

뇌격전류에 의한 수평접지극의 전위상승 계산

(Calculation of Electric Potential Rise of Horizontal Grounding Electrode Caused by Lightning Stroke Currents)

이복희* · 조성철**

(Bok-Hee Lee · Sung-Chul Cho)

Abstract

An electric potential rise of the grounding electrode developed by the lightning stroke currents should be calculated for the purpose of effective protection of electrical and electronic equipment. In this paper, the electromagnetic model was applied to calculate the harmonic impedance of grounding electrode. Also the empirical equation related to the permittivity and resistivity of soil was used. The lightning current waveforms, which are expressed by the Heidler's equation, were used in order to calculate accurately transient electric potential rises. The transient voltage was obtained by using the simulated harmonic impedance and the lightning current in frequency domain. Finally, the transient voltages of horizontal grounding electrode(10m) under lightning stroke currents were calculated by IFFT(Inverse Fast Fourier Transform).

Key Words : Electric Potential Rise, Harmonic Grounding Impedance, Heidler's Equation, Pocklington's equation

1. 서 론

뇌격전류가 접지시스템으로 들어왔을 때 뇌격전류의 전류파형에 따라 접지극의 전위가 다르게 나타난

다. 정극성 최초뇌격전류인 경우 최대 200kA의 큰 전류가 들어오는데[1], 이 뇌격전류는 접지시스템 근처에 위치한 신호선이나 통신선에 매우 큰 전위상승을 발생시킬 수 있다. 이와 같은 과도 전압은 종종 오동작 신호를 발생시키는 이유가 되며, 심지어 중요한 전자장비를 파괴시킬 수도 있다.

전자장비의 회로를 보호하기 위한 기준을 결정하기 위해서 뇌방호 및 EMC 분야에서 접지극에서 발생되는 가장 높은 전위상승에 대한 정보가 필요하다. 상용 주파수에서 접지시스템을 등전위로 가정 할 때 전위는 한 개의 값으로 나타낸다. 하지만 낙뢰나 스위칭 서지와 같은 경우, 임피던스에 의한 과도 전압으로 나

* 주저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수
** 교신저자 : 기초전력연구원 선임연구원
* Main author : School of Electrical Engineering, Inha University, Professor
** Corresponding author : Korea Electrical Engineering & Science Research Institute
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-860-5822
E-mail : canfeel@snu.ac.kr
접수일자 : 2013년 9월 9일
1차심사 : 2013년 9월 12일, 2차심사 : 2013년 10월 8일
심사완료 : 2013년 10월 19일

타난다.

과도전위를 분석하기 위한 시뮬레이션 방법으로는 크게 전송선로 모델[2-3]과 전자계 모델[4-5]이 있다. 전자계 모델이 최소의 가정으로 이루어진 가장 정확한 방법으로 알려져 있다. 토양에 전계가 인가되었을 때 주파수에 따른 분극현상이 토양의 유전율과 도전율에 영향을 주기 때문에 보다 정확한 분석을 위해서는 토양 파라미터의 주파수 의존성이 반영되어야 한다[5]. 하지만 전자계 모델을 이용한 대표적인 상용프로그램으로 CDEGS(Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis)가 있지만, 프로그램의 소스를 직접 수정하는 것이 불가능하다. 따라서 토양 파라미터의 주파수 의존성에 대한 특성을 해석하기 위해서 토양의 유전율과 도전율을 변수로 적용할 수 있는 프로그램이 필요하다. 본 연구에서 사용된 프로그램은 전자계 모델을 이용하여 접지극에서의 전류분포와 접지 임피던스를 MATLAB으로 제작된 것으로 [6]과 [7]을 통해서 프로그램의 신뢰성이 확인되었다.

접지극의 주파수에 따른 임피던스를 알고 있다고 하더라도 뇌격전류에 의한 접지극의 전위상승을 알 수 없다. 따라서 효과적인 피뢰대책을 위해서 뇌격전류에 대한 전위상승의 영향이 평가되어야 한다. 이를 위해서 제작된 프로그램에 뇌격전류에 의한 접지극의 전위상승을 계산하는 방법을 추가하였다.

본 연구에서는 피뢰시스템의 접지시스템에서 나타날 수 있는 뇌격전류에 의해 상승하는 접지극의 과도전압을 구하기 위해서 토양의 주파수 의존성에 관련된 실험식과 뇌격전류에 대한 하이들러식(Heidler's equation)을 적용하였다. 상용주파수에서 토양의 저항률이 $10\Omega \cdot m$ 인 대지에 깊이 0.5m에 매설된 길이 10m의 수평접지극에 최초뇌격전류와 후속뇌격전류가 인가된 경우 접지극 전위상승을 계산하고 검토하였다.

2. 이론

2.1 토양의 주파수 의존성

맥스웰의 전자방정식에서 유도된 포클링턴 방정식

은 식 (1)과 같다[9].

$$E_z^i = \frac{j}{\omega \epsilon_{eff}} \int_{-L/2}^{L/2} I_z(z') \left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right] \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dz' \quad (1)$$

여기에서 $r = \sqrt{(z-z')^2 + a^2}$ 이다. ϵ_{eff} 는 토양의 유전율 특성이 결정되는 유효 유전율이라 하며, $\epsilon_0 \epsilon_r - j\sigma/\omega$ 와 같이 표현된다. 유효유전율 식에서 비유전율과 도전율은 일정한 상수임을 알 수 있다. CDEGS 프로그램은 위 수식과 같이 계산되기 때문에 비유전율과 도전율이 상수로만 적용된다. 유효유전율만으로는 토양의 주파수 의존성을 정확히 해석하는 것은 한계가 있다. 토양의 주파수 의존성에 대한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 실험 결과를 통해서 유전율과 저항률에 대한 주파수 의존성을 나타내는 실험식을 인용하였다[5]. 유전율과 저항률에 대한 식은 다음과 같다.

$$\rho_r = \left\{ 1 + \left[1.2 \times 10^{-6} \rho_0^{0.73} \right] \left[(f-100)^{0.65} \right] \right\}^{-1} \quad (2)$$

$$\epsilon_r = 7.6 \times 10^3 f^{-0.4} + 1.3 \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)에서와 같이 유전율과 저항률이 주파수의 함수임을 확인할 수 있다. 유전율과 저항률이 주파수의 함수로 표현이 되는 이유는 그림 1과 같이 인가된 전계의 주파수에 따라 토양 내부에서 분극 현상이 발생하기 때문이다.

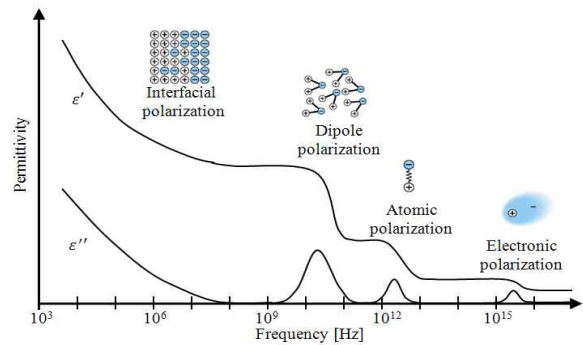


그림 1. 유전율의 주파수 의존성에 대한 분극 메커니즘
Fig. 1. Polarization mechanisms related to the frequency dependence of the relative permittivity

2.2 임피던스의 계산

모멘트법(Method of Moment)을 적용하였을 때 식 (1)의 포클링턴 방정식은 식 (4)와 같이 표현된다[10].

$$\sum_{i=1}^n [Z]_{ji} [I]_i = [V]_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

여기에서 n 은 도체 세그먼트의 전체 수이며, $[Z]_{ji}$ 는 i 번째 세그먼트에 있는 소스에 의한 j 번째 세그먼트의 관측점에서 상호임피던스(mutual impedance) 매트릭스를 나타낸다. 상호임피던스는 오직 접지극의 형상, 주파수 그리고 토양의 특성에 의존하는 값이다.

접지극 전체의 전류분포가 결정되면 접지극의 전위는 다음의 식으로 계산된다.

$$V^s(z) = -\frac{1}{j4\pi w \epsilon} \int_0^L \frac{\partial I(z')}{\partial z'} g(z, z') dz' \quad (5)$$

이 때 기저함수와 가중함수를 삼각형함수(triangular function)로 사용했으며[5], 식 (5)에서 전류분포의 미분항은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial I(x')}{\partial x'} = I_i \frac{\partial f_i}{\partial x'} + I_{i+1} \frac{\partial f_{i+1}}{\partial x'} = \frac{I_{i+1} - I_i}{\Delta x} \quad (6)$$

따라서 식 (5)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V^s(z) = -\frac{1}{j4\pi w \epsilon} \sum_{i=1}^M \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{I_{i+1} - I_i}{\Delta z} g(z, z') dz' \quad (7)$$

인가전류가 1A인 경우 식 (7)에서 첫 번째 세그먼트의 중앙에서 전위를 계산하게 되면, 그 전위는 접지극의 입력임피던스가 된다.

2.3 과도전위상승의 계산방법

과도전위상승을 계산하기 위해서는 계산된 접지임피던스와 뇌격전류를 서로 곱해야 한다. 계산된 접지임피던스는 주파수 영역의 결과이기 때문에 시간영역의 뇌격전류를 주파수영역으로 변환시켜줘야 한다.

식 (8)과 같이 시간영역의 뇌격전류에 대해서 FFT(Fast Fourier Transform)를 하고 접지임피던스와 곱하게 되면 주파수 영역에서의 전위 상승을 구할 수 있다[4].

$$V(f) = Z(f) \times I(f) = Z(f) \times FFT[i(t)] \quad (8)$$

식 (8)을 통해 얻은 전위는 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 통해서 시간영역에서의 전위를 구할 수 있다.

$$v(t) = IFFT\{Z(f) \times FFT[i(t)]\} \quad (9)$$

식 (9)의 전압은 뇌격전류의 파형에 따른 접지시스템에서 발생하는 과도전위가 된다. 이 때 사용된 뇌격전류는 IEC 62305-1에서 제안된 최초 뇌격전류와 후속 뇌격전류파형을 이용하였으며, 관련 수식은 식 (10)의 하이들러식을 이용하였다.

$$i(t) = \frac{I_0}{k} \times \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1 + (t/\tau_1)^{10}} \times \exp(-t/\tau_2) \quad (10)$$

여기에서 I_0 는 피크 전류, k 는 피크전류에 대한 교정계수, τ_1 과 τ_2 는 파두시간과 파미시간에 대한 정수를 각각 나타낸다. 각 파라미터값은 IEC 62305-1에 기술된 값을 적용하였다. 다른 문헌에서는 뇌격전류파형을 지수함수 형태의 식 (11)을 이용하여 계산하였다[11].

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (11)$$

식 (11)의 경우 뇌격전류 파형과 유사한 α, β 값을 찾는데 매우 오랜 시간이 소요되며, 뇌격전류와 정확히 일치시키는 것이 불가능한 단점이 있다.

3. 결과 및 검토

시뮬레이션 조건으로 0.5m 깊이에 매설되어 있는 반지름 5mm, 길이 10m 수평접지극을 가정하였으며, 상용주파수에서 대지저항률은 $10\Omega \cdot m$ 으로 하였다. 뇌

격전류에 의한 접지극의 전위상승에 대한 실험은 거의 불가능하기 때문에 접지극의 접지임피던스를 측정하여 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 검증하는 방법을 선택하였으며, 실험에 사용된 10, 30, 50m 수평접지극 중에서 본 연구에서는 10m 접지극을 선택하였다[7]. 뇌격전류는 정·부극성의 최초 뇌격전류와 후속 뇌격전류인 $10/350\mu s$, $1.2/100\mu s$ 그리고 $0.25/100\mu s$ 를 대상으로 하였다. 각각의 뇌격전류에 대한 크기 밀도를 그림 2에 나타내었다.

그림 2의 결과는 IEC 62305-1[1]의 결과와 동일하였으며, 이를 통하여 제작된 접지해석 프로그램의 FFT 계산 방법에 대한 신뢰성이 확인되었다. 가장 넓은 주파수 범위를 갖는 $0.25/100\mu s$ 전류파형에 의해서 뇌격전류의 전자계펄스 영향에 대한 관련 주파수 범위는 약 500Hz~3MHz가 된다. 따라서 뇌격전류에 대한 성능을 충분히 분석하기 위해서는 약 10MHz 주파수 성분까지 고려하는 것이 바람직하다.

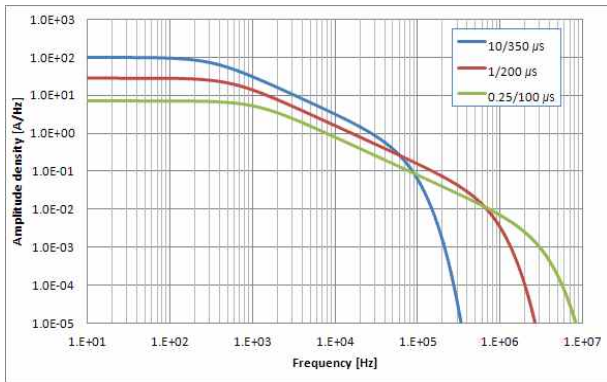


그림 2. 뇌격전류 크기의 밀도
Fig. 2. Amplitude density of lightning stroke currents

식 (6)에 따라 주파수 영역에서의 전위를 산출하기 위해서 주파수 영역의 뇌격전류와 접지임피던스를 곱한다. 상용주파수에서 대지저항률이 $10\Omega \cdot m$ 인 토양에서 접지극의 임피던스를 계산한 이후 주파수 영역에서의 뇌격전류와 전위파형을 그림 3에 함께 나타내었다. 이 때 시뮬레이션에 사용된 샘플링 수는 8192개이며, 최대주파수 F_{max} 는 10MHz 이다. 샘플링 수가 작거나 최대주파수가 작아지게 되면 FFT 결과를 신

뢰할 수가 없기 때문에 샘플링수와 최대주파수를 자체적으로 선정하였다[4].

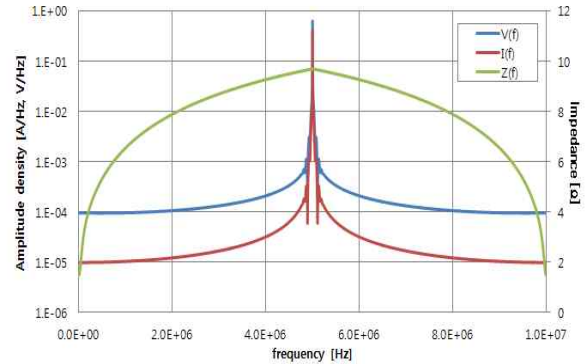


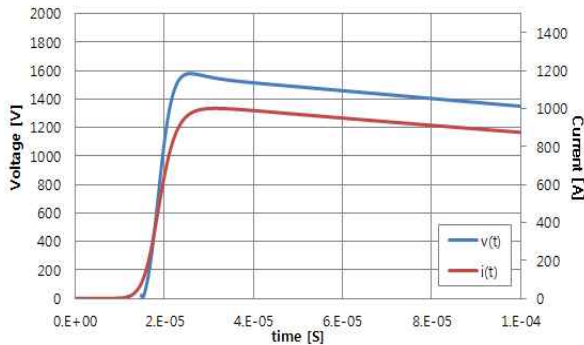
그림 3. 접지임피던스, 뇌격전류, 전압의 크기 밀도
Fig. 3. Amplitude density of ground impedance, lightning current and voltage

그림 2의 x 축을 대수눈금으로 나타내었지만, 그림 3의 x 축은 평등눈금으로 나타내었다. FFT 결과는 $F_{max}/2$ 를 기준으로 대칭으로 나타나기 때문에 적절한 그래프를 위해서 x 축을 평등눈금으로 나타내었다. 접지임피던스, 뇌격전류 그리고 전압의 크기 밀도가 $F_{max}/2$ 인 5MHz에서 대칭으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 접지임피던스가 선형적인 특성을 보이기 때문에 전압의 크기 밀도 역시 전류 크기 밀도와 비례하여 유사한 형태를 나타냈다. 뇌격전류의 파형에 따른 수평 접지극에서의 과도전위상승을 각각 계산하여 그림 4에 나타내었다.

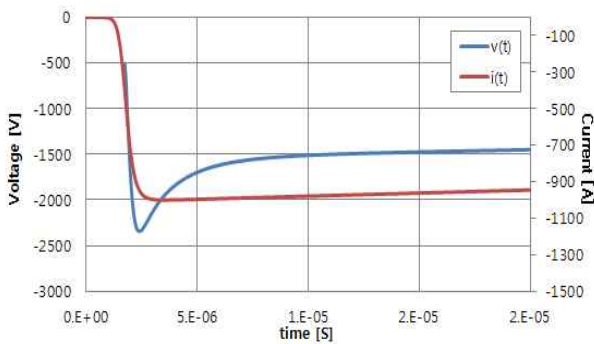
낙뢰의 전형적인 양상을 나타내는 3가지 뇌격전류의 크기를 1kA로 정하여 시뮬레이션 하였다. 실제 뇌격전류의 크기에 대한 과도전위상승은 해당 뇌격전류의 크기에 비례적으로 산출할 수 있다. 3가지 뇌격전류의 경우 샘플링 수는 8192개로 일정하게 하였으며, 최대 주파수는 해당 뇌격전류의 주파수 범위와 초기 상승부의 높은 주파수 성분을 고려하여 10MHz, 20MHz 그리고 40MHz로 각각 선정하였다[4].

시뮬레이션 결과, 뇌격전류 파형에 따른 과도전위상승이 각각 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 상승시간이 상대적으로 느린 정극성 최초 뇌격전류인 $10/350\mu s$ 인

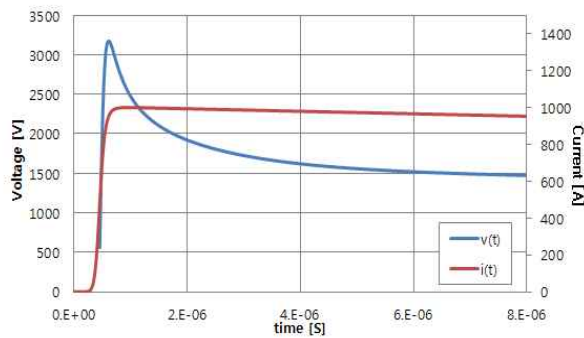
경우 1kA의 뇌격전류에 대해서 과도전위상승이 약 1.6kV, 상승시간이 빠른 후속 뇌격전류인 0.25/100 μ s인 경우 3kV가 넘게 나타났다. 또한 부극성 최초 뇌격전류인 1/200 μ s인 경우 1kA의 뇌격전류에 대해서 과도전위상승은 약 -2.3kV가 나타났다.



(a) 10/350 μ s



(b) 1/200 μ s



(c) 0.25/100 μ s

그림 4. 뇌격전류에 의한 과도전위상승
Fig. 4. Transient electric potential rises developed by lightning stroke currents

4. 결 론

본 논문에서는 제작한 접지해석 프로그램을 이용하여 뇌격전류에 대한 수평접지극의 과도전위상승을 계산하였다. 토양 파라미터의 주파수 의존성을 고려한 접지임피던스를 계산하기 위해서 토양 파라미터에 관련된 인용된 실험식을 적용하였다. 주파수 영역에서 접지극시스템의 과도전위상승을 구하기 위해서 하이들러식의 뇌격전류를 FFT하고, 시뮬레이션 결과로 얻어진 접지임피던스를 서로 곱하였다. 마지막으로 시간영역에서의 과도전위상승을 구하기 위해서 IFFT를 하여 최초 뇌격전류와 후속 뇌격전류에 대한 과도전위상승을 각각 계산하였다. FFT와 IFFT에서의 오차를 줄이기 위해서 샘플링수를 선택하였으며, 최대 주파수를 뇌격전류에 따라 각각 다르게 적용하여 시뮬레이션하였다.

본 연구의 결과는 뇌격전류를 지수함수 형태의 수식으로 사용한 다른 문헌보다 IEC 표준에 기술된 정확한 뇌격전류 수식으로 과도전위상승을 구할 수 있는 방법을 제시하였다. 따라서 실제의 피뢰시스템의 설계를 KS C IEC표준에 따라 편리하게 설계/시공하는데 활용될 것으로 기대된다.

References

- [1] IEC 62305-1, "Protection against lightning - Part 1: General principles", IEC/TC 81, 2010.
- [2] L. Yaqing, M. Zitnik, R. Thottappillil, "An improved transmission line model of grounding system", IEEE Trans. EMC, Vol.43, No.3, pp.348~355, 2001.
- [3] J. H. Choi, B. H. Lee, S. K. Paek, "Frequency-dependent grounding impedance of the counterpoise based on the dispersed currents", JEET, Vol.7, No.4, pp.589~595, 2012.
- [4] L. Greev, F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.5, No.4, pp.1773~1781, 1990.
- [5] D. Poljak, V. Roje, "The integral equation method for ground wire input impedance", Integral methods in science and engineering, Vol. 1, U.K., pp.139~143, 1997.
- [6] S. C. Cho, B. H. Lee, "Numerical Calculation of Longitudinal Current Distribution in Grounding Electrode for Analyzing the Grounding Impedance", J. KIIEE, Vol.27, No.1, pp.46~52, 2013.
- [7] C. H. Ahn, S. C. Cho, B. H. Lee, "Numerical calculation for frequency-dependent grounding impedance of

horizontal ground electrodes”, Asia-Pacific International Conference on Lightning, 2013.

- [8] S. Visacro, R. Alipio, “Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes”, IEEE Trans. Power Del., Vol. 27, No.2, pp.927-935, 2012.
- [9] W. C. Gibson, “The method of moments in electromagnetics”, Chapman & Hall/CRC, pp.33~79, 2008.
- [10] R. F. Harrington, “Field computation by moment methods”, Macmillan, New York. pp.1~21, 1968.
- [11] V. Doric, D. Poljak, V. Roje, “Transient analysis of the grounding electrode based on the wire antenna theory”, Engineering analysis with boundary elements 2004;28:801-807.

◇ 저자소개 ◇



이복희 (李福熙)

1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업.
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
1988~1989년 동경대학 생산기술연구소
객원연구원. 1995년 호주 Queensland
대학 방문교수, 1999년 Cincinnati대학
방문교수. 현재 인하대 IT공대 전기공학부
교수. 본 학회 명예회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



조성철 (趙成哲)

1977년 12월 16일생. 2003년 2월 인하대
공대 전기공학과 졸업. 2005년 2월 동
대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동
대학원 박사과정. 기초전력연구원 전력
시험설비센터 선임 연구원.

Tel : (02)885-9443

Fax : (02)883-0827

E-mail : canfeel@snu.ac.kr