

심매설 접지전극의 접지임피던스의 주파수의존성

(Frequency Dependence of Grounding Impedances of the Deeply-driven Ground Rods)

김태기 · 강성만 · 이복희*
(Tae-Ki Kim · Sung-Man Kang · Bok-Hee Lee*)

대한전기협회 기술기준처
*인하대학교 전기공학과

Abstract

Grounding impedance depends on the frequency of current flowing into a grounding system. Especially, the lightning gives a broad frequency spectrum from low frequency up to 1 MHz. So the grounding impedance related to high frequency current like lightning should be measured with high frequency source. In this paper, we described the grounding impedances of deeply-driven ground rods of 10 ~ 48 m long with respect to the frequency of injected currents and the feed point. For the experiments, we used the wideband power amplifier which can produce sinusoidal voltages with the frequency ranges of DC ~ 250 MHz. As a result, the longer the ground rod is, the lower the ground resistance is. However the grounding impedance of deeply-driven ground rod in the range of higher frequency is significantly increased. As a consequence, it is important to evaluate the high frequency performance of grounding systems for lightning protection.

1. 서론

보호하고자 하는 시스템에 유입되는 고장전류와 뇌격전류와 같은 이상전류는 접지시스템에 높은 전위 상승을 일으키며, 그로 인해 인근 기기의 파손이나 인체의 안전에 대한 위험요소가 된다. 따라서 효과적인 접지시스템을 구축함으로써 최대한 전위상승을 억제하여 인체의 안전 및 설비의 기능유지를 도모할 필요가 있다.

일반적으로 접지극과 대지와의 양호한 접속정도로서 접지저항이 낮게 나타날 경우 접지가 잘 이루어진 것으로 보며, 상용주파수 영역의 감전보호용 접지는 접지저항의 크기로 성능평가가 이루어진다. 그러나 고주파수 성분을 갖는 통신용 접지시스템이나 낙뢰 또는 개폐임펄스전압에 대한 보호를 주목적으로 하는 접지시스템에 대해서는 단순한 접지저항의 저감만으로는 효과적이지 못하며, 주파수특성이 고려된 접지임피던스로의 평가가 반드시 필요하다.[1]-[3]

최근 대지저항률이 높거나 면적이 협소한 공간적인 제약을 받는 대형건축물 시설현장 등에서 심매설 봉상 접지전극이 주로 사용되고 있으며 낮은 접지 저항값을 얻기 위해 설치깊이, 접지전극의 형상 및 충전물 등에서 보다 다양화 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 피뢰설비 등과 같이 고주파 영역에서 사용되어지는 실규모의 심매설 접지전극에 대해 광대역 전력증폭기를 이용하여 10 kHz ~ 20 MHz까지의 주파수영역에서 접지임피던스의 주파수특성을 측정하고 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험계의 구성

피측정 접지전극-전위보조전극-전류보조전극이 일직선상으로 배치되는 전형적인 전위강하법은 대형 접지시스템의 접지임피던스를 측정하는 기본적인 방법이지만 고주파수의 측정전류에 대해서는 측정대상의 접지전극으로부터 전류보조전극을 연결하는 도선과 전위보조극 사이에 발생하는 전자유도결합에 의해서 오차가 발생하게 되므로 적절하지 않게 된다. 따라서 본 실험에서는 그림 1에서와 같이 IEEE 81.2-1991에서 권고하는 전위강하법을 적용하여 측정상의 오차를 최소화 할 수 있도록 전류보조전극을 전위보조극과 90도 각도로 배치하였다.[4]-[5]

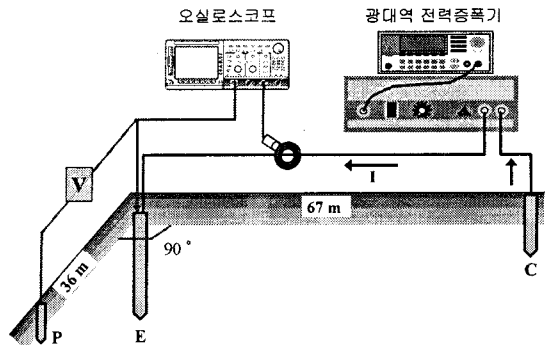


그림 1. 접지임피던스의 측정회로
Fig. 1. Circuit for measuring the ground impedance

실규모의 접지시스템에 대한 접지임피던스의 주파수의존성을 평가하기 위해 비교적 높은 대지저항률을 갖는 도심지에 심매설 접지전극을 시설하였으며, 실험에 사용한 접지전극은 직경 54 mm이고 길이가 각각 10, 30, 48 m인 동관의 심매설 접지전극으로서 그림 2와 같이 지표면에 수직으로 천공기법으로 시설하였다. 전류를 인가하는 위치에 따른 특성파악을 할 수 있도록 상단, 중단, 하단에 38 mm의 GV전선을 이용하여 접속하였다. 그리고 전류보조전극(C)은 측정 대상의 접지전극(E)으로부터 64 m를 이격시켜 최대한 낮은 접지저항을 갖도록 시설하였으며, 전위보조전극(P)은 0.2 m의 동봉을 사용하여 접지전극(E)로부터 직각으로 67 m를 이격하여 시설하였다.

2.2 측정방법

피측정 접지전극과 전류보조극 사이에 인가전류의 주파수를 10 kHz에서 20 MHz까지 가변시켜 가며 인가하여 인가전압, 인가전류, 접지전극의 전위상승을 측정하였다. 실험에 사용된 광대역 전력증폭기는 최대출력 75 W이고 DC ~ 250 MHz의 정현파 전압을 발생시킬 수 있다. 인가전류는 400 MHz의 주파수대역을 갖는 전류프로브를 사용하였으며, 접지전극의 전위는 100 MHz의 주파수대역을 갖는 능동성 차동프로브를 사용하여 측정하였다.

측정된 인가전류와 접지전극의 전위상승파형은 500 MHz, 2.5 GS/s의 분해능을 갖는 4채널의 오실로스코프로 관측하였다. 오실로스코프의 연산기능을 이용하여 인가전류파형과 접지전극의 전위상승파형 사이의 위상차를 계산하였으며, 개인용 컴퓨터를 이용하여 임피던스, 저항, 리액턴스 성분을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대지저항률의 측정

그림 2는 Dipole-dipole법에 의해 측정된 전기적구조로서 시험용 접지전극의 시설형태와 시험장소의 대지저항률 분포를 보여주고 있다.

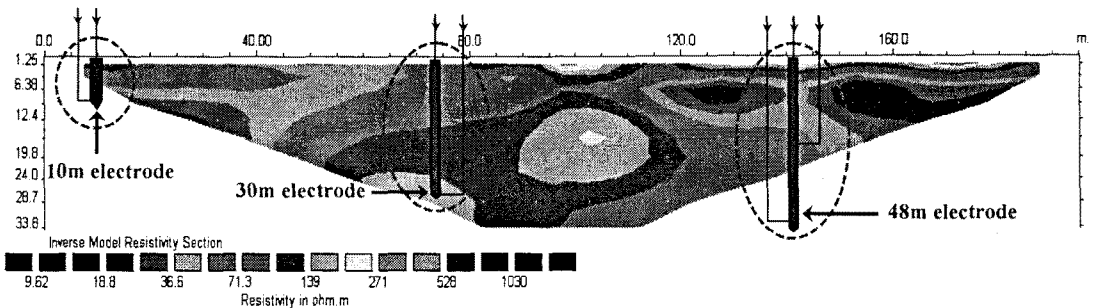


그림 2. 시험용 접지전극의 시설형태와 시험장소의 대지저항률 분포

Fig. 2. Profile of long ground rods under test and soil resistivity mapping at the test site

2-D 맵 형태의 측정결과로부터 대지저항률의 수평 및 수직방향에 대한 변화를 알 수 있다. 대지저항률은 지표면으로부터 깊이에 따라 매우 다양한 분포를 갖는 다층구조를 이루고 있다. 상층부의 대지저항률의 경우 약 10 ~ 100 Ω·m 정도이고, 하층부로 갈수록 크게 증가하며 30 m 깊이에서는 약 130 Ω·m의 대지저항률을 보이고 있다.

접지전극의 길이에 따라 10, 30과 48 m 접지동봉의 겹보기 토지저항률은 각각 75.5, 83.1과 52.3 Ω·m 이고, 정상상태의 접지저항은 각각 8.2, 11.52과 5.8 Ω으로 나타났다. 정상상태의 접지저항은 접지전극의 치수뿐만 아니라 토지저항률에 의해 달라지며, 본 연구에 사용된 실험장의 경우 전극의 치수보다 토지저항률에 의한 영향이 크게 나타났다.

3.2 접지임피던의 주파수의존성

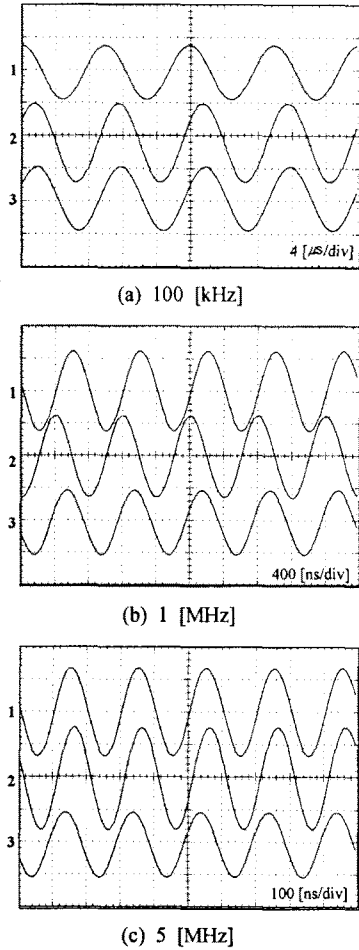
본 실험에 사용한 광대역 전력증폭기는 심매설 접지전극에 큰 전류를 흘릴 수 없기 때문에 뇌격전류에 의해 발생할 수 있는 토양의 이온화현상이나 토중방전현상과 같은 특성을 관찰 할 수 없다. 그러나 고주파영역에서의 접지임피던스는 뇌격전류에 포함되어 있는 고주파성분에 의한 접지시스템의 응답특성을 평가하는데 중요한 지시기가 될 수 있다.

일반적으로 접지시스템의 임피던스(Z)는 접지전극에 흐르는 전류(I)의 실효치에 대한 접지전극의 전위상승(V)의 실효치의 비로 표현할 수 있으며, 인가전류와 접지전위상승의 위상차로부터 접지임피던스(Z) 및 접지저항(R), 접지리액턴스(X)의 각 성분을 다음 식 (1)~식 (3)과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$Z = R + jX = |Z| \cdot (\cos\theta + j\sin\theta) \quad (1)$$

$$|Z| = V/I \quad (2)$$

$$R = |Z| \cdot \cos\theta, \quad X = |Z| \cdot \sin\theta \quad (3)$$



1 : 인가전압 2 : 접지전위상승 3 : 인가전류

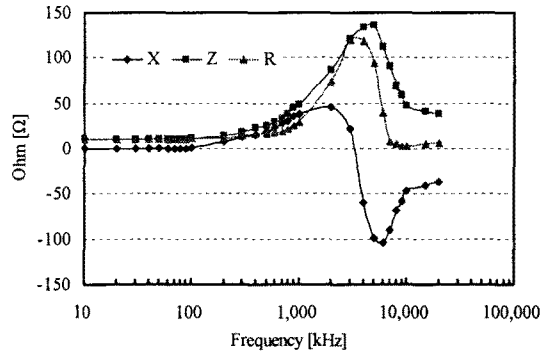
그림 3. 주파수에 따른 인가전압, 인가전류 및 접지전위상승의 파형

Fig. 3. Waveforms of the applied voltage, the injected current and ground potential rise with respect to the frequency.

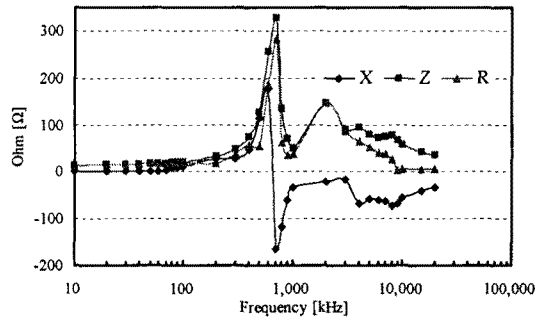
48 m 심매설 접지전극의 상단에 0.5 A의 일정한 크기의 가변주파수전류를 인가했을 때 인가전압, 접지전위상승 및 인가전류의 대표적인 파형을 그림 3에 나타내었다. 인가전류의 주파수가 100 kHz(그림 3의 a)인 저주파영역의 경우, 인가전압의 파형은 접지전극으로부터 전류보조전극을 연결하는 도선의 영향으로 인가전류의 파형에 비해 앞선 위상을 나타내고 있으나, 접지전위상승파형은 인가전류파형과 거의 동위상을 보이고 있다. 그러나 주파수가 증가할수록 접지전위상승파형은 인가전류파형에 비해 앞선 위상(1 MHz)과 뒤진 위상(5 MHz)을 나타내는 등 주파수에 따른 접지임피던스의 변화특성을 나타내었다.

측정된 인가전류파형과 접지전위상승 파형으로부터 식 (1)~식 (3)에서와 같이 접지임피던스의 크기

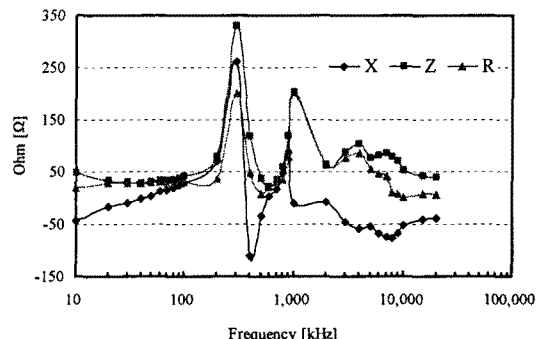
와 위상(θ)를 계산할 수 있으며, 이로부터 접지임피던스의 각 저항성분과 리액턴스 성분을 분석하였다. 48 m 길이 심매설 접지전극에 대하여 전류인가 위치 및 주파수변화에 따른 접지전극의 임피던스 및 저항, 리액턴스 성분의 변화특성을 분석한 대표적인 예를 그림 4에 나타내었다.



(a) 접지전극 상단



(b) 접지전극 중간



(c) 접지전극 하단

그림 4. 전류인가 위치와 주파수의 변화에 따른 접지임피던스의 의존성(48 m 접지전극)

Fig. 4. Frequency dependent of grounding impedances as a function of the frequency in relation to the feed point of test current(ground rod of 48 m long)

전극의 상단에 전류를 인가했을 때 100 kHz의 저주파영역에서의 접지임피던스는 약 5.8 Ω으로써 정상 접지저항과 거의 유사하게 일치하였다. 그러나 주파수가 점점 증가할수록(100 kHz ~ 1MHz) 접지임피던스는 유도성을 보이며 크기가 증가하였다. 5 MHz의 주파수 부근에서는 저주파영역에 비해 약 20배 가량의 크기인 130 Ω정도로 급증했다가 그 이상의 주파수영역에서는 다시 감소하는 변화특성을 나타내었다.

시험전류를 접지전극의 중단과 하단에 인가했을 때 접지임피던스는 주파수의 증가에 따라 크기가 모두 유사하게 증감을 반복하는 진동특성을 나타내었으며, 중단의 경우 700 kHz, 1 MHz, 2 MHz에서, 하단의 경우 300 kHz, 600 kHz, 1 MHz, 2 MHz에서 접지임피던스가 공진하는 현상을 나타내었다. 실험결과에서 주파수변화에 따른 접지임피던스의 공진현상에 대한 근거를 명확하게 설명할 순 없지만 수백 kHz 이상의 고역 주파수영역에서는 접지전극 자체의 인덕턴스에 의한 유도성분과 대지접촉면에서 전극과 대지 사이의 정전결합에 의한 용량성분에 의해 나타나는 것으로 사료된다.[6]-[7]

접지극의 접속점의 길이(중단 : 24 m, 하단 : 48 m)가 증가할수록 보다 낮은 주파수에서 공진현상이 나타났으며, 공진시 접지임피던스는 정상상태의 접지저항에 비해 약 300배 이상으로 매우 크게 나타났다. 일례로 실제 뇌격이 건축물에 발생했을 시 피뢰시스템의 조건(인하도선 및 접지극의 자체인덕턴스)에 따라 섬락현상과 같은 극한상황을 초래할 수도 있게 된다. 따라서 유입전류가 고주파수 성분을 가지는 뇌보호접지나 통신접지용 심매설 접지전극의 접지임피던스를 작게 하기 위해서는 접지도선을 접지전극의 상단에 접속하는 것이 효과적이다.

일반적으로 국제 또는 국가표준에서 적절한 접지저항값으로 10 Ω 이하를 제시하고 있으나 이는 고주파영역에서의 접지임피던스는 고려치 않은 것이다. 특히, 고주파수영역에서 길이가 긴 접지전극 또는 인하도선이 포함된 접지임피던스는 인덕턴스와 같은 주파수특성을 보이므로 상용 접지저항계로 측정된 접지저항과는 큰 차이를 나타내므로 피뢰설비용 접지나 통신설비용 접지로서 심매설 접지전극의 경우에는 시설 후 고주파 접지임피던스를 측정하여 평가하는 것이 바람직하다.[6]-[7]

4. 결 론

실규모의 심매설 접지전극에 대한 접지임피던스의 주파수의존성을 평가하기 위한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 저역 주파수에서의 접지임피던스는 정상상태의 접지저항값과 거의 유사하게 나타났다. 그러나 수백 kHz 이상의 고역 주파수영역에서는 특정 주파수에서 공진현상을 보이며, 크기가 증감하는 복잡한 주파수의존성을 나타내었다.
- (2) 접지전극 길이와 전류 인가점의 차이에 따른 임피던스, 저항, 리액턴스의 변화는 유사한 경향을 보였다. 따라서 피뢰설비용 접지시스템 성능은 고주파 임피던스특성을 평가가 필요하며, 저주파영역에서의 접지저항뿐만 아니라 고주파영역에서의 접지임피던스도 작은 값을 갖는 접지시스템의 최적구조를 결정하는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

- [1] I. D. Lu, R. M. Shier: "Application of a digital signal analyzer to the measurement of power system ground impedance", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-100, pp.1918-1922, Apr. 1981.
- [2] A. D. Papalexopoulos, A. P. Meliopoulos: "Frequency dependent characteristics of grounding system", IEEE Trans. Power Del, vol. PWRD-2, pp.1073-1081, Oct. 1987.
- [3] "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", IEEE Std. pp.80-2000, 2000.
- [4] "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", IEEE Std. pp.81-1983, 1983.
- [5] "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", IEEE Std. pp.142-1991, 1991.
- [6] Wojtas S., Rousseau A. "Impulse and high frequency tests of lightning earthing", Proceedings of 27th ICLP, Avignon, France, pp.13-16, Sep. 2004
- [7] Rousseau A., P. Gruet, P., "Practical high frequency measurement of a lightning earthing system", Proceedings of 27th ICLP, Avignon, France, pp.13-16, Sep. 2004