Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 23, No.9, pp. 40~46 September 2009 논문 23-9-6

MATLAB 프로그램을 이용한 배전계통에 사용되는 동봉 접지전극의 과도 접지임피던스 특성 분석

(Transient Grounding Impedance Characteristic Analysis of a Copper Rod-type Grounding Electrode used for Electric Distribution Systems Using MATLAB Program)

김경철* · 오경훈 · 이규진 · 심건보 · 최종기
(Kyung-Chul Kim · Kyung-Hoon Oh · Kyu-Jin Lee · Keun-Bo Shim · Jong-Kee Choi)

요 약

비록 접지저항은 접지전극의 접지성능을 좌우하는 지수이기는 하지만, 과도상태에서는 접지 성능을 반영하지 못한다. 동봉은 배전계통에서 가장 많이 쓰이는 접지전극이다. 본 논문에서는 동봉의 접지 임피던스를 주파수 60[Hz]에서 100[㎑] 범위까지 측정하여 등가 접지임피던스 모델을 구하였다. 뇌격서지가 유입되었을 때 MATLAB 프로그램으로 과도접지임피던스의 수치와 파형을 시뮬레이션하였다.

Abstract

Although a ground resistance is a good index of grounding performance for grounding electrodes, it does not reflect the grounding performance during transient state. 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 raging from 60[Hz] up to 100[㎑] 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 MATLAB software program.

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

1. 서 론

높은 주파수 성분의 접지전류에 대한 접지시스템의 응답특성 평가는 낙뢰 등에 대한 보호를 목적으로 하는 접지에 있어서는 매우 중요한 요소이다. 높은 주파수 성분의 접지전류에 대한 접지시스템의 성능은 상용주파수에서와는 다르다.

* 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 30일

고주파수 영역의 접지 임피던스는 저주파수 내역의 접지성능만을 보여주는 접지저항과는 다르게 과도상태 접지성능지수가 된다.

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 Φ14×L1000[㎜] 동봉으로 하였다. 접지 임피던스는 주파수를 60[Hz]부터 100[㎑]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

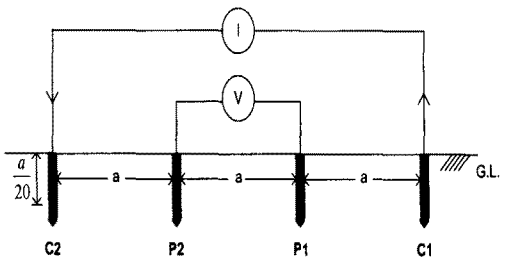

그림 1. Wenner 4 전극법
Fig. 1. 4-point Wenner method

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. 전극간격을 0.5~30[m]까지 변화시키면서 측정한 결과는 그림 2에 간추려 놓았다. 측정 장비는 AVO사의 모델 MEGGER DET 2/2[2]이다.

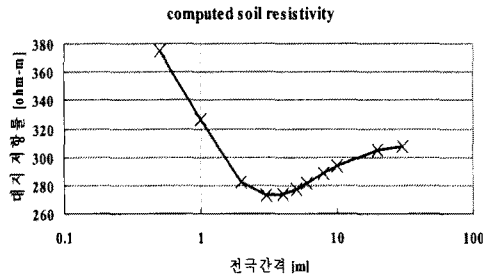

그림 2. 측정된 대지고유저항률
Fig. 2. Measured soil resistivity

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[Ω·m]	층 두께[m]
표토층(ρ1)	397.9	0.44
심 층(ρ1)	283.2	∞

2.2 접지시스템 구성

그림 3은 시험부지에 동봉(Φ14×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[㎟]이다.

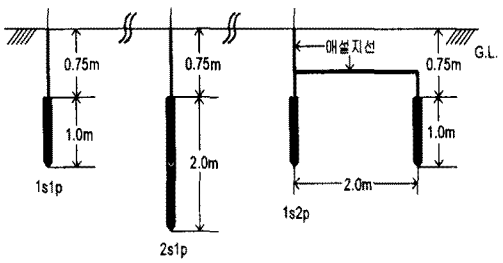

그림 3. 접지봉의 구성
Fig. 3. Ground rods layout

2.3 접지저항 및 접지임피던스 측정

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

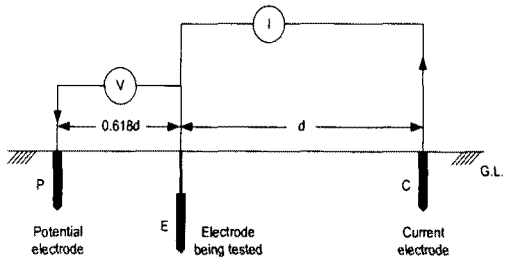

그림 4. 3점 전위강하법
Fig. 4. 3-point fall-of-potential method

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

식 (1)에 시험부지의 토양모델을 적용하면,

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

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

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

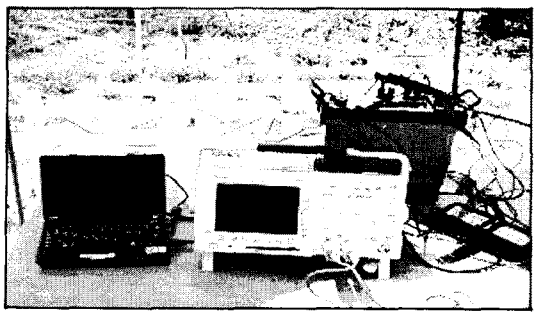

그림 5. 접지저항 측정시스템 외관도
Fig. 5. Outside view of the ground resistance mersureing system

우선 접지저항을 측정하기 위한 시스템의 구성요소는 접지저항 측정장비(SAS1000[6]), 오실로스코프, 노트북, PT(Potential Transformer), CT(Current Transformer)로 되어있고, 그림 5는 그 외관도이다.

접지저항은 SAS1000장비로 전위강하법 원리로 측정하였다. 측정장비 SAS1000은 400[VPP]에서 0.2~1000[㎃] 범위의 전류를 공급할 수 있고, 전압은 1[㎶]에서 400[V]까지 측정 가능하다.

그림 6은 1S1P의 입력전류와 출력 전압파형을 나타낸다. 입력전류는 펄스 형태의 파형을 주입한다. 입력전류의 주파수 성분은 3[Hz] 내외로 거의 dc성분으로 이루어져 있다. 출력 전압파형도 입력전류파형과 같은 펄스 형태였고, 주파수 성분도 전류와 비슷함을 보였다. 1주기는 5[sec]이다.

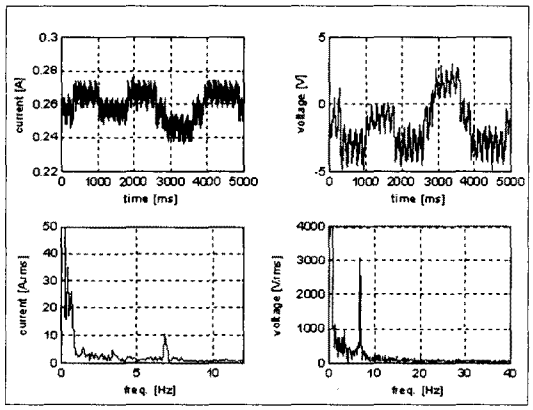

그림 6. 1S1P 동봉의 입력전류와 출력전압파형
Fig. 6. Input current and output voltage waveforms for 1S1P copper rod

한 주기 동안의 전압과 전류의 실효치를 구하여 계산된 접지저항 값은 표 2에 간추려 놓았다.

표 2. 측정된 접지저항
Table 2. Measured ground resistance

	1S1P	2S1P	1S2P
Zg[Ω]	237.0	153.0	76.0

그림 7은 전위강하법으로 접지임피던스를 측정하기 위한 측정시스템의 외관도이다. 측정시스템의 구

성요소는 신호발생기(0~900[klz] 정현파), 신호증폭기, 고역필터, 오실로스코프, 노트북으로 되어 있다.

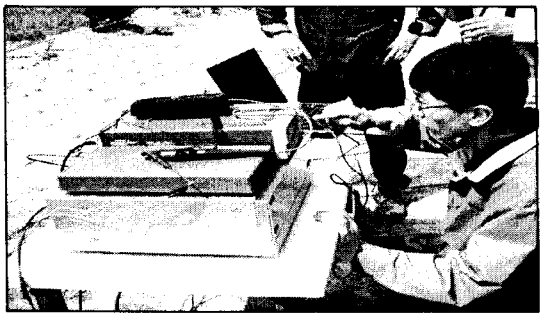

그림 7. 접지임피던스 측정시스템 외관도
Fig. 7. Outside view of the ground impedance measuring system

접지임피던스 측정은 임의로 선택한 주파수 전류를 접지극으로 주입시키면서 접지 전위와 전류를 측정하여 접지임피던스를 계산하면 표 3과 같다.

표 3. 측정된 접지 임피던스
Table 3. Measured ground impedance

frequence [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
1K	197.92	5.0	178.41	3.6	43.91	6.6
3K	225.33	10.5	161.94	8.9	48.49	10.1
5K	248.00	15.3	178.41	13.4	53.07	11.8
10K	269.31	28.1	186.85	24.3	53.81	14.5
30K	290.41	32.9	137.60	31.9	61.61	16.7
50K	294.24	35.4	207.20	32.8	70.42	18.1
100K	355.56	54.7	262.57	50.7	70.18	18.7

3. 접지임피던스 모델링

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

$$H(z)=\frac{B(z)}{A(z)}=\frac{b_0+b_1z^{-1}+\cdots+b_nz^{-n}}{a_0+a_1z^{-1}+\cdots+a_nz^{-n}} \quad (2)$$

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.

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

종류	전달함수
1S1P	$Z(s)=\frac{-1.937\times10^{-12}s^2-1.335\times10^{-5}s-1}{4.965\times10^{-14}s^2-2.52\times10^{-8}s-0.0047}$
2S1P	$Z(s)=\frac{-1.157\times10^{-13}s^2-4.7\times10^{-6}s-1}{1.12\times10^{-14}s^2-7.48\times10^{-9}s-0.00674}$
1S2P	$Z(s)=\frac{1.98\times10^{-18}s^3+3.289\times10^{-12}s^2+6.34\times10^{-6}s+1}{1.36\times10^{-20}s^3+1.7\times10^{-14}s^2+5.92\times10^{-8}s+0.0132}$

그림 8~10은 ARMA method로 구한 접지 임피던스 (Z_{sim})와 측정된 접지 임피던스(Z_{mea})를 비교한 파형을 나타낸다.

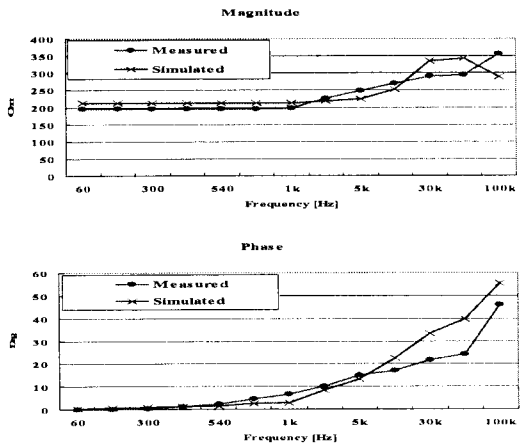

그림 8. 1S1P 동봉의 접지임피던스 비교
Fig. 8. Ground impedance comparison for 1S1P copper rod

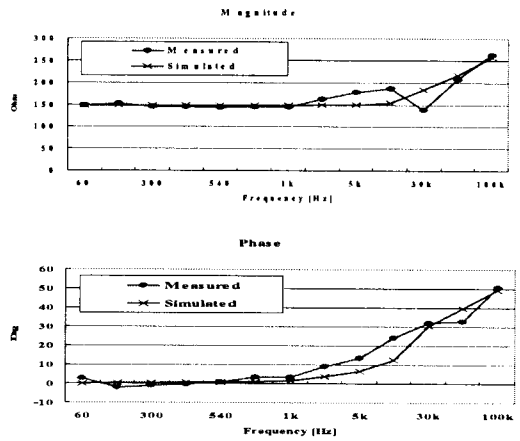

그림 9. 2S1P 동봉의 접지임피던스 비교
Fig. 9. Ground impedance comparison for 2S1P copper rod

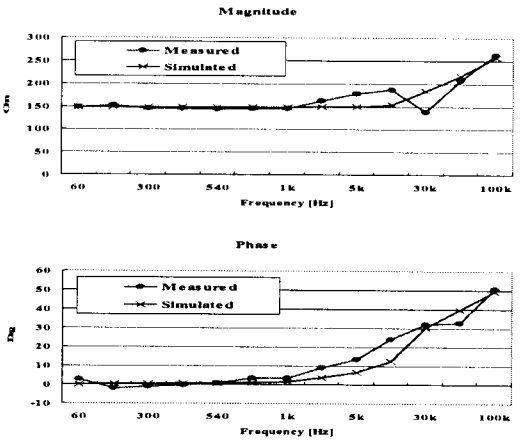

그림 10. 1S2P 동봉의 접지임피던스 비교
Fig. 10. Ground impedance comparison for 1S2P copper rod

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 나타내게 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_p를 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.

MATLAB 프로그램으로 과도현상을 분석하는 모듈을 이용한다. 접지시스템의 전달함수 모델에서 전력시스템에서 낙뢰 연구에 널리 적용되는 입력 임펄스 전압 2×50[μs] 10[kV]을 인가하여 응답 특성을 구하고자 한다.

입력 임펄스전압은 CDEGS 프로그램을 이용하면 아래와 같이 변환된다.

$$v(t) = 10305.2(e^{-14440.57t} - e^{-2613743t}) \quad [V]$$

그림 11은 MATLAB 프로그램의 계산 흐름도를 나타낸다.

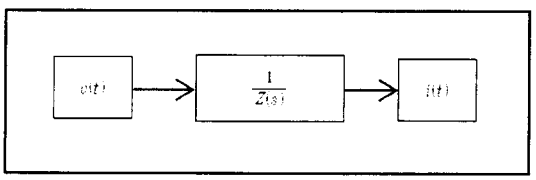

그림 11. 계산 흐름도
Fig. 11. Transfunction block diagram

그림 12는 접지봉 구성 1S1P의 입력 임펄스 전압파형이고, 그림 13~15는 출력전류파형을 나타낸다.

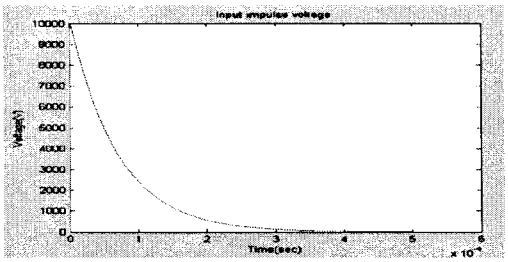

그림 12. 1S1P 동봉의 입력 임펄스 전압파형
Fig. 12. Input impulse voltage waveform for 1S1P copper rod

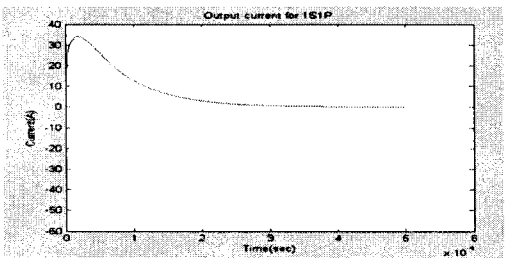

그림 13. 1S1P 동봉의 출력 전류파형
Fig. 13. Output impulse current waveform for 1S1P copper rod

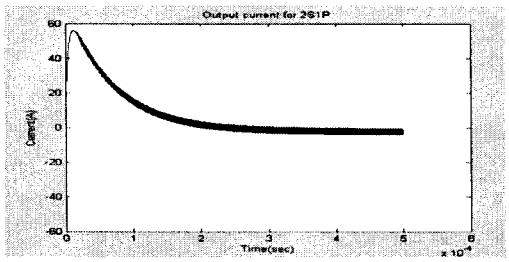

그림 14. 2S1P 동봉의 출력 전류파형
Fig. 14. Output impulse current waveform for 2S1P copper rod

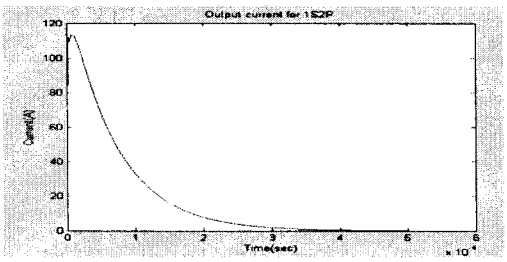

그림 15. 1S2P 동봉의 출력 전류파형
Fig. 15. Output impulse current waveform for 1S2P copper rod

규약접지임피던스는 입력 전압과 출력 전류의 피크값의 비로 계산되고, 표 5에 간추려 놓았다.

입력전압의 피크값은 10^4[V]이고, 피크치는 2.0 [μs]에서 발생한다. 1S1P의 경우 출력 전류의 피크값은 34.11[A]이고, 피크치는 리액턴스의 영향으로 18.67[μs]에서 발생했다. 2S1P의 경우 출력 전류의 피크값은 56.06[A]이고, 피크치는 12.04[μs]에서 발생했다. 1S2P의 경우 출력 전류의 피크값은 113.27 [A]이고, 피크치는 7.71[μs]에서 발생했다.

표 5. 접지봉 구성에 따른 규약접지임피던스
Table 5. Conventional grounding impedance by ground rods layout

	1S1P	2S1P	1S2P
Rg[Ω]	212.8	148.4	75.8
Zc[Ω]	291.8	177.6	87.9

표 5에서 알 수 있듯이 규약접지임피던스 값은 dc 값보다 높은 수치가 되어 뇌격전류가 유입되면 접지성능이 많이 저하하게 된다. 접지봉 구성에 따라 1S1P는 규약접지임피던스 최대 37.1[%]가 증가했고, 2S1P는 최대 19.7[%] 증가하고, 1S2P는 최대 16.0[%]이나 규약접지임피던스가 증가하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 MATLAB을 이용하여 배전계통에서 널리 쓰이고 있는 동봉 접지극을 주파수 특성 시험의 결과로 전달함수 모델로 등가화시키고 뇌격 서지를 주입하였을 때 접지시스템의 과도접지 임피던스를 시뮬레이션하였다.

주파수 특성 시험의 결과로부터 동봉 접지전극의 주파수 변화에 따른 접지 임피던스가 영향을 많이 받을 확인 하였다. 또한 접지봉의 구성에 따라 전달함수 모델의 정수가 결정되었고, 실측 결과와 비교한 결과 오차가 적었다.

접지봉 구성에 따라 규약접지임피던스 값은 dc값보다 상당히 높은 값이 관찰되었다.

향후에는 뇌격서지를 시뮬레이션하여 과도접지임피던스의 응답특성을 분석한 결과를 뇌격서지 발생기를 사용한 결과와 비교 검토할 계획이다.

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. Stathopulos, "Transient impedance of grounding rods", International Symposium on High Voltage Engineering, Vol 2, 1999.
[6] SAS1000, "Instruction Manual for ABEM Transmeter ASA4006", ABEM Instrument Inc. 1999.
[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.

◇ 저자소개 ◇

김경철 (金慶哲)
1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982년 국방과학연구소연구원. 1982~1984년 NMSU 전기공학과 졸업(석사). 1984~1988 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.

이규진 (李圭珍)
1984년 6월 22일생. 2009년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2009년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

심건보 (沈建輔)
1957년 2월 1일생. 1975년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 홍익대 산업기술연구소 책임연구원.

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