

분포정수회로모형을 이용한 수직 접지전극의 접지임피던스의 분석

논문
59-6-15

Analysis for the Grounding Impedance of Vertical Grounding Electrodes using the Distributed Parameter Circuit Model

이복희[†] · 김종호* · 최종혁**
(Bok-Hee Lee · Jong-Ho Kim · Jong-Hyuk Choi)

Abstract - A grounding electrode has the transient grounding impedance characteristics against lightning surges. So the performance of grounding electrodes should be evaluated as a grounding impedance as well as the ground resistance. The frequency-dependent grounding impedance is varied with the shape and size of grounding electrode and is divided into both inductive and capacitive behaviors. This paper presents a theoretical analysis for the grounding impedance determined by the size of grounding electrode using the distributed parameter circuit model. EMTP and Matlab programs were used in calculating the frequency-dependent grounding impedances of vertical grounding electrodes. It was found that the frequency-dependent grounding characteristics of vertical grounding electrodes are characterized by the distributed parameters which are changed in the dimension of grounding electrodes.

Key Words : Grounding impedance, Vertical grounding electrode, Distributed parameter circuit model, EMTP

1. 서론

접지전극에 고주파수 성분을 포함하는 뇌서지전류가 유입되면 접지전극의 인덕턴스나 접지전극과 토양 사이에서 작용하는 정전용량의 영향으로 과도적인 접지임피던스 특성이 나타나기 때문에, 저주파수에서 측정하는 접지저항보다는 고주파수에서는 접지임피던스를 평가하는 것이 바람직하다 [1-3]. 따라서 상승시간에 따른 서지전류의 주파수스펙트럼에서 높은 주파수 범위에 대한 접지전극의 접지임피던스 특성의 분석이 필요하다. 따라서 접지임피던스의 주파수 의존성을 이론적으로 해석하고 활용하기 위해 보다 정확한 분석 기법을 제안하기 위하여 본 논문에서는 주파수에 따른 수직 접지전극의 접지임피던스를 산출하는 기법을 기술하였으며, EMTP를 이용하여 분포정수회로모형을 구현하였다. 고주파수 영역에서 상반된 유도성과 용량성 리액턴스의 특성을 갖는 접지임피던스의 두 수직 접지전극에 대하여 모델링을 통하여 해석하였으며, 실제 측정치와 비교를 통해 분포정수회로모형의 적합성을 평가하였다. 고주파수 영역에서의 접지임피던스가 단순히 저항성분 뿐만 아니라 인덕턴스와 커패시턴스에 의한 리액턴스 성분이 복합적으로 작용하는 현상을 분포정수회로모형을 통해 이론적으로 분석하였다.

2. 본론

2.1 분포정수회로모형

수직 접지전극을 분포정수회로모형으로 나타내면, 그림 1과 같이 접지전극의 인덕턴스와 토양과 접지전극 간의 컨덕턴스, 커패시턴스로 나타낼 수 있다[4-7].

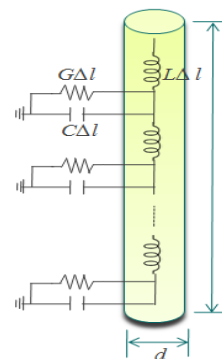


그림 1 수직 접지전극의 분포정수회로모형의 등가회로
Fig. 1 An equivalent circuit diagram of the distributed parameter circuit model of vertical grounding electrode

수직 접지전극에 대한 접지저항을 산출하는 Tagg의 식을 이용하여 식 (1)과 같이 접지저항 R_0 를 계산하고, 단위길이당 컨덕턴스 G 를 접지저항의 역수를 접지전극의 길이로 나누어 식 (2)과 같이 산정할 수 있다. 단위길이당의 커패시턴

* 준회원 : 인하대학교 대학원 전기공학과 석사과정
** 정회원 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정
† 교신저자, 펠로우회원 : 인하대 IT공대 전기공학부 교수
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2010년 2월 9일
최종완료 : 2010년 5월 13일

스와 인덕턴스 C, L 은 단위길이당 컨덕턴스 G 를 식 (5), (6)에 대입하여, 식 (3), (4)과 같이 산정할 수 있다[8,9].

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

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

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

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

$$C/G = \epsilon_r\epsilon_0\rho \quad (5)$$

$$LC = \mu_0\epsilon_r\epsilon_0 \quad (6)$$

여기서 l 은 수직 접지전극의 길이, d 는 수직 접지전극의 직경, ρ 는 대지저항률, ϵ_r 은 토양의 비유전율, ϵ_0 은 진공의 유전율, μ_0 는 진공의 투자율이다.

식 (2)~(4)의 수직 접지전극의 분포회로정수와 전송선로의 전파방정식을 이용하여 수직 접지전극의 전류 인가점에서 본 임피던스를 식 (7)과 같이 산출하였다[10,11]. $\dot{\alpha}$ 와 \dot{Z}_c 는 각각 전파정수와 특성임피던스로 분포회로정수와 관계는 식 (8), (9)와 같으며, 수직 접지전극 끝단은 무부하인 것으로 가정하였다[11,12]. 토양의 비유전율은 4~80의 범위로 알려져 있으며, 토양에 함유되어 있는 수분의 양에 따라 비유전율이 달라진다[1].

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

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

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

2.2 수직 접지전극의 주파수에 따른 접지임피던스

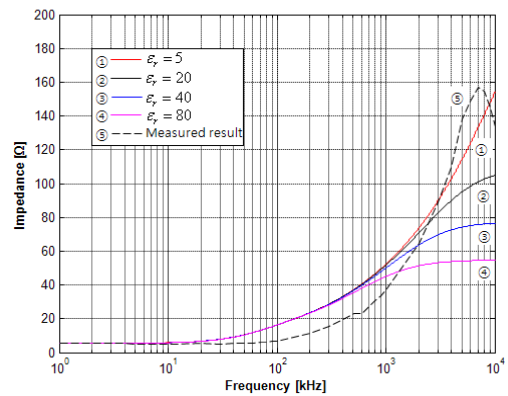
길이 1.8 m, 직경 15 mm 수직 접지전극과 길이 48 m, 직경 54 mm 수직 접지전극을 대상으로 모의를 수행하였고, 실제 측정결과와 비교·분석하였다. IEEE Std 81.2-1991에서 권고하는 전류보조전극을 전위보조전극과 90° 각도로 배치하는 수정된 전위강화법을 적용하여[13], 가변주파수형 접지 임피던스분석기로 측정하였다. 길이 1.8 m인 수직 접지전극의 경우 접지저항은 85.9 옴이고 식 (1)에 의해 환산한 겉보기 대지저항률은 157.3 Ω·m로 나타났으며, 길이 48 m인 수직 접지전극에서는 접지저항은 5.5 Ω, 겉보기 대지저항률이 203.6 Ω·m로 나타났다. 이 결과를 바탕으로 분포정수회로모

델에 적용하여 분포회로정수 G, C, L 을 산정하여 표 1에 나타내었으며, 이를 식 (7), (8), (9)으로 산출한 결과를 Matlab 프로그램을 이용하여 주파수에 대한 접지임피던스를 계산하였다. 비유전율은 직접 측정이 어렵기 때문에 토양의 비유전율의 범위인 4~80을 감안하여 5, 20, 40, 80의 단일 비유전율의 토양을 가정하여 계산하였다. 길이 1.8 m와 48 m인 수직 접지전극의 접지임피던스에 대한 주파수의존성의 계산결과와 측정결과를 그림 2에 나타내었다.

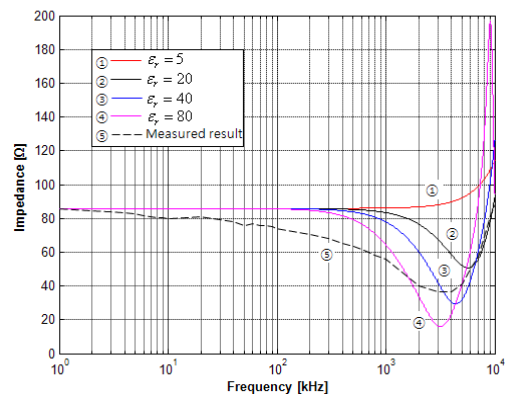
표 1 수직 접지전극의 분포회로정수

Table 1 Distributed parameters of the vertical grounding electrodes

구분	1.8 m	48 m	비율
G [mS]	6.5	3.8	1.71
C [nF]	0.36	0.27	1.33
L [μH]	1.23	1.64	0.75



(a) 48 m 수직 접지전극



(b) 1.8 m 수직 접지전극

그림 2 수직 접지전극의 접지임피던스의 주파수 의존성의 계산결과

Fig. 2 The calculated results of the frequency-dependent grounding impedances of the vertical grounding electrodes

주파수가 증가함에 따라 측정값과 계산값 사이의 차이는 크게 나타났다. 길이 48 m인 수직 접지전극의 경우 측정결과와 계산결과 모두 주파수가 증가함에 따라 접지임피던스가 증가였으며, 길이가 짧은 1.8 m 수직 접지전극에서는 약 3~5 MHz까지 주파수가 증가함에 따라 접지임피던스가 오히려 감소하는 경향을 나타내었다.

또한 두 수직 접지전극 모두 주파수가 300 kHz까지는 비유전율에 상관없이 거의 비슷한 접지임피던스 특성을 보였으나 그 이상 주파수가 증가하면서 점차 비유전율에 의한 접지임피던스의 차이를 크게 나타내었다.

2.3 EMTP를 이용한 수직 접지전극의 위치별 전위·전류

두 접지전극의 상반된 주파수에 따른 접지임피던스 경향을 분석하기 위하여, EMTP 분석을 위해 접지전극을 100등분한 분포정수회로모델로 구현하여, 각 주파수에 대하여 그림 3과 같이 접지전극의 상단에서 하단까지 4등분하여 인가지점에서 가까운 ①지점부터 끝단의 ⑤지점까지 다섯 위치에서 전위와 전류를 모의하였다. 모의된 두 수직 접지전극이 길이뿐만 아니라 직경이 다르기 때문에 동일한 주파수에서 접지임피던스 특성의 분석은 어렵다. 따라서 그림 2에서 측정 결과의 접지임피던스가 증가하거나 감소하기 시작하는 최대 주파수인 48 m 접지전극의 1 kHz와 1.8 m 접지전극의 100 kHz, 그리고 각 접지전극에서 접지임피던스 특성이 가장 잘 나타나는 주파수인 48 m 접지전극의 1 MHz와 1.8 m 접지전극의 5 MHz에 대하여 모의를 수행하였다.

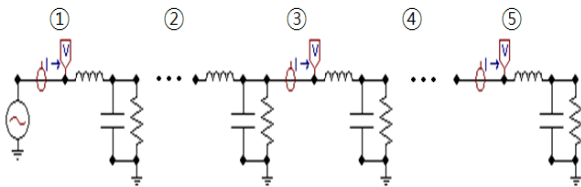
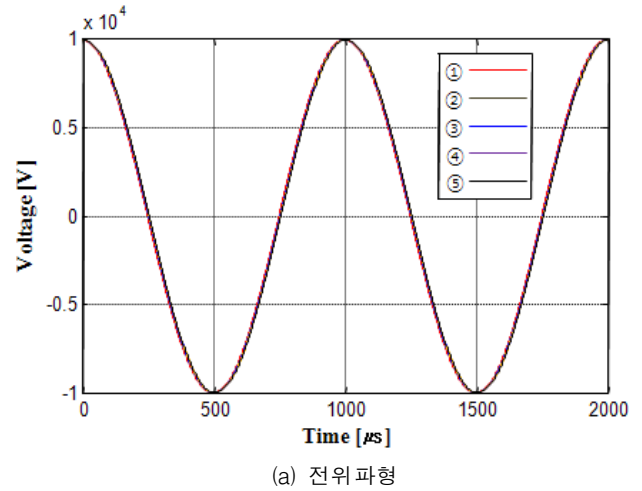


그림 3 수직 접지전극의 전위·전류에 대한 모의계산 위치
 Fig. 3 The positions for the simulation of the potentials and currents of the vertical grounding electrode

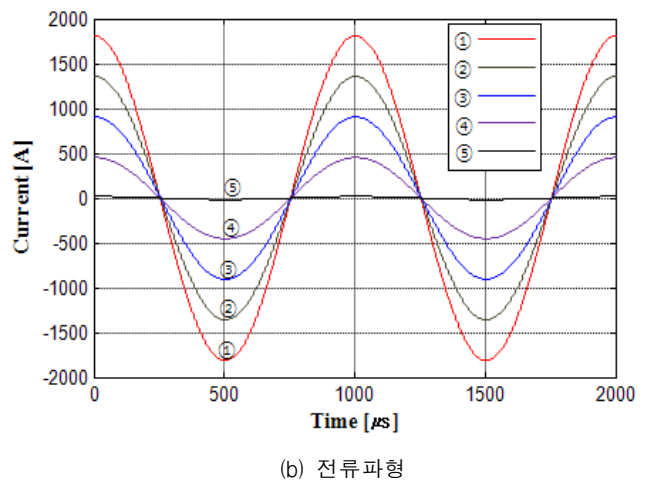
인가전압을 고정시켜 접지전극의 각 위치에서 나타나는 전위 및 전류 특성을 확인하기 위하여 10 kVp의 교류 전압을 인가하였고, 비유전율은 토양의 경우 비유전율 범위의 중간값인 40으로 고정시켰으며 단일 대지구조로 가정하였다.

길이 48 m인 수직 접지전극의 위치별 전위·전류에 대한 모의결과는 그림 4와 같이 나타났다. 그림 4(a)와 (b)에 나타난 바와 같이 1 kHz의 주파수 영역에서는 모든 위치에서 전위가 동일한 크기와 위상을 보였으며, 각 위치에서 전류가 유출되는 비율이 모두 동일하였다.

길이 48 m인 수직 접지전극에 대한 동일한 회로모델에서 인가주파수를 1 MHz로 하였을 때 산출된 파형을 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a), (b)와 같이 1 MHz의 주파수에서는 인가지점 ①에서 끝단 ⑤로 갈수록 전위의 위상이 점점 더 늦어졌고 그 크기는 감소하였다. 또한 인가지점 부근에서 유출되는 전류의 비중이 크게 나타났으며, 각 지점의 전위에 대하여 위상이 늦은 지상전류가 흐르는 것을 알 수 있다.



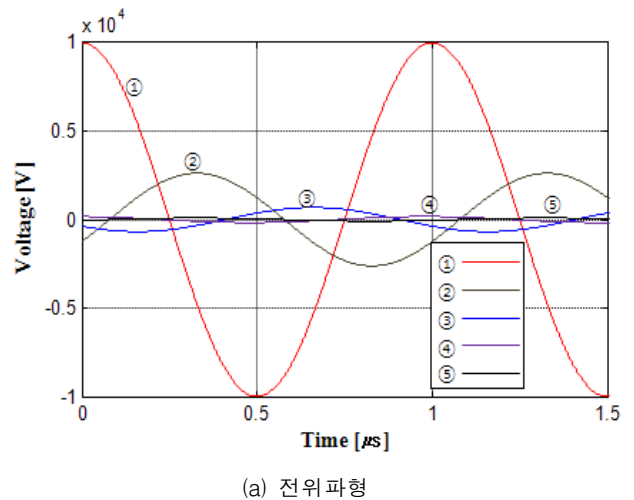
(a) 전위파형



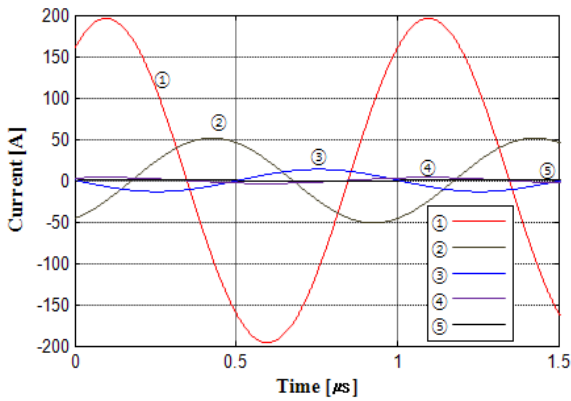
(b) 전류파형

그림 4 1 kHz에서 길이 48 m인 수직 접지전극의 위치별 전위·전류에 대한 모의결과

Fig. 4 The simulated results of the potentials and currents for each position of the 48 m vertical grounding electrodes at 1 kHz



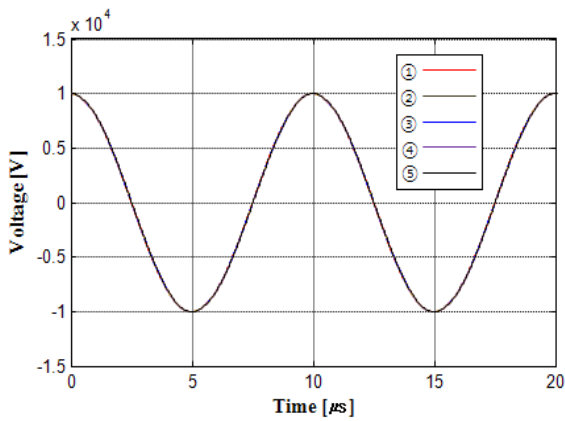
(a) 전위파형



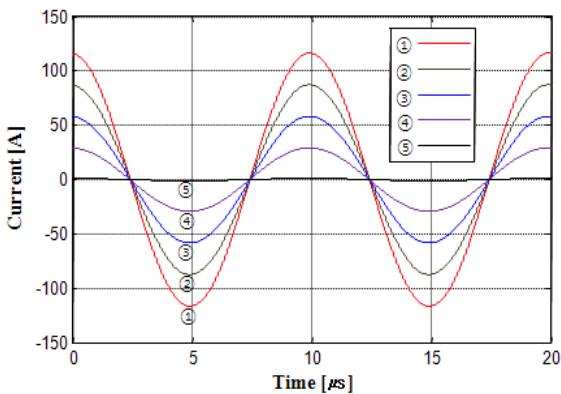
(b) 전류파형

그림 5 1 MHz에 대한 길이 48 m인 수직 접지전극의 위치별 전위·전류 모의결과

Fig. 5 The simulated results of the potentials and currents for each positions of the 48 m vertical grounding electrodes at 1 MHz



(a) 전위파형



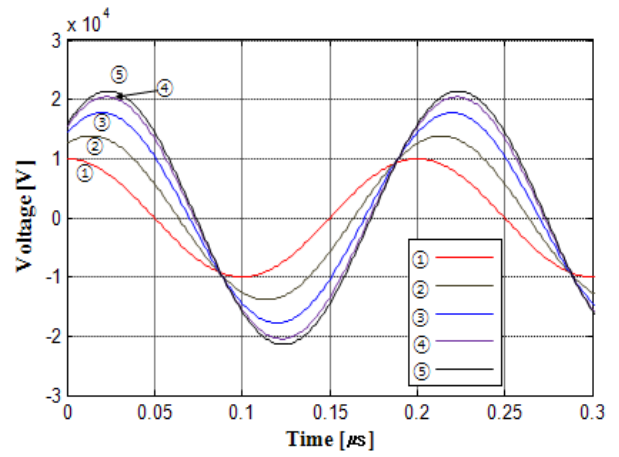
(b) 전류파형

그림 6 100 kHz에서 길이 1.8 m인 수직 접지전극의 위치별 전위·전류에 대한 모의결과

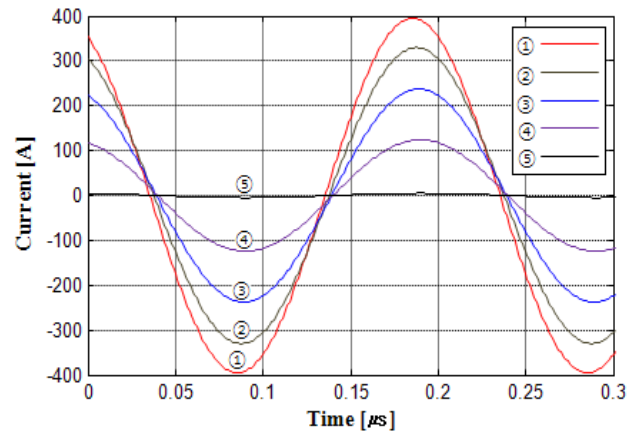
Fig. 6 The simulated results of the potentials and currents for each positions of the 1.8 m vertical grounding electrodes at 100 kHz

길이 1.8 m인 수직 접지전극의 위치별 전위·전류에 대한 모의결과를 그림 6에 나타내었다. 길이 48 m인 수직 접지전극에서와 마찬가지로 그림 6 (a), (b)에 나타난 바와 같이 100 kHz의 주파수 영역에서는 모든 위치에서 전위가 동일한 크기와 위상을 보였으며, 각 위치에서 전류가 유출되는 비율이 모두 동일하였다.

길이 48 m인 수직 접지전극과 달리 길이 1.8 m인 수직 접지전극에서는 그림 7(a), (b)와 같이 5 MHz 주파수의 인가 시 인가지점 ①에서 끝단 ⑤로 갈수록 전위의 크기가 증가하였다. 또한 접지전극 끝단 부근에서 유출되는 전류의 비중이 크게 나타났으며, 각 지점에서 전위와 전류의 위상차에 의해 진상전류가 흐른 것을 확인하였다.



(a) 전위파형



(b) 전류파형

그림 7 5 MHz에서 길이 1.8 m인 수직 접지전극의 위치별 전위·전류에 대한 모의결과

Fig. 7 The simulated results of the potentials and currents for each positions of the 1.8 m vertical grounding electrodes at 5 MHz

2.4 모의계산결과에 대한 검토

앞에서 수직 접지전극의 주파수에 따른 접지임피던스의 모의를 통하여 접지전극의 길이에 따라 고주파수에서 상반

된 접지임피던스 특성을 확인하였다. EMTF를 이용하여 수직 접지전극의 위치별 전위·전류에 대한 모의를 통해 그 특성이 전위의 크기와 전위·전류의 위상차와 관련되어 상반된 결과를 나타나는 현상임을 알았다. 이러한 현상을 해석하기 위하여 그림 8과 같이 수직 접지전극의 등가회로도들 상용주파수와 고주파수로 나누어 나타내었다.

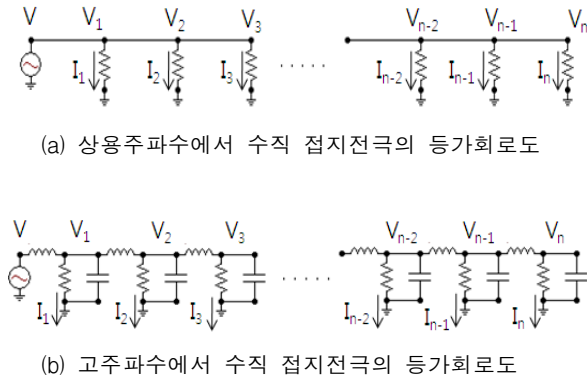


그림 8 주파수에 따른 수직 접지전극의 등가회로도
 Fig. 8 The equivalent circuit diagrams of the vertical grounding electrode as a function of frequency

수직 접지전극의 상용주파수에서의 등가회로는 누설컨덕턴스 G 에 비해 인덕턴스와 커패시턴스 L 과 C 의 영향이 비교적 적기 때문에, 그림 8(a)의 단순히 누설컨덕턴스 G 로 이루어진 병렬구조가 된다. 하지만 고주파수에서는 접지전극의 인덕턴스와 커패시턴스 L 과 C 의 영향을 무시할 수 없게 되므로 고주파수에서의 등가회로는 그림 8(b)와 같이 분포회로정수 G, L, C 로 이루어진다.

상용주파수에서는 수직 접지전극의 모든 위치에서 전위가 동일하여 $V = V_1 = V_2 = \dots = V_{n-1} = V_n$ 이므로 모든 위치에서 대지로 나가는 전류가 동일하다. 따라서 수직 접지전극에 인가되는 총 전류 I 는 식 (10)과 같다.

$$I = \sum_{k=1}^n I_k = nI_1 \quad (10)$$

하지만, 고주파수에서는 인덕턴스와 커패시턴스 L 과 C 의 영향으로 인해 접지전극의 각 위치별 전압이 동일하지 않게 된다. 길이 1.8 m인 접지전극의 경우에는 고주파수의 전류가 인가될 때 접지전극의 인가지점에서 끝단으로 갈수록 전위가 상승하고, 이 전위상승에 의해 끝단으로 갈수록 대지로 방출되는 전류가 증가한다. 따라서 총 전류 I 는 식 (11)과 같다.

$$I = \sum_{k=1}^n I_k > nI_1 \quad (11)$$

총 전류 I 가 저주파수일 때에 비해 증가하기 때문에 접지

임피던스($Z=V/I$)는 감소하게 된다.

반대로 길이 48 m인 수직 접지전극의 경우에는 고주파수의 전류가 인가될 때 접지전극의 끝단으로 갈수록 전위가 감소하고 이 전위감소에 의해 끝단으로 갈수록 대지로 방출되는 전류가 감소한다. 따라서 총 전류 I 는 식 (12)과 같다.

$$I = \sum_{k=1}^n I_k < nI_1 \quad (12)$$

총 전류 I 가 저주파수일 때에 비해 감소하기 때문에 접지 임피던스($Z=V/I$)는 증가하게 된다. 이러한 두 접지전극의 주파수 의존성의 차이는 접지전극의 길이에 의한 분포회로정수 L 과 C, G 의 차이에 의한 것으로 판단된다. 식 (2)~(4)에서 알 수 있듯이, 접지전극 길이가 짧아지면 L 은 감소하고 C 와 G 는 증가하게 된다. 모의에 적용된 두 접지전극의 실제 G, C, L 값도 표 1에서와 같이 직경에 의한 영향보다는 길이에 의한 영향이 크게 작용하여 접지전극의 길이가 감소한 효과와 동일하게 L 이 감소하고 C 와 G 가 증가하였다. 이 분포회로정수의 변화에 의해 길이 48 m인 접지전극보다 길이 1.8 m인 접지전극에 C 의 영향이 더 증가하게 되어, 접지전극 끝단에서 송전선로의 페란티효과와 같은 현상이 발생하는 것으로 판단된다.

모의 결과, 접지전극 끝단으로 갈수록 전류의 위상이 전위의 위상보다 점점 더 앞서가는 결과를 보였고, 이 앞선 전류에 의해 끝단의 전압이 상승하는 것으로 판단된다. 반대로 길이 48 m인 수직 접지전극은 상대적으로 인덕턴스 L 의 영향이 강하게 되므로 수직 접지전극의 L 에 의한 유도전류에 의해 끝단으로 갈수록 전압이 감소하는 것으로 판단된다. 이에 따라 고주파수에서 끝단으로 갈수록 전압이 상승하는 1.8 m 수직 접지전극은 총 전류가 증가하여 임피던스가 감소하고, 전압이 감소하는 48 m 수직 접지전극은 총 전류가 감소하여 임피던스가 증가하는 상반된 경향을 보여주는 현상을 규명하였다.

3. 결 론

수직 접지전극의 길이에 따른 접지임피던스의 주파수의존성을 이론적으로 분석하기 위해 분포정수회로모델을 제안하였다. 길이 1.8 m와 48 m인 수직 접지전극은 각 접지전극의 접지임피던스의 주파수의존성은 용량성과 유도성 특성을 보였으며, 모의결과 접지전극의 각 위치에서 전위분포의 차이 때문에 접지전극에서 방출되는 총 전류가 달라져 접지임피던스가 유도성과 용량성으로 나뉘는 것으로 나타났다. 이러한 전위분포의 차이는 접지전극의 길이에 의한 분포회로정수의 변화 때문에 나타났다. 길이 1.8 m인 수직 접지전극은 상대적으로 커패시턴스 C 의 영향이 커 전위가 상승하고, 길이 48 m인 수직 접지전극은 반대로 L 의 영향이 커 전위가 감소하는 것으로 판단된다. 이러한 수직 접지전극의 길이에 따른 접지임피던스의 주파수의존성 차이를 이용하여 접지시스템을 설계할 때 서로 반대의 특성을 보이는 수직 접지전극을 혼합적으로 적용하면 너저지전류에 대한 접지임피던스를 저감시키는 효과를 얻을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 한국전기안전공사(과제번호:R-2007-1-014) 주관으로 수행된 과제에 의해 작성되었습니다.

참 고 문 헌

[1] S. Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", IEEE Trans. Power Del., vol. 22. no. 1, pp.381~386, 2007.

[2] H. Griffiths, A. M. Davies, "Effective Length of earth electrodes under high frequency and transient conditions", Proc. 25th International Conference on Lightning Protection(ICLP), pp.469~471, 2000.

[3] 조정현, 이복희, "임펄스 전류에 의한 매설지선의 과도 임피던스특성에 대한 모의해석", 전기학회 논문지, vol.58, no. 10, pp.1861~1868, 2009.

[4] L. Grcev and M. Popov, "On High-Frequency Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod", IEEE Trans. Power Del., Vol. 20. No. 2, pp.1598~1603, 2005.

[5] R. Velazquez and D. Mukhedkar,, "Analytical modeling of grounding electrodes transient behavior", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-103, no. 6, pp.1314~1322, 1984.

[6] M. I. Lorentzou, N. D. Hatziargyriou, and B. C. Papadias, "Time domain analysis of grounding electrodes impulse response", IEEE Trans. Power Del., vol.18, no. 2, pp.517~524, 2003.

[7] S. Devgan and E. R. Whitehead, "Analytical models for distributed grounding systems", IEEE Trans. Power App. Syst., vol.PAS-92, no. 5, pp.1763~1770, 1973.

[8] M. I. Lorentzou, N. D. Hatziargriou, "Transmission Line Modeling of Grounding Electrodes and Calculation of their Effective Length under Impulse Excitation", Proc. International Conference on Power Systems Transients, paper no. IPST05-239, 2005.

[9] P. Llovera, J. A. Lliso, A. Quijano, V. Fuster, "High frequency measurements of grounding impedance on resistive soils", Proc. 28th ICLP, vol. 1, pp.727~729, 2006.

[10] 이복희, "전력시스템공학", 인하대학교 출판부, pp.137~143, 2007.

[11] M. E. Almeida and M. T. Correia de Barros "Fundamental considerations on long ground electrodes design", Proc. 13th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.241~244, 2003.

[12] Bok-Hee Lee, Jeong-Hyun Joe and Jong-Hyuk Choi, "Simulation of Frequency-dependent Impedance of Ground Rods Considering Multi-layered Soil Structures", Journal of Electrical Engineering & Technology, vol.4, nNo.4, pp.531~537, 2009.

[13] 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.

저 자 소 개



이복희 (李福熙)

1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수. 한국조명전기설비학회 회장
Tel : (032) 860-7398
Fax : (032) 863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr



김종호 (金鍾昊)

1981년 9월 8일생. 2007년 2월 인하대 공대 전자공학과 졸업(학사). 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사
Tel : (032) 860-7398
Fax : (032) 863-5822
E-mail : alchemic98@naver.com



최종혁 (崔鍾赫)

1980년 5월 12일생. 2006년 2월 인하대 공대 전자공학과 졸업(학사). 2008년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정
Tel : (032) 860-7398
Fax : (032) 863-5822
E-mail : chjohe80@naver.com