

수직접지전극의 임계길이 산정

이복희, **조정현**, 이 봉, 김중호, 이승주, 이강수, 김기복, 김태기
인하대학교

Computation of Critical Length for Vertical Grounding Electrode and Counterpoise

Bok-Hee Lee, Jeong-Hyeon Joe, Feng Li, Seung-Ju Lee, Jong-Ho Kim, Gang-Su Lee, Ki-Bok Kim, Tae-ki Kim
INHA University

Abstract - The impedance of a vertical grounding electrode is not lowered by expanding the dimension of the grounding electrode, and the length of the vertical grounding electrode which shows the minimum value of the grounding impedance for each condition of frequency and soil characteristics is existent, and it is defined as Critical length. In this paper, the critical lengths for the vertical grounding electrodes are calculated by using the distributed parameter circuit model. The adequacy of the simulations has been confirmed by comparing the simulated results with the measured results.

1. 서 론

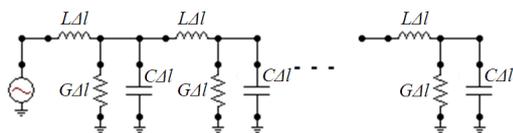
수직접지전극의 접지임피던스 특성은 분포정수회로모델로 해석이 가능하며, 많은 실험과 연구를 통해 분포정수회로모델의 모의해석 결과가 실제 측정결과와 상당히 일치함이 확인되었다.[1][2] 분포정수회로모델을 이용한 모의해석 결과에 따르면, 각 토양의 특성과 주파수 조건에 따라 접지임피던스가 최소값을 보이는 접지전극의 길이가 존재하며, 이 최소값을 보이는 접지전극의 길이를 각 토양의 특성과 주파수 조건에 대한 임계길이로 정의한다.[3] 임계길이 이상의 길이에서는 더 이상 접지임피던스가 감소하지 않고, 길이의 증가에 의해 접지전극을 이루는 금속도체의 인덕턴스 영향이 커져 오히려 접지임피던스가 증가하게 된다. 현재 접지임피던스에 대해 다양한 관점에서 연구가 진행되고 있기 때문에 임계길이에 대한 정의도 다양하게 존재하고 있으며, 본 논문에서는 위에 언급한 바와 같은 임계길이의 정의를 사용하였다.[4]

각 토양조건과 예상되는 이상전류의 주파수 범위에 대한 접지전극의 임계길이를 산정하여 이상전류에 대해 가장 효과적인 접지시스템을 시설하는 한편, 단순히 치수를 크게 하여 접지저항을 낮추는 과도한 접지전극 시설을 배제하여 경제성을 높이는 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문에서는 분포정수회로모델을 이용하여 수직접지전극을 모의해석하여 각 토양 특성과 주파수에서의 임계길이를 산정하였으며, 실험결과와의 비교를 통해 그 타당성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 수직접지전극의 임계길이 산정방법

고주파성분을 포함한 뇌격전류와 전자기장해(EMD)를 유발하는 고주파 이상전류에 대해서는 접지전극의 인덕턴스와 토양의 커패시턴스에 의한 임피던스의 영향이 작용하며, 이러한 접지전극의 고주파 전류에 대한 임피던스특성은 분포정수회로모델을 이용한 해석이 가능하다. 본 연구에서는 수직접지전극을 대상으로 분포정수회로모델을 구현하였으며, 다음의 과정을 통해 수직접지전극의 임계길이를 산정하였다.



〈그림 1〉 분포정수회로모델의 등가회로

분포정수회로모델은 그림 1과 같이 접지전극의 인덕턴스, 토양의 저항과 커패시턴스를 분포정수로 표현하며, 분포정수와 전송선로의 전파방정식을 이용하여 접지임피던스를 산출한다. 수직접지전극의 분포정수는 Tagg의 접지저항식으로부터 산출하였으며, 각 접지전극을 이루는 도체의 내부저항은 그 크기와 영향이 매우 미미하므로 0으로 간주하였다.[5]

수직접지전극에 대한 Tagg의 접지저항식은 식 (1)과 같으며, 수직접지전극의 분포정수는 식 (2)~(4)와 같이 계산된다.

$$R_0 = \frac{\rho \ln\left(\frac{4l}{d}\right)}{2\pi l} \quad [\Omega] \quad (1)$$

$$G = \frac{2\pi}{\rho \ln\left(\frac{4l}{d}\right)} \quad [1/\text{m}] \quad (2)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\left(\frac{4l}{d}\right)} \quad [\text{F}/\text{m}] \quad (3)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \quad [\text{H}/\text{m}] \quad (4)$$

여기서, l 은 수직접지전극의 길이, d 는 직경, ρ 는 대지의 저항률, ϵ_r 은 대지의 비유전율, ϵ_0 , μ_0 는 각각 진공의 유전율과 투자율이다.

수직접지전극에 대한 분포회로정수와 식 (5)와 (6)의 전파방정식을 이용하여 접지전극의 전류 인가점에서 바라본 임피던스, 즉 접지임피던스를 식 (7)과 같이 산출하였다.[3][5] α 와 Z_c 는 각각 전파정수와 특성임피던스로 분포회로정수와 관계는 식 (8)과 (9)와 같으며, 접지전극 끝단은 개방상태로 가정하였다.[3]

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{E}_r \cosh(\alpha l) + \mathbf{I}_r Z_c \sinh(\alpha l) \quad (5)$$

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{I}_r \cosh(\alpha l) + \frac{\mathbf{E}_r}{Z_c} \sinh(\alpha l) \quad (6)$$

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{E}_s}{\mathbf{I}_s} = \frac{e^{2\alpha l} + 1}{e^{2\alpha l} - 1} Z_c \quad (7)$$

$$\alpha = \sqrt{j\omega L(G + j\omega C)} \quad (8)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (9)$$

여기서, \mathbf{E}_s , \mathbf{I}_s 는 송전단 전압과 전류이며, \mathbf{E}_r , \mathbf{I}_r 은 수신단 전압과 전류이다.

위와 같은 방법을 통하여 특정한 주파수의 전류와 토양의 저항률과 비유전율에 대한 수직접지전극의 길이에 따른 접지임피던스의 특성을 모의해석할 수 있다. 수직접지전극의 분포정수회로모델을 이용하여 길이에 따른 접지임피던스의 특성을 모의해석한 결과에 따르면, 각 토양의 특성과 주파수에 따라 접지임피던스가 최소값을 보이는 길이가 존재하며, 이 최소값을 보이는 접지전극의 길이를 각 토양의 특성과 주파수에 대한 임계길이로 정의한다.

2.2 수직접지전극의 길이에 따른 접지임피던스의 특성

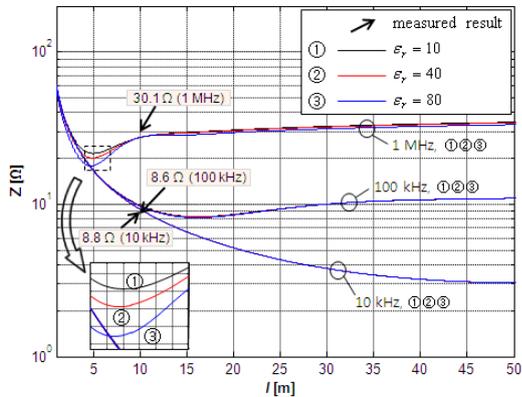
2.2.1 모의해석 조건과 실험방법

임계길이 산정에 앞서 각 토양의 특성과 주파수 조건에서 수직접지전극의 길이를 변화시켜 접지전극 길이에 따른 접지임피던스의 특성변화를 모의해석하였다. 또한 모의해석결과를 실험결과와 비교·분석하여 분포정수회로모델의 타당성을 검토하였다. 길이 10 m의 수직접지전극이 시설된 토양의 저항률을 대상으로 모의해석하였으며, 수직접지전극의 직경은 54 mm이다. 접지전극의 길이를 1 m부터 600 m까지 0.01 m 간격으로 변화시키며 접지임피던스를 모의해석하였으며, 인가전류의 주파수는 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz의 세 가지 주파수에 대하여 모의해석하였다. 그리고 10 m 수직접지전극의 접지저항은 9.3 Ω으로 측정되었으며, 수직접지전극의 접지저항식인 식 (1)에 의해 역산된 토양의 겹보기저항률을 반영하여 10 m 수직접지전극이 시설된 토양의 조건에서 접지전극의 길이에 따른 접지임피던스의 특성을 모의해석하였다. 토양의 비유전율은 측정이 불가능하여 단일 비유전율로 가정하였으며, 건조 토양의 비유전율이 약 2~3이고 물의 비유전율이 대략 80 정도임을 고려하여, 10, 40, 80의 세 가지 비유전율을 적용하였다.[6][7]

또한, 모의해석결과와 비교하기 위해 각 접지봉의 임피던스를 IEEE 81.2-1991에 권고하는 전류보조전극을 전위보조극과 90° 각도를 이루게 배치하는 수정된 전위강화법을 적용하여 측정하였다.[8]

2.2.2 수직접지전극의 길이에 따른 임피던스 특성

10 m 수직접지전극이 시설된 토양의 저항률 88.4 Ω·m에 대하여 접지전극의 길이에 따른 접지임피던스의 모의해석결과를 그림 2에 도시하였다. 그림 2의 그래프를 통해 실제 10 m 수직접지전극의 주파수에 따른 접지임피던스 측정결과와 모의해석결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.



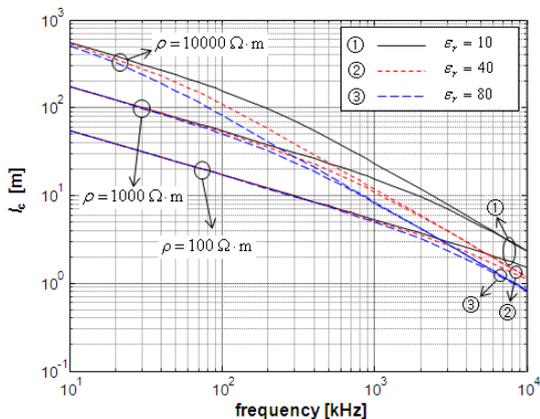
〈그림 2〉 수직접지전극이 설치된 위치에서 접지전극의 길이에 따른 접지임피던스 모의해석결과와 측정결과

접지저항은 주파수와 토양의 유전율에 상관없이 접지전극의 길이를 증가시키면 낮출 수 있지만, 그림 2와 같이 접지임피던스는 주파수와 유전율에 따라 다르게 나타나는 복합적인 특성이 나타났다. 다만 주파수와 유전율에 대하여 공통적으로 접지임피던스가 2 m 이하의 길이에 대하여 큰 크기를 보였으며, 접지전극의 길이가 증가함에 따라 감소하다가 특정길이 이상에서는 증가한 길이에 의한 접지전극의 인덕턴스 영향이 커져 오히려 접지임피던스가 증가하는 특성을 보였다. 따라서 주파수와 토양조건에 대하여 분포정수회로모델을 통해 모의해석한 접지임피던스가 최소값을 보이는 접지전극의 임계길이가 존재하며, 단순히 접지전극의 길이를 증가시켜 접지임피던스를 낮출 수 없다.

그림 2의 모의해석결과와 같이 각 주파수에 따라 접지임피던스의 길이에 따른 변화추세가 다르게 나타났으며, 주파수가 증가함에 따라 접지임피던스가 최소값을 보이는 접지전극의 임계길이가 짧아지는 특성을 보였다. 또한 낮은 주파수에서는 유전율의 영향이 거의 없었으며, 주파수가 증가함에 따라 유전율에 의한 영향이 더 크게 나타나고 유전율이 클수록 각 접지전극의 길이에서의 접지임피던스와 임계길이가 감소하는 특성을 보였다.

2.3 임계길이의 산정 및 분석

수직접지전극의 분포정수회로모델을 이용한 수직접지전극의 임계길이 산정결과를 그림 3의 그래프로 표현하였다. 그림 3의 임계길이 산정결과를 분석해 보면, 대지저항률이 증가할수록 임계길이가 증가하고, 주파수가 증가할수록 임계길이가 감소하는 특성을 보였다. 또한 낮은 저항률과 낮은 주파수의 조건에서는 유전율의 영향이 거의 없는 반면, 저항률과 주파수가 증가함에 따라 유전율의 영향이 증가하였으며, 높은 토양저항률과 고주파수의 조건에서 유전율이 증가할수록 임계길이는 감소하는 특성을 보였다.



〈그림 3〉 주파수에 따른 수직접지전극의 임계길이

접지전극의 길이가 증가할수록 접지저항은 낮아지지만, 접지전극의 인

덕턴스 영향이 증가하여 높은 주파수에서 접지임피던스는 크게 증가하게 된다. 반면, 접지전극의 길이가 감소할수록 접지저항은 증가하지만, 토양의 커패시턴스의 영향이 증가하여, 높은 주파수에서의 접지임피던스가 오히려 접지저항보다 작아지는 현상이 발생한다.[9] 이러한 특성에 의해 주파수가 증가할수록 접지전극의 임계길이는 감소하게 된다. 또한 토양의 유전율이 커지면 토양의 커패시턴스의 영향이 커지므로, 유전율의 증가에 의해 높은 고주파수에서 접지임피던스와 임계길이는 감소한다. 반면에, 토양의 저항률이 커지면 상대적으로 토양의 커패시턴스성분에 비해 토양의 저항성분의 비율이 증가하므로, 이로 인해 접지임피던스에 대한 토양의 커패시턴스성분의 영향이 감소하여 접지임피던스와 접지전극의 임계길이가 증가하게 된다. 따라서, 단순히 접지전극의 길이를 증가시켜 접지임피던스를 낮출 수 없으며, 토양의 특성과 접지시스템에 발생한 이상전류의 주파수를 고려하여 접지시스템을 설계하는 것이 바람직하다.

3. 결 론

본 논문에서는 분포정수회로모델을 이용하여 수직접지전극의 임계길이를 산정하였으며, 실험결과와의 비교를 통해 그 타당성을 확인하였다. 분포정수회로모델을 통하여 모의해석한 결과에 따르면, 대지저항률이 증가할수록 임계길이가 증가하고, 주파수가 증가할수록 임계길이가 감소하는 특성을 보였다. 또한 낮은 저항률과 낮은 주파수의 조건에서는 유전율의 영향이 거의 없는 반면에 저항률과 주파수가 증가함에 따라 유전율의 영향이 증가하였으며, 높은 토양저항률과 고주파수의 조건에서 유전율이 증가할수록 임계길이는 감소하는 특성을 보였다. 따라서 단순히 접지전극의 길이를 증가시켜 접지임피던스를 낮출 수는 없으며, 토양의 특성과 접지시스템에 유입하는 이상전류의 주파수를 고려하여 접지시스템을 설계하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Bourg, B. Sacepe, T. Debu, "Deep earth electrodes in highly resistive ground : frequency behaviour", IEEE International Symposium, pp.584~588, 1995
- [2] Leonid Grcev, "High-frequency performance of ground rods in highly resistive soil", International Conference on Grounding and Earthing, pp.85~89, 2000
- [3] M. E. Almeida and M. T. Correia de Barros "Fundamental considerations on long ground electrodes design", 13th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.241~244, 2003.
- [4] Blas Hermoso, "Counterpoise impedance with lightning discharges. Critical, effective, minimal impedance lengths. Technical considerations", 28th International Conference on Lightning Protection, pp.676~679, 2006
- [5] 이복희, "전력시스템공학", 인하대학교 출판부, pp.137~143, 2007.
- [6] Silverio Visacro, "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22 No. 1, pp. 381~386, 2007
- [7] William H. Hayt, John A. Buck, "Engineering Electromagnetics, sixth edition", McGraw-Hill, pp.225~231, 540~543, 2001.
- [8] IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems," IEEE Inc., pp.9~22, 1991.
- [9] Leonid Grcev, "Improved design of power transmission line grounding arrangements for better protection against effects of lightning", Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 100-103, 1998