

봉상전극 접지임피던스의 측정과 이론적 분석

이복희, 이태형, 이수봉, 엄주홍¹
 인하대학교 차세대 고전압전력기술연구소, ¹기초전력연구원

Theoretical analysis and measurement of Ground impedance of Ground rods

Bok-Hee Lee, Tae-Hyung Lee, Su-Bong Lee, Ju-Hong Eom
 HEIRC, INHA University, KESRI

Abstract - A systematic approach of measurement, modeling and analysis of grounding system impedance is presented. The measurement and analysis system of ground impedance is based on a computer aided technique. The ground impedances of the ground rod are considerably dependent on the frequency. The ground impedance is mainly resistive in the frequency range of 3-20 kHz. At higher frequencies, the reactive components of the ground impedances are no longer negligible and the inductance of the ground rod was found to be the core factor deciding the ground impedance. As a consequence, the equivalent circuit model based on the measured data was proposed, and the calculated results were in approximately agreement with the measured data.

1. 서 론

최근 접지전극을 시설할 수 있는 장소가 제한되는 도심지 건물의 접지전극으로 대형 봉상접지전극이 많이 사용되고 있다. 대형 봉상접지전극은 보링머신을 사용하여 깊게 굴토한 후 시설하므로 낮은 접지저항을 얻기 위해 넓은 면적을 차지하지 않는다. 하지만 길이가 길어짐에 따라 높은 주파수에서 접지임피던스가 크게 변동할 것으로 예상된다.[1],[2] 따라서 본 연구에서는 뇌보호용 접지시스템에 적용될 수 있는 대형 봉상접지전극의 뇌서지와 같은 고주파 영역에서의 접지임피던스 특성을 분석하기 위해서 접지 임피던스의 주파수의존성을 측정하고 분석하였다. 측정용 전원으로는 주파수 조정범위가 3-300 kHz 인 가변주파수 인버터를 사용하였으며, 측정계는 측정전류인가선과 전위검출선의 전자유도작용에 의한 오차를 줄이기 위해서 전위보조전극과 전류보조전극이 피측정 접지전극의 양쪽 맞은편에 위치시킨 수정된 전위강하법을 적용하였다. 또한 회로모델을 이용한 등가 회로를 구성하여 봉상접지전극의 접지임피던스를 이론적으로 계산하고, 측정결과와 비교·검토하였다.

2. 본 론

2.1 수정된 전위강하법

대형 봉상접지전극에 대하여 수정된 전위강하법을 이용한 접지임피던스의 측정회로를 그림 1에 나타내었다. 수정된 전위강하법은 피측정 접지전극을 중심으로 하여 전위보조전극과 전류보조전극을 반대 방향에 시설하여 측정선의 전자유도결합에 의한 오차를 줄일 수 있는 기법이다.

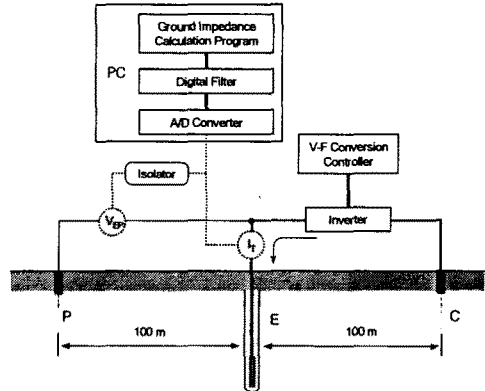


그림 1. 수정된 전위강하법을 이용한 접지임피던스의 측정회로
 Fig. 1. Circuit diagram for measuring the ground impedance using the revised fall-of-potential method

전위보조전극으로는 측정대상의 접지전극으로부터 100 [m] 떨어진 지점에 길이 1 [m]의 접지전극을 사용하여 시설하였으며, 전류보조전극은 전위보조전극 반대 방향으로 100[m] 지점에 봉상접지전극을 시설하여 사용하였다. 측정전류는 설정된 시간동안 주파수 제어가 선형적으로 이루어지는 인버터를 사용하여 인가하였다. 측정전류의 주파수를 3~300 [kHz]의 범위에서 가변시키면서 측정대상인 접지전극(E)과 전류보조전극(C) 사이에 인가하여 기준전위전극(P)에 대한 피측정 접지전위상승을 검출하였다.

2.2 측정대상의 접지전극

측정대상의 접지전극의 형상과 시설조건을 그림 2에 나타내었으며, 직경 5 [cm], 길이 50[m]의 동관을 접지전극으로 사용하였다.

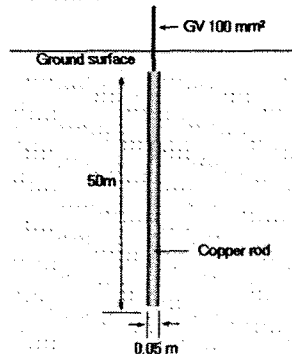


그림 2. 본 연구에 사용된 봉상접지전극
 Fig. 2. The ground rod used in this work

봉상접지전극이 묻히는 깊이만큼 굴착한 후 봉상접지전극을 시설하고, GV전선을 지면 1 [m] 지점까지 접속한 후 되매움하였다. 인출용 GV전선은 100 [mm] 이며, 동봉과 인출용 접지도선은 볼트로 3지점에서 견고하게 접속하였다.

2.3. 측정결과 및 검토

파측정 접지전극에 인가된 시험전류와 검출된 전위 파형을 A/D 변환기로 디지털화시킨다. 이들 검출신호는 대역통과필터를 거쳐 그림 3과 같이 측정주파수의 기본파 성분만의 파형으로 된다. 인가전류와 접지전극의 전위에 대한 기본주파수 파형의 신호로부터, 접지임피던스의 크기, 위상각, 저항성 성분, 리액턴스 성분 등을 산출한다.

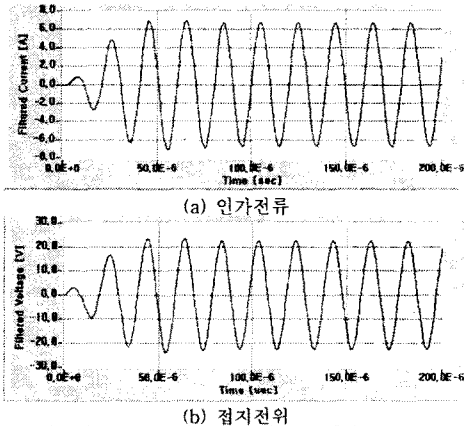


그림 3. 인가전류와 전위의 기본주파수 파형의 예
Fig. 3. Examples of the fundamental frequency waveforms of the injected current and potential

길이 50 [m]인 봉상접지전극에 대하여 주파수를 변화시켜 가면서 측정된 접지임피던스를 그림 4에 나타내었다. 봉상접지전극의 60 [Hz] 영역에서의 접지저항은 7.1 [Ω]로 측정되었다. 접지임피던스의 크기는 주파수가 약 20 [kHz]를 넘어서면서 증가하기 시작하여 50 [kHz]에서 11.4 [Ω], 100 [kHz]에서는 23.5 [Ω]로 측정되었다. 저항 성분과 리액턴스 성분이 같아지는 주파수는 약 40 [kHz]이다.

접지저항 저감을 위하여 접지전극의 길이를 과도하게 증가시킬 경우 높은 주파수 영역에서 접지임피던스가 급격히 증가하는 이러한 특성은 뇌서지 보호용 접지전극에서 매우 불리하다. 봉상접지전극의 길이를 과도하게 길게 하면 정상상태 접지저항은 크게 저감되는 효과를 얻을 수 있지만 주파수가 증가함에 따라 오히려 접지임피던스가 커지게 되기 때문이다.

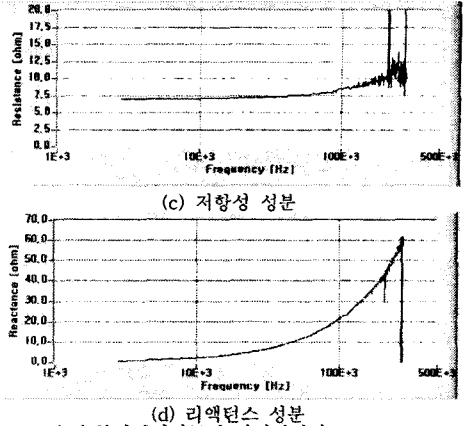
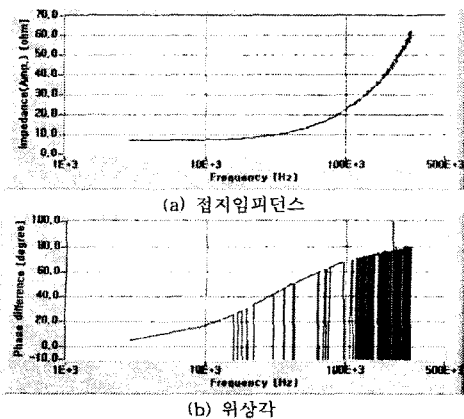


그림 4. 50 [m] 봉상접지전극의 접지임피던스
Fig. 4. Ground impedance of the ground rod of 50 m long

2.4. 봉상접지전극의 회로모델

접지전극의 형상이 간단한 봉상접지전극에 대하여 접지임피던스 측정결과를 기초로 하여 봉상접지전극의 등가회로모델을 구성하고, 해석한 결과를 실측결과와 비교하여 모델화의 정확도를 검토하였다. 측정된 결과와 해석결과를 비교적 근접하게 표현해 주는 봉상접지전극의 모델등가회로를 그림 5와 같이 구성하였다.

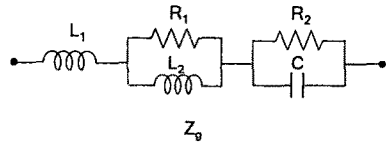


그림 5. 봉상접지전극의 등가회로
Fig. 5. Equivalent circuit of a ground rod

등가회로의 구성에 있어 접지전극의 인덕턴스와 표피 효과에 의한 접지전극의 저항 증가도 고려하였다. 또한 대지구조가 저항과 커패시터의 병렬 구조인 점을 감안하였다. 모델의 접지임피던스는 식 (1)과 같으며, 등가회로에 적용한 회로정수는 표 1에 나타난 바와 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 1. 본 해석에 적용한 회로정수
Table 1. Line constants used in this analysis

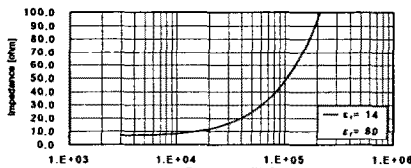
Parameters	50 m rod	
l	50 [m]	
r	0.025 [m]	
μ_0	1.26×10^{-6} [H/m]	
ϵ_0	8.85×10^{-12} [F/m]	
ϵ_r	14	80
ρ	80 [Ω · m]	
L_1	45.7 [μH]	
R_1	500.0 [Ω]	
L_2	30.0 [μH]	
R_2	7.1 [Ω]	
C	4.9 [nF]	27.8 [nF]

표 1에서 일반적인 토양의 비유전율 ϵ_r 은 대략 14 정도의 값을 가지며, 바닷물은 80, 도심지의 토양은 3 정도의 값을 가지는 것으로 보고되어 있다.[3]-[5] 인덕턴스 L 은 그림 5에서 L_1 과 L_2 의 합성값이며, 접지 임피던스를 계산할 때에는 접지전극의 규모에 따라 L_1 과 L_2 의 크기가 정해진다. 대지저항률 ρ 와 접지저항 R_2 의 값은 측정결과를 적용하였다.[3],[4]

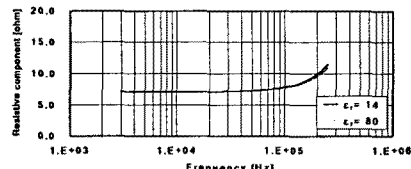
$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{l}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{r} \right)^2} \right) + \frac{r}{l} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{l} \right)^2} \right) \quad (2)$$

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

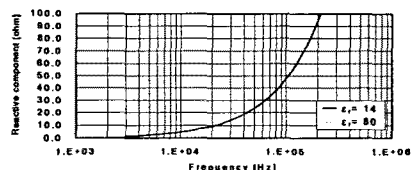
등가회로를 적용한 접지임피던스의 이론적 분석에서 주파수 의존성에 크게 기여하는 값은 L 이며, L 의 정확한 계산이 이루어져야만 한다. C 의 값은 일반적으로 수 nF 정도로 계산되어 무시할 수 있는 정도의 크기이나 접지임피던스의 용량성 특성을 결정하는 요소로 그 영향을 고려하였다. 접지임피던스의 주파수 의존성에 대한 수식적 분석에서 가장 어려운 부분이 접지전극의 계산된 L 값으로부터 L_2 값을 결정하는 것이다. 또한 L_2 와 병렬로 접속되어 있는 R_1 을 적절한 값으로 설정하여 주파수가 증가함에 따라 나타나는 접지도체와 대지의 표피효과를 실제의 측정값에 근접하게 표현해 주어야 한다. 또한 측정결과를 바탕으로 모델링에 대한 회로정수를 역으로 결정하였으며, 등가회로를 적용하여 계산한 결과를 그림 6에 나타내었다.



(a) 접지임피던스



(b) 저항성 성분



(c) 리액티브 성분

그림 6. 50[m] 봉상접지전극의 접지임피던스 계산결과 Fig.6. Calculated ground impedance of the ground rod of 50 m.

봉상접지전극의 길이가 길어짐에 따라 실측한 접지임피던스 크기에 비하여 계산된 접지임피던스의 크기가 훨씬 크게 나타났다. 이는 주로 계산된 L 값의 영향이 실제 측정결과보다 커져서 나타나는 현상으로 50 [m] 봉상접지전극에서 200 [kHz] 주파수의 접지임피던스는 약 90 [Ω]을 넘는다. 측정된 접지임피던스의 값이 약 40

[Ω]인 것과 비교할 때 약 2 배 이상의 값을 가진다. 이러한 결과는 계산된 L 값이 과대하게 설정된 것으로 보인다.

결과적으로 대지파라미터를 이용하는 접지임피던스의 모델등가회로를 이용한 수치적 해석은 실제의 특성과 일치하지 않을 수 있다. 접지임피던스의 주파수 의존성을 이론적으로 분석하는 이러한 방법은 접지시스템의 설계 단계에서 접지시스템의 특성에 대한 근사적인 예측을 위해서는 적용할 수 있지만 실제 접지시스템의 특성을 정확하게 평가하기에는 부족한 점이 많다. 현재의 기술수준에서는 실측방법이 보다 신뢰성이 있으며, 이론적 해석은 설계단계에서 참고적인 자료로 활용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 결론적으로 모델등가회로를 이용한 접지임피던스의 주파수에 따른 변화 특성은 개략적인 분석은 가능하지만 신뢰성이 비교적 낮으므로 가급적 실측을 통한 접지시스템의 성능평가가 합리적이다.

3. 결 론

접지전극의 현상이 간단한 봉상접지전극에 대하여 접지임피던스 측정결과와 이를 기초로 하여 모델등가회로를 제안하였다. 접지저항이 7.1 [Ω]인 50 [m] 봉상접지전극의 경우 주파수 100 [kHz]에서 접지임피던스는 23.5 [Ω]으로 정상상태 접지저항은 작지만 높은 주파수에서의 접지임피던스는 매우 증가하는 현저한 주파수 의존성을 나타내었다.

또한, 봉상접지전극에 대한 측정결과와 제안하는 모델 등가회로를 이용하여 해석한 결과는 수십 [kHz] 이하의 주파수 영역에서는 비교적 잘 일치하였으나 고주파 영역으로 갈수록 편차가 크게 나타났다. 결론적으로 접지임피던스의 주파수 의존성을 볼 때 고주파 성분을 함유하는 고장서지나 뇌서지에 의한 전위상승을 억제하기 위한 접지시스템의 성능은 반드시 주파수에 따른 접지임피던스의 변동특성을 평가하여야 한다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축 지원사업의 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] M. I. Jambak, H. Ahmad, "Measurement of Grounding System Resistance Based on Ground High Frequency Behavior for Different Soil Type", in Proc. TENCON 2000, Vol.3, pp.207~211, 2000.
- [3] S. Bourg, B. Sacepe, T. Debu, "Deep earth electrodes in highly resistive ground: frequency behaviour", in Proc. IEEE Int. Symp. EMC, pp.584~589, 1995.
- [4] IEEE Std 80-1986, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Inc, pp.277~284, 1986.
- [5] A. D. Papalexopoulos, A. P. Meliopoulos, "Frequency Dependent Characteristics of Grounding System", IEEE Trans. on PD, Vol.2, No.4, pp.1073~11081, 1987.