 약 50 [kHz]의 주파수까지 접지임피던스의 크기가 미소량 감소한다. 하지만 식 (3)에서 계산된 C 값으로는 이러한 특성이 나타나지 않으며, 약 0.1 [μ F] 정도 이상의 값에서 유사한 특성을 보인다. 또한, 접지시스템의 가장 간단한 형태인 봉상접지전극의 경우에도 접지모델링에 의한 이론적 분석은 쉽지 않으며, 접지전극의 형상과 규모에 따라 많은 차이를 보인다. 또한 접지전극의 저감제를 사용한 특성과 이에 따른 접지도체의 형태변화 등의 특성이 수식적인 분석에서는 자세하게 반영되기가 매우 어렵다. 결국 이

러한 부분은 접지임피던스의 실제특성을 정확하게 예측하기 어렵게 하는 요소로 실측의 필요성을 보다 강조하고 있다.[10]

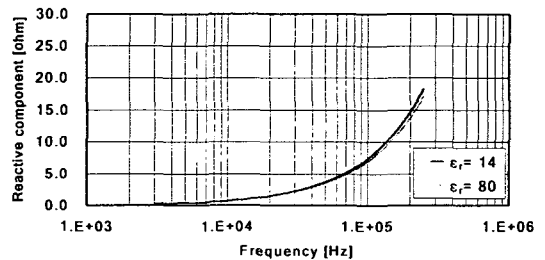
결과적으로 대지를 대상으로 하는 접지임피던스의 측정에서 수식적인 분석이나 모델링에 의한 특성은 실제의 특성과 일치하기가 매우 어렵다. 접지임피던스의 주파수 의존성을 이론적으로 분석하는 이러한 방법은 접지시스템의 설계단계에서 접지시스템의 특성에 대한 근사적인 예측을 위해서는 사용할 수 있지만 실제로 시설된 접지시스템의 특성을 정확하게 평가하기에는 부족한 점이 많다.



(a) Ground impedance



(b) Resistive component



(c) Reactive component

그림 5. 10 [m] 봉상접지전극의 접지임피던스 계산 결과

Fig. 5. Calculated ground impedance of the ground rod of 10 [m]

4. 결 론

접지전극의 형상이 비교적 간단하고 정형화된 봉상접

지전극에 대하여 접지임피던스 측정결과와 회로 모델을 이용하여 이론적으로 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

상용주파수 영역에서 11.8 [Ω]의 접지저항을 가지는 10 [m] 봉상 접지전극의 경우 주파수 100 [kHz]에서 접지임피던스는 20.1 [Ω]으로 나타났다. 봉상접지전극에 대한 측정결과와 회로모델을 이용한 이론적 분석결과 접지임피던스의 주파수 의존성은 주로 유도성으로 나타났다. 접지임피던스는 약 10 [kHz] 이하의 낮은 주파수에서 저항 성분이 주를 이루었으나 10 [kHz]를 넘어서면서 유도성 리액턴스의 특성이 주로 나타났다.

회로정수를 이용한 이론적 분석은 R 과 L 값을 정확하게 계산하기가 어렵기 때문에 실제의 측정결과와 비교할 때 접지임피던스의 양상은 유사하나 접지임피던스의 크기에서는 차이를 나타내었다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프로그룹 축 지원사업의 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

[1] J. H. Bogensperger, J. Frei and S. Pack, "Resistance of Grounding Systems Stationary and Transient Behavior", Proc. 9th ISH Conf., pp.6715-1~4, 1995.

[2] I. D. Lu, R. M. Shier, "Application of a Digital Signal Analyzer to the Measurement of Power System Ground Impedance", IEEE Trans. on PAS, Vol.100, No. 4, pp.1918~1922, 1981.

[3] I. D. Lu, R. M. Shier, "Application of a Digital Signal Analyzer to the Measurement of Power System Ground Impedance", IEEE Trans. on PAS, Vol.100, No.4, pp.1918~1922, 1981.

[4] A. D. Papalexopoulos, A. P. Meliopoulos, "Frequency Dependent Characteristics of Grounding System", IEEE Trans. on PAS, Vol.100, No.4, pp.1918~1922, 1981.

[5] A. Geri, "Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: the Model and Its Validation", IEEE Trans. on PD, Vol.14, No.3, pp.1008~1017, 1999.

[6] R. Verma, D. Mukhedkar, "Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Groundings", IEEE Trans. on PAS, Vol.100, No.3, pp.1023~1030, 1981.

[7] R. Verma, D. Mukhedkar, "Impulse Impedance of Buried Ground Wire", IEEE Trans. on PAS, Vol.99, No.5, pp.2003~2007, 1980.

[8] IEEE Std 80-1986, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Inc, pp.277~284, 1986.

[9] A. D. Papalexopoulos, A. P. Meliopoulos, "Frequency Dependent Characteristics of Grounding System", IEEE Trans. on PD, Vol.2, No.4, pp.1073~11081, 1987.

[10] IEEE Std 142-1991, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power System, IEEE Inc, p186, 1991.