

# EDSA 프로그램을 이용한 배전계통에 사용되는 동봉 접지전극의 과도 접지임피던스 특성

(Transient Grounding Impedance Characteristics of a Copper Rod-type Grounding Electrode used for Electric Distribution Systems Using EDSA Program)

김경철\* · 오경훈 · 김민성 · 최종기 · 김동명

(Kyung-Chul Kim · Kyung-Hoon Oh · Min-Sung Kim · Jong-Kee Choi · Dong-Myung Kim)

## 요 약

접지시스템은 전기설비의 기준 전위점을 확보할 뿐만 아니라 대지에 낮은 저항으로 고장전류나 과도전류를 흐르게 한다. 주파수에 대한 함수로 접지 임피던스는 고장이나 과도전류가 넓은 범위의 주파수 성분을 포함하기 때문에 접지성능을 평가하는데 필요하다. 동봉은 배전계통에서 가장 많이 쓰이는 접지전극이다. 본 논문에서는 동봉의 접지 임피던스를 주파수 60[Hz] 에서 100[kHz] 범위까지 측정하여 등가 접지임피던스 모델을 구하였다. 뇌격서지가 유입되었을 때 EDSA 프로그램으로 과도접지임피던스의 수치와 파형을 시뮬레이션 하였다.

## Abstract

Grounding insures a reference potential point for electric devices and also provides a low resistance path for fault or transient currents in the earth. The ground impedance as a function of frequency is necessary for determining its performance since fault or transient currents could contain a wide range of frequencies. A copper rod electrode is the most commonly used grounding electrode in electric distribution systems. In this paper, the grounding impedance of copper rods has been measured in frequency ranging from 60[Hz] up to 100 [kHz] and an equivalent model of the grounding impedance is identified from the measured values. The grounding impedance under study when a typical lightning surge is injected into the grounding system was simulated numerically and graphically through the use of the EDSA software program.

Key Words : Copper Rod, Transient Grounding Impedance, Lightning Surge, Frequency Characteristics, Conventional Grounding Impedance

## 1. 서 론

\* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수  
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605  
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr  
접수일자 : 2009년 2월 19일  
1차심사 : 2009년 2월 26일  
심사완료 : 2009년 6월 11일

접지는 전기설비의 기준 전위점을 확보하고 대지에 낮은 저항으로 고장전류를 흘려보내기 위해 쓰인다. 주파수 성분의 접지 임피던스는 고장전류 낙뢰,

개폐 임펄스 등에 대한 보호를 목적으로 하는 접지 시스템에 있어서 매우 중요한 요소이다.

본 논문에서는 배전계통에 많이 사용되고 있는 동봉 접지전극의 주파수 영역에서의 접지 임피던스를 실측을 통하여 구하였다. 시험장소의 대지 저항률은 Wenner 4 전극법으로 측정하고, 접지 구성은 시중에서 쉽게 구할 수 있는  $\Phi 14 \times L1000$ [mm] 동봉으로 하였다. 접지 임피던스는 주파수를 60[Hz]부터 100[kHz] 까지 변화시키면서 3점 전위강하법으로 전류와 전압을 측정하여 구하였다.

측정된 접지임피던스는 회로모델과 전달함수 모델로 하여 파라미터를 구하고, 실측한 접지임피던스와 비교하였다.

등가 모델에 접지임피던스 특성을 파악하기 위하여 뇌격서지를 가하여 규약 접지임피던스를 수치와 파형으로 시뮬레이션하여 결과를 비교, 검토하였다.

## 2. 접지임피던스 측정

### 2.1 시험장소의 대지저항률 측정

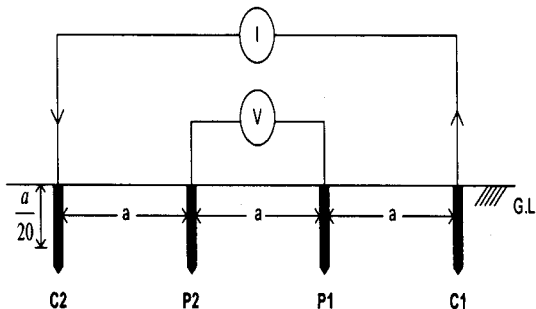


그림 1. Wenner 4 전극법  
Fig. 1. 4-point Wenner method

그림 1은 현장에서 가장 많이 쓰이고 있는 Wenner 4 전극법[1]으로 대지 고유저항률을 측정하는 회로이다. 전위전극(P1, P2), 전류전극(C1, C2)을 배치하고 각 전극간의 거리(a)가 등간격이 되도록 한다. 전극 간격을 0.5~30[m]까지 변화시키면서 측정한 결과는 그림 2에 간추려 놓았다. 측정 장비는 AVO사의 모델 MEGGER DET 2/2[2]이다.

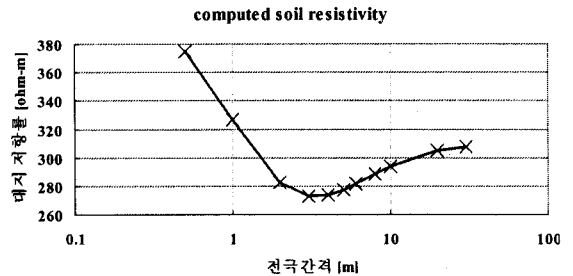


그림 2. 측정된 대지고유저항률  
Fig. 2. Measured soil resistivity

측정한 대지 고유 저항률을 토대로 접지해석 프로그램인 CDEGS(Current Distribution, Electromagnetic fields, Grounding and Soil Structure Analysis)[3]을 사용하여 curve fitting 하면 표 1과 같은 등가인 수평 2층 구조의 토양모델을 구할 수 있다.

표 1. 2층 구조 접지 토양모델 파라미터  
Table 1. Two-layer soil model parameter

|                 | 대지고유저항률 [ $\Omega \cdot m$ ] | 층 두께 [m] |
|-----------------|------------------------------|----------|
| 표토층( $\rho_1$ ) | 397.9                        | 0.44     |
| 심층( $\rho_2$ )  | 283.2                        | $\infty$ |

### 2.2 접지시스템 구성

그림 3은 시험부지에 동봉( $\Phi 14 \times L1000$ [mm])을 매설하여 구성한 접지시스템이다. 그림에서 S(series)는 직렬로 시공하는 접지봉을, P(Parallel)는 병렬로 시공하는 접지봉을 표기한 것이다. 매설지선에 사용된 전선은 GV케이블 22[mm]이다.

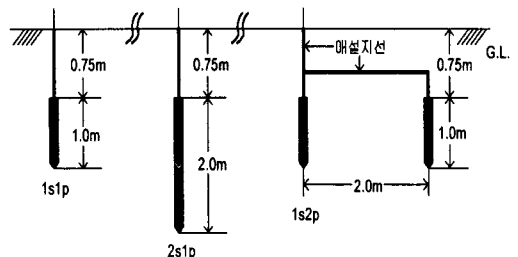


그림 3. 접지봉의 구성  
Fig. 3. Ground rods layout

### 2.3 접지임피던스 측정

그림 4는 전위강하법(3-point fall-of-potential method)으로 접지임피던스를 측정하기 위한 회로도이다.

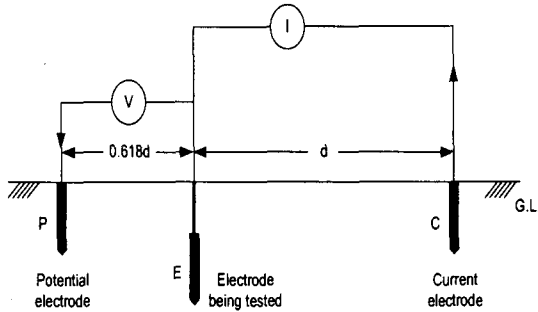


그림 4. 3점 전위강하법  
Fig. 4. 3-point fall-of-potential method

3점 전위강하법에서 측정하고자 하는 접지극과 전류보조극의 위치를  $d[m]$ 라고 할 때, 토양모델이 단일층 일 때는 전위 보조극의 위치는  $0.618d$ 이다. 토양모델이 수평 2층 구조일 때는 보정계수  $K$ 에 따라 전위보조극의 위치가 변하게 된다[4].

식 (1)에 시험부지의 토양모델을 적용하면,

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{283.2 - 397.9}{283.2 + 397.9} \approx -0.17 \quad (1)$$

$K=-0.17$ 일 때는 전위보조극의 위치  $x=0.6d$ 으로 하면 접지임피던스 측정이 정확하다고 볼 수 있다.

접지전극과 전류보조극 사이는  $200[m]$ , 접지전극과 전위보조극의 간격은  $120[m]$ 로 하여 접지임피던스를 측정하였다.

그림 5는 전위강하법으로 접지임피던스를 측정하기 위한 측정시스템의 외관도이다. 측정시스템의 구성요소는 신호발생기( $0\sim 900[kHz]$  정현파), 신호증폭기, 고역필터, 오실로스코프, 노트북으로 되어 있다.

접지임피던스 측정은 임의로 선택한 주파수 전류를 접지극으로 주입시키면서 접지 전위와 전류를 측정하여 접지임피던스를 계산하면 표 2와 같다.

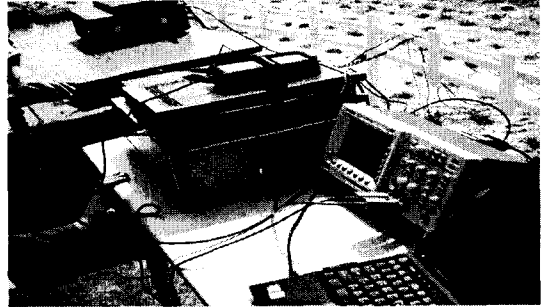


그림 5. 측정시스템 외관도  
Fig. 5. Outside view of the measuring system

표 2. 측정된 접지 임피던스  
Table 2. Measured ground impedance

| frequency [Hz] | 1S1P   |             | 2S1P   |             | 1S2P  |             |
|----------------|--------|-------------|--------|-------------|-------|-------------|
|                | Z[Ω]   | Phase [deg] | Z[Ω]   | Phase [deg] | Z[Ω]  | Phase [deg] |
| 60             | 212.59 | 5.5         | 148.24 | 2.6         | 42.18 | 0.8         |
| 180            | 199.86 | 0.6         | 151.58 | -2.2        | 39.77 | 1.5         |
| 300            | 195.83 | 0.8         | 145.34 | -1.2        | 40.38 | 1.6         |
| 420            | 195.17 | 1.7         | 145.07 | -0.2        | 41.48 | 1.7         |
| 540            | 195.73 | 2.7         | 145.07 | 0.7         | 41.54 | 2.9         |
| 900            | 195.79 | 5.0         | 161.94 | 3.6         | 42.79 | 3.1         |
| 1[K]           | 197.92 | 5.0         | 178.41 | 3.6         | 43.91 | 6.6         |
| 3[K]           | 225.33 | 10.5        | 161.94 | 8.9         | 48.49 | 10.1        |
| 5[K]           | 248.00 | 15.3        | 178.41 | 13.4        | 53.07 | 11.8        |
| 10[K]          | 269.31 | 28.1        | 186.85 | 24.3        | 53.81 | 14.5        |
| 30[K]          | 290.41 | 32.9        | 137.60 | 31.9        | 61.61 | 16.7        |
| 50[K]          | 294.24 | 35.4        | 207.20 | 32.8        | 70.42 | 18.1        |
| 100[K]         | 355.56 | 54.7        | 262.57 | 50.7        | 70.18 | 18.7        |

### 3. 접지임피던스 모델링

#### 3.1 회로 모델링

접지 임피던스는 토양의 특성, 대지 고유저항률, 온도, 습도, 접지체 모양과 접속 상태 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하므로 접지 임피던스를 모델링 하기는 쉽지 않다.

참고문헌[5]에서 제시한 저항  $R$ , 인덕턴스  $L$ , 캐패시턴스  $C$ 의 조합으로 그림 6과 같다.

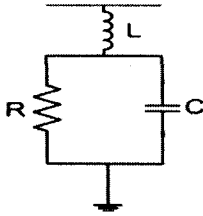


그림 6. 접지임피던스의 회로모델  
Fig. 6. Circuit model of the ground impedance

회로모델의 R, L, C를 구하는 방법은 일종의 시행착오법인 Pattern Search Method[6]을 이용한다. 그림 7과 같이 Pattern Search Method는 R, L과 C를 변화시키면서 실측된 접지임피던스 Z<sub>mea</sub> 값과 회로모델에서 계산된 접지임피던스 Z<sub>sim</sub>값의 차가 최소화 될 때까지 반복하여 구하면 된다.

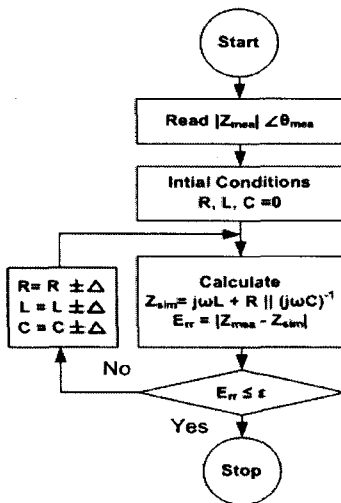


그림 7. PSM 순서도  
Fig. 7. Flowchart of the pattern search method

표 3은 Pattern Search Method으로 구한 R, L, C 값을 간추려 놓았다.

표 3. 계산된 회로모델의 파라미터  
Table 3. Calculated circuit model parameters

| 접지종류 | R[Ω]  | L[mH] | C[nF] |
|------|-------|-------|-------|
| 1S1P | 195.0 | 0.40  | 0.0   |
| 2S1P | 145.0 | 0.33  | 0.2   |
| 1S2P | 60.0  | 0.20  | 0.0   |

그림 8은 Pattern Search Method으로 구한 접지 임피던스(Z<sub>sim</sub>)와 측정된 접지 임피던스(Z<sub>mea</sub>)를 비교한 파형을 나타낸다. 그림에서 X축은 주파수 [Hz]이고, Y축은 Ohm과 Degree를 나타낸다.

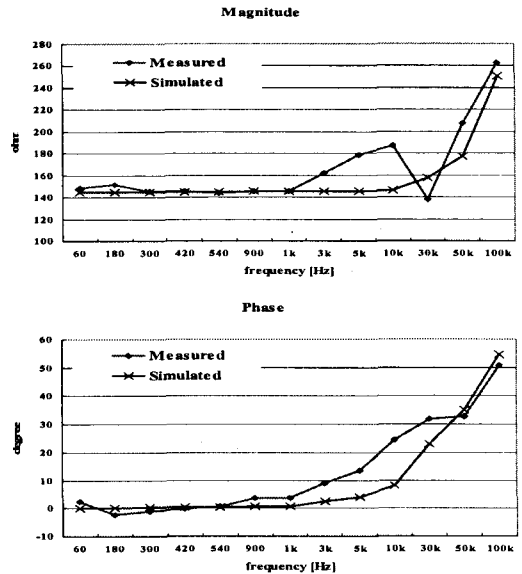


그림 8. 2S1P 동봉의 접지임피던스 비교(회로모델)  
Fig. 8. Ground impedance comparison for 2S1P copper rod(circuit model)

### 3.2 전달함수 모델링

식 (2)는 전달함수 H(z)를 z-domain에서 n차로 표현하고 있다.

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (2)$$

전달함수 계수인 ai's와 bi's는 MATLAB의 System Identification Toolbox[7]을 이용하여 구하기로 한다. ARMA(Auto Regressive Moving Average) method[8]은 N개의 데이터가 있을 때, N-n개의 방정식을 세우고 전달함수의 계수를 실측한 값과 계산된 값과의 오차가 최소화 될 때까지 반복해서 구하는 방법이다.

표 4는 ARMA method로 구한 전달함수를 간추려 놓았다.

EDSA 프로그램을 이용한 배전계통에 사용되는 동봉 접지전극의 과도 접지임피던스 특성

표 4. 계산된 전달함수 모델의 파라미터  
Table 4. Calculated transfer function model parameters

| 종류   | 전달함수  |
|------|---|
| 1S1P | $Z(s) = \frac{-1.937 \times 10^{-12}s^2 - 1.335 \times 10^{-5}s - 1}{4.965 \times 10^{-14}s^2 - 2.52 \times 10^{-6}s - 0.0047}$   |
| 2S1P | $Z(s) = \frac{-1.157 \times 10^{-13}s^2 - 4.7 \times 10^{-6}s - 1}{1.12 \times 10^{-14}s^2 - 7.48 \times 10^{-3}s - 0.00674}$   |
| 1S2P | $Z(s) = \frac{1.98 \times 10^{-18}s^3 + 3.289 \times 10^{-12}s^2 + 6.34 \times 10^{-6}s + 1}{1.36 \times 10^{-20}s^3 + 1.7 \times 10^{-14}s^2 + 5.92 \times 10^{-8}s + 0.0132}$ |

그림 9는 ARMA method로 구한 접지 임피던스 (Zsim)와 측정된 접지 임피던스(Zmea)를 비교한 파형을 나타낸다.

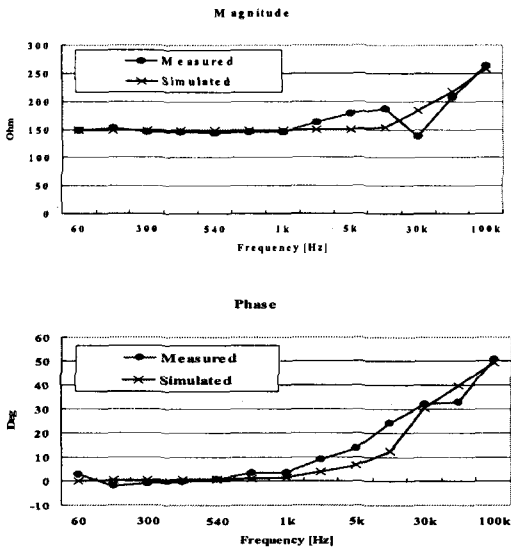


그림 9. 2S1P 동봉의 접지임피던스 비교(전달함수 모델)  
Fig. 9. Ground impedance comparison for 2S1P copper rod(transfer function model)

#### 4. 뇌격서지에 대한 과도접지임피던스 분석

낙뢰에 대한 전기설비의 보호에 있어서 접지시스템의 접지임피던스는 중요한 역할을 한다. 접지전극에 뇌격서지와 같이 급격하게 변화하는 서지가 유입되면 낮은 주파수의 전류가 흐를 때와는 다르게 짧은 시간 영역에서 높은 과도접지임피던스를 나타내

게 된다.

높은 주파수 영역의 접지임피던스 특성은 접지전극의 형상, 크기, 매설방법, 대지저항률, 유전율 등에 의하여 변화하며, 특히 접지에 사용되는 접지도체의 종류, 길이, 굵기, 배치방법 등이 큰 변수로 작용한다. 접지 시스템의 과도접지임피던스 특성에 대한 면밀한 검토가 요구되며, 규약임피던스로 평가할 필요가 있다[9-10].

접지전극에 임펄스전류  $i(t)$ 가 유입될 때에는 단순히 저항만이 아니라 인덕턴스(L)나 정전용량(C)의 영향 때문에 일반적으로 접지전극과 무한원점 사이에는 전압  $v(t)$ 가 나타난다.

이때 전압과 전류의 피크값의 비  $V_p/I_p$ 를 규약접지임피던스(Conventional grounding impedance)라 하며, 접지시스템이 임펄스 전류에 대한 과도적인 특성은 간이적으로 나타낸 것이다. 규약접지임피던스가 낮은 것이 뇌격전류가 흐를 때, 전위상승이 낮으므로 성능이 양호한 접지시스템이라고 볼 수 있다.

EDSA[11]는 전력계통 해석용 프로그램으로, 과도 현상을 분석하는 모듈을 포함한다.

접지시스템의 회로모델에 전력 시스템에서 널리 적용하는  $5 \times 20[\mu s]$ ,  $10[kV]$  임펄스전압을 인가하여 응답특성을 알아보았다. 그림 10은 접지봉구성 1S1P의 입력 임펄스 전압이고, 그림 11~13은 출력 전류 파형을 나타낸다.

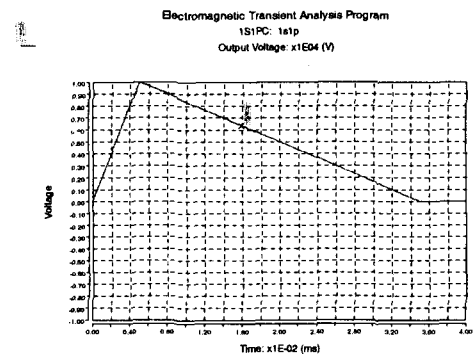


그림 10. 1S1P 동봉의 입력 임펄스 전압파형  
Fig. 10. Input impulse voltage waveform for 1S1P copper rod

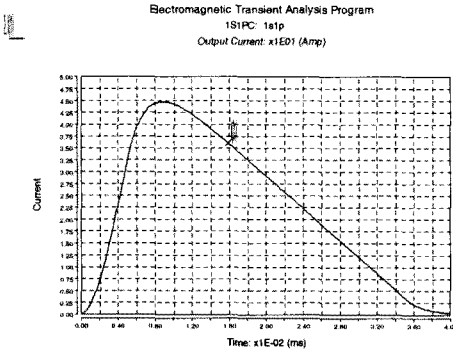


그림 11. 1S1P 동봉의 출력 전류파형  
Fig. 11. Output impulse current waveform for 1S1P copper rod

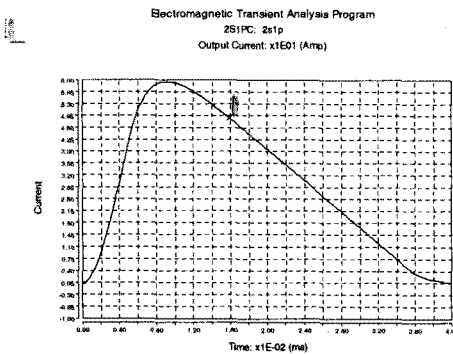


그림 12. 2S1P 동봉의 출력 전류파형  
Fig. 12. Output impulse current waveform for 2S1P copper rod

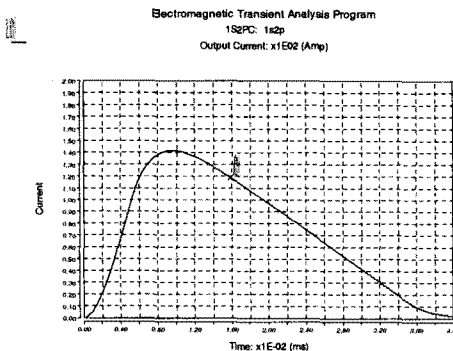


그림 13. 1S2P 동봉의 출력 전류파형  
Fig. 13. Output impulse current waveform for 1S2P copper rod

규약접지임피던스는 입력 전압과 출력 전류의 피크값의 비로 계산되고, 표 4에 간추려 놓았다.

입력전압의 피크값은 104[V]이고, 피크치는 5.0 [μs]에서 발생한다. 1S1P의 경우 출력 전류의 피크값은 44.73[A]이고, 피크치는 리액턴스의 영향으로 8.7[μs]에서 발생했다. 2S1P의 경우 출력 전류의 피크값은 59.42[A]이고, 피크치는 9.1[μs]에서 발생했다. 1S2P의 경우 출력 전류의 피크값은 141.4[A]이고, 피크치는 9.5[μs]에서 발생했다.

표 4. 접지봉 구성에 따른 규약접지임피던스  
Table 4. Conventional grounding impedance by ground rods layout

|       | 1S1P  | 2S1P  | 1S2P |
|-------|-------|-------|------|
| Rg[Ω] | 195.0 | 145.0 | 60.0 |
| Zc[Ω] | 223.6 | 168.3 | 70.7 |

규약접지임피던스 계산은 EDSA 프로그램의 출력에 나온 전압과 전류의 수치로 하였다. Rg[Ω]은 접지임피던스의 dc값이고, Zc[Ω]은 규약접지임피던스이다.

임펄스전류에 대한 접지전극의 전위상승은 간략히 식으로 계산할 수가 있다. 1S1P 접지봉 구성에서 규약접지임피던스는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$V_p = L \frac{di}{dt} + Ri$$

$$= 0.4 \times 10^{-3} \times \frac{10k}{5\mu} + 195 \times 10k$$

$$\approx 275 \times 10^4 [V]$$

$$Z_c = \frac{V_p}{I_p} = \frac{275 \times 10^4}{1 \times 10^4} = 275[\Omega]$$

식에서 구한 값은 EDSA 프로그램으로 시뮬레이션한 규약접지임피던스의 값보다는 큰 수치를 나타낸다.

표 4에서 알 수 있듯이 규약접지임피던스 값은 dc 값보다 높은 수치가 되어 뇌격전류가 유입되면 접지 성능이 많이 저하하게 된다. 접지봉 구성에 따라 1S1P는 규약접지임피던스 최대 14.7[%]가 증가했고, 2S1P는 최대 16.1[%] 증가하고, 1S2P는 최대

17.8%]이나 규약접지임피던스가 증가하였다.

## 5. 결 론

배전계통에서 동봉 접지극은 많이 쓰이고 있다. 접지극에는 상용 주파수뿐만 아니라 고주파 성분의 전류가 흐르므로 주파수에 대한 함수로 접지임피던스 특성을 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 Wenner 4전극법으로 대지 저항률을 측정하였고, 3점 전위강하법으로 주파수영역에서의 동봉접지전극의 접지 임피던스를 측정하였다. 실측한 접지임피던스는 Pattern search법으로 회로모델과 ARMA법으로 전달함수 모델로 등가화 시켰다.

주파수에 대한 접지임피던스는 대부분 저항성분으로 나타났고, 1[kHz] 이상에서는 자기인덕턴스에 의한 유도성분의 영향이 지배적으로 접지임피던스가 증가하는 현상을 보였다.

본 논문에서 제시한 접지임피던스 모델링 기법으로 접지시스템의 주파수 응답특성을 평가하기 위해 뇌격서지를 사례연구 접지시스템에 주입시키고 접지시스템의 과도접지임피던스를 시뮬레이션 하였다.

접지봉 구성에 따라 규약접지임피던스 값은 dc값보다 상당히 높은 값이 관찰되었다. 규약접지임피던스를 작게 하려면 접지저항값을 작게 하고, 리액턴스 영향을 고려하여 접지봉 구성을 할 필요가 있다고 사료된다.

## References

- [1] F.A. Wenner, "A Method of Measuring Resistivity", National Bureau of Standards, 1916.
- [2] "Digital Earth Tester Model MEGGER DET 2/2", AVO International Ltd., 2000.
- [3] "CDEGS User's Guide", SES Technologies Ltd., 2007.
- [4] IEEE std 81-1983, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth surface Potential of a Ground system", IEEE Inc., 1983.

- [5] I.F. Gonos, F.V. Topalis, I.A. Stathopoulos, "Transient impedance of grounding rods", International Symposium on High Voltage Engineering, Vol 2, 1999.
- [6] J.A. Cadow and H.R. Martens, "Discrete-time and Computer Control system", Prentice-Hall Inc., 1970.
- [7] MATLAB User's Guide, "System Identification Toolbox", Math Work, 2007.
- [8] L. Ljung, "System Identification", Prentice Hall, 1999.
- [9] KSC IEC 62305, "피뢰시스템", 2007.
- [10] 이수봉 외 4인, "임펄스전류의 인가위치에 따른 심매설 봉상 접지전극의 과도접지임피던스 특성", 조명전기설비학회, 2008.
- [11] EDSA User's Guide, "Electromagnetic Transient Analysis Program", EDSA Micro Co., 2008.

## ◇ 저자소개 ◇

### 김경철 (金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982년 국방과학연구소연구원. 1982~1984년 NMSU 전기공학과 졸업(석사). 1984~1988년 UTA 전기공학과 졸업(박사). 1988~1991년 한국전기연구소 선임연구원. 1991년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수.

### 오경훈 (吳京勳)

1982년 8월 8일생. 2008년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2008년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

### 김민성 (金珉成)

1967년 2월 28일생. 1993년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2008년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정. 2006년~현재 케이에스지티(주) 대표이사.

### 최중기 (崔鍾基)

1969년 2월 1일생. 1992년 동국대학교 전기공학과 졸업. 1995년 홍익대학교 전기제어과 졸업(석사). 2007년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구소 선임연구원.

### 김동명 (金東明)

1960년 2월 26일생. 1986년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1999년 고려대 산업대학원 졸업(석사). 1986년 한국전력공사 입사. 2005년~현재 한전 전력연구원 배전연구소 책임연구원.