

배전계통에 사용되는 봉형 접지전극의 접지 특성 분석

(Grounding Characteristics Analysis of the Rod-Type Grounding Electrodes used for Electric Distribution Systems)

김경철* · 정지원**

(Kyung-Chul Kim · Ji-Won Jung)

Abstract

Grounding system insures a reference potential point for electric devices and also provides a low impedance path for fault currents or transient currents in the earth. The ground impedance as function of frequency is necessary for determining its performance since fault currents could contain a wide range of frequencies. In this paper, the grounding resistance, grounding impedance and transient grounding impedance are measured by using 3-point fall-of-potential method in order to analyse grounding characteristics of the copper and concrete rod grounding electrodes. An equivalent transfer function model of the ground impedance and transient grounding impedance are identified from the measured values by using ARMA method and evaluated by comparing the conventional grounding impedance.

Key Words : Copper Rod, Concrete Rod, Grounding Resistance, Grounding Impedance, Frequency and Time Domain Characteristics Test

1. 서 론

안전한 접지설계는 사고 시에 대지로 고장전류를 흘려보내는 수단과 인체가 사고기기에 접촉 시에 위험에 노출되지 않도록 하는데 있다. 주파수 성분의 접지임피던스는 고장전류, 낙뢰, 개폐 임펄스 등에 대한 보호를 목적으로 하는 접지시스템에 있어서 매우 중요

한 역할을 한다[1-3].

본 논문에서는 배전계통에서 가장 널리 적용되고 있는 동봉과 콘크리트봉 접지전극의 접지저항, 접지임피던스, 과도접지임피던스를 실측을 통하여 구하였다.

시험장소의 대지저항률은 Wenner 4전극법[4]으로 측정하였고, 접지저항, 접지임피던스, 과도접지임피던스 측정은 3점 전위강하법으로 측정하였다.

측정된 접지임피던스와 과도접지임피던스는 ARMA 모델링 기법[5]을 이용하여 접지전극의 접지임피던스 및 과도접지임피던스 전달함수를 구하고자 한다. 전달함수 모델은 규약접지임피던스[6]를 구하여 평가한다.

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
** 교신저자 : 홍익대학교 전기공학과 석사과정
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2011년 3월 3일
1차심사 : 2011년 3월 10일, 2차심사 : 2011년 5월 2일
심사완료 : 2011년 5월 6일

2. 접지 특성 측정

2.1 시험장소의 대지저항률 측정

그림 1은 현장에서 가장 많이 쓰이고 있는 Wenner 4전극법으로 대지 고유저항률을 측정하는 회로이다. 전위극(P1, P2), 전류전극(C1, C2)을 배치하고 각 전극간의 거리(a)가 등간격이 되도록 한다. 전극 간격을 0.5~20[m]까지 변화시키면서 측정한 결과는 표 1에 간추려 놓았다. 측정 장비는 AVO사의 모델 MEGGER DET2/2[7]이다.

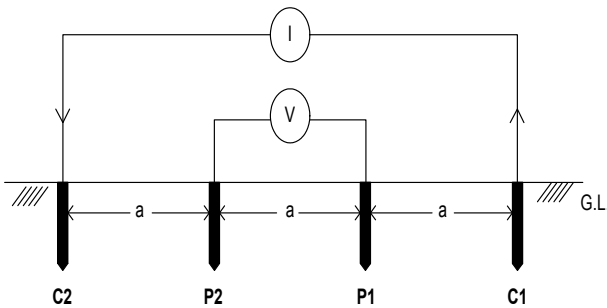


그림 1. Wenner 4 전극법
Fig. 1. 4-point Wenner method

표 1. 측정된 대지 고유저항률
Table 1. Measured soil resistivity

전극간격 [m]	겉보기저항 [Ω]	겉보기저항률 [Ωm]
0.5	16.69	52.4
1	13.39	84.1
2	8.26	103.8
3	6.77	127.6
4	5.17	129.9
5	4.39	137.9
6	3.66	138.0
7	3.29	144.7
8	3.06	153.8
9	2.84	160.6
10	2.58	162.1
15	1.83	172.9
20	1.58	198.8

측정한 대지 고유 저항률을 토대로 접지해석 프로그램인 CDEGS(Current Distribution, Electromagnetic fields, Grounding and Soil Structure Analysis)[8]을 사용하여 Curve fitting하면 표 2와 같은 등가인 수평 3층 구조의 토양모델을 구할 수 있다.

표 2. 수평 3층 구조 접지 토양모델 파라미터
Table 2. Three-layer soil model parameter

	저항률 [$\Omega \cdot \text{m}$]	층 두께 [m]
표토층(ρ_1)	190.16	5.27
중간층(ρ_2)	94.55	6.41
심 층(ρ_3)	351.34	Infinite

2.2 접지시스템 구성

시험에 사용된 접지전극은 배전계통에 널리 쓰이고 있는 동봉($\Phi 14 \times L1000$ [mm])과 콘크리트봉($\Phi 100 \times L1000$ [mm])을 매설하여 구성한 것이다. 그림 2는 구성된 접지시스템으로 동봉은 2개가 직렬로 시공되었다. 그림 3은 접지전극의 외관을 나타낸다. 매설지선에 사용된 전선은 GV케이블 22[mm²]이다.

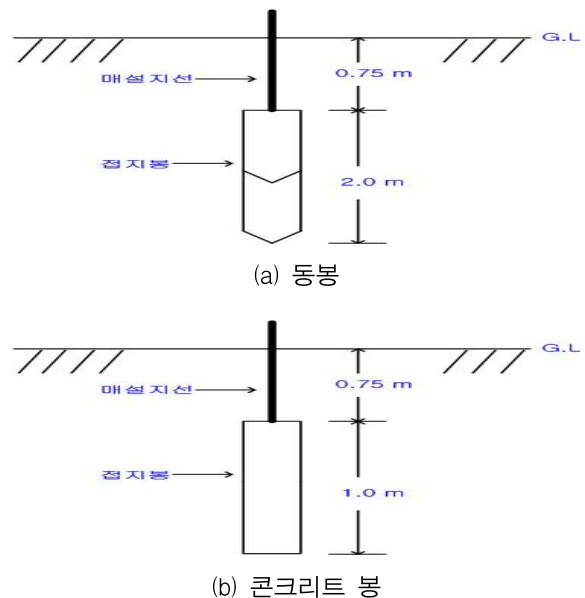


그림 2. 접지봉의 구성
Fig. 2. Ground rods layout



(a) 동봉



(b) 콘크리트 봉

그림 3. 접지전극의 사진
Fig. 3. Used ground rods

2.3 접지저항 측정

그림 4는 3점 전위강하법으로 접지임피던스를 측정하기 위한 회로도이다.

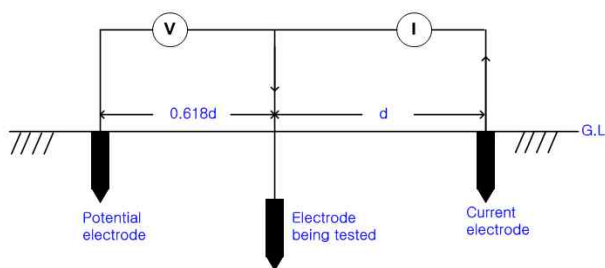


그림 4. 3점 전위강하법
Fig. 4. 3-point fall-of-potential method

3점 전위강하법에서 측정하고자 하는 접지극과 전류보조극의 위치를 $d[m]$ 라고 할 때, 토양모델이 단일 층일 때는 전위 보조극의 위치는 $0.618d$ 이다. 토양모델이 수평 2층 이상일 때는 보정계수에 따라 전류보조

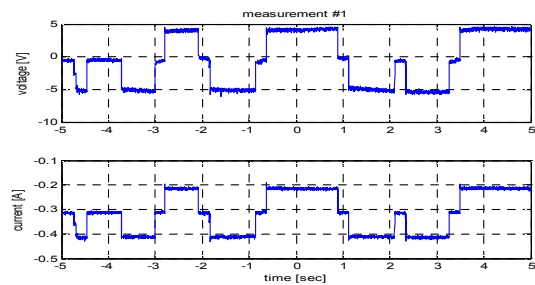
극의 위치가 변하게 된다[9].

접지전극 전류보조극 사이는 $100[m]$, 접지전극과 전위보조극의 간격은 $60[m]$ 로 하여 접지저항을 측정하였다.

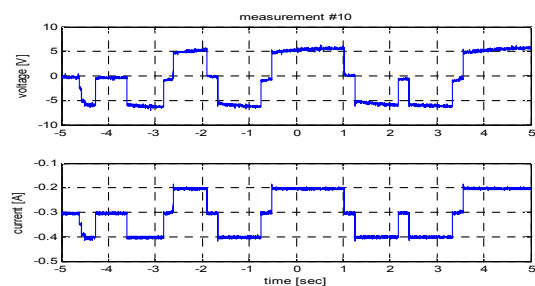
그림 5는 3점 전위강하법으로 접지저항을 측정하기 위한 측정시스템의 외관사진이다. 측정시스템의 구성 요소는 접지저항 측정장비(SAS 1000, 오실로스코프, 노트북, PT(Potential Transformer), CT(Current Transformer)로 되어 있다[10].



그림 5. 접지저항 측정시스템의 외관사진
Fig. 5. Outside view of the grounding resistance measuring system



(a) 동봉



(b) 콘크리트봉

그림 6. 측정된 전압 및 전류파형
Fig. 6. Measured voltage and current waveform

접지저항은 SAS 1000 장비로 3점 전위강하법 원리로 측정하였다. 측정장비 SAS 1000은 400[VPP]에서 0.2~1000[mA] 범위의 전류를 공급할 수 있고, 전압은 1[μV]에서 400[V]까지 측정 가능하다.

그림 6은 동봉과 콘크리트봉의 측정된 전압과 전류 파형이고, 1주기는 5[sec]이다.

한 주기 동안의 전압과 전류의 실효치를 구하여 계산된 접지저항은 다음과 같다.

표 3. 측정된 접지저항
Table 3. Measured grounding resistance

	동봉	콘크리트봉
Rg[Ω]	47.5	58.2

2.4 접지임피던스 측정

접지임피던스 측정은 임의로 선택한 주파수 전류를 접지극으로 주입시키면서 접지전위와 전류를 측정하고, 측정된 파형은 주파수 영역으로 변환하여 접지임피던스를 계산하였다. 표 4에 측정된 접지임피던스를 간추려 놓았다.

표 4. 측정된 접지임피던스
Table 4. Measured grounding impedance

f[Hz]	동봉 Z		콘크리트봉 Z	
	Mag[Ω]	Phase[deg]	Mag[Ω]	Phase[deg]
100	32.0675	-1.8943	38.5051	-2.0688
500	31.2318	-1.5779	35.8129	-2.0483
1[k]	30.8512	-1.5416	35.2315	-2.0007
10[k]	29.6930	-0.8105	33.6255	-1.7383
50[k]	28.2561	5.8296	31.9024	0.7004
100[k]	28.2793	15.5057	30.9679	4.5562
300[k]	39.2955	43.3811	32.5911	22.3629
500[k]	63.4256	57.1443	40.5113	41.5877
700[k]	99.8473	54.1975	58.5006	45.4363
1[M]	182.0494	44.3457	94.2766	48.1171

2.5 과도접지임피던스 측정

접지전극에 뇌격서지와 같이 급격하게 변화하는 서지가 유입되면 상용주파수의 전류가 흐를 때와는 다르게 짧은 시간영역에서 높은 과도접지임피던스를 나타나게 된다.

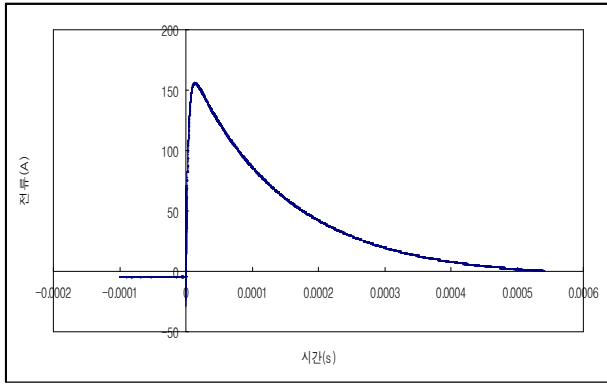
과도 접지임피던스의 평가는 규약접지임피던스(Conventional grounding impedance)로 평가할 필요가 있다. 접지전극에 임펄스 전류 $i(t)$ 가 유입되면, 접지전극과 무한원점 사이에는 전압 $v(t)$ 가 나타난다. 이때 전압과 전류의 피크 값의 비 V_p/I_p 를 규약접지임피던스라 하며, 접지시스템이 임펄스 전류에 대한 과도적인 특성을 간이적으로 나타낸 것이다. 규약접지임피던스가 낮은 것이 뇌격전류가 흐를 때, 전위상승이 낮으므로 성능이 양호한 접지시스템이라고 볼 수 있다.

그림 7은 3점 전위강하법으로 과도접지임피던스를 측정하기 위한 측정시스템의 외관 사진이다. 시험에 사용한 임펄스 발생기는 독일의 High Volt 사의 장비로 기초 전력연구원이 보유하고 있다.

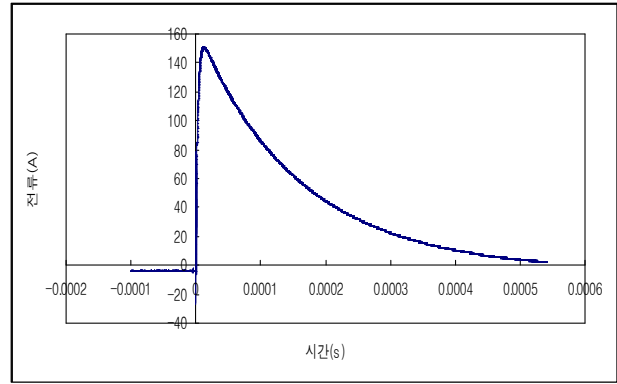


그림 7. 과도접지임피던스 측정시스템 외관 사진
Fig. 7. Outside view of the transient grounding impedance measuring system

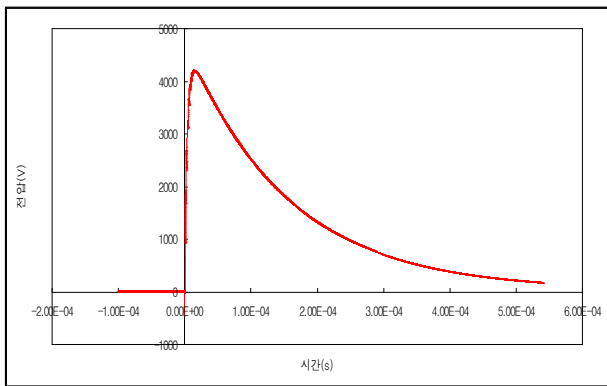
임펄스 발생기를 이용하여 $4 \times 10[\mu s]$ 의 전류파형을 접지전극에 인가하여 주입된 전류와 접지전극과 전위보조극 사이에 걸리는 전압을 측정하였다. 측정된 신호는 100[MS/s]의 A/D 변환기를 사용하여 디지털 신호를 변환시키고 대역통과필터를 거쳐 컴퓨터에 저장



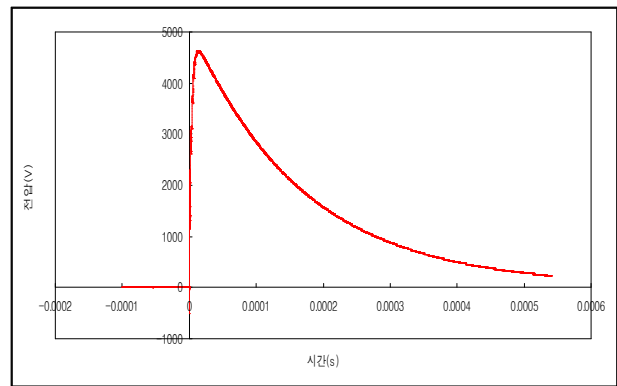
(a) 전류



(a) 전류



(b) 전압



(b) 전압

그림 8. 동봉의 측정된 전류와 전압파형
Fig. 8. Measured current and voltage waveform of the copper rod

그림 9. 콘크리트봉의 측정된 전류와 전압파형
Fig. 9. Measured current and voltage waveform of the concrete rod

하였다. Sampling time은 2×10^{-8} [sec]이다.
그림 8~9는 측정된 입력 임펄스 전류파형과 출력임펄스 전압파형을 나타낸다. 종축의 전류[A], 전압[V]는 실효치를 나타낸다.
측정된 규약접지임피던스($Z_p=V_p/I_p$)는 다음과 같다.

표 5. 측정된 규약접지임피던스
Table 5. Measured conventional grounding impedance

	동봉	콘크리트봉
$Z_g[\Omega]$	27.03	30.96

3. 접지임피던스 모델링

전달함수 $H(z)$ 를 z -domain에서 n 차로 표현하면,

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

으로 된다.

전달함수 계수인 a_i 's와 b_i 's는 MATLAB의 System Identification Toolbox[11]을 이용하여 구하기로 한다. ARMA(Auto Regressive Moving Average)법은 N 개의 데이터가 있을 때, $N-n$ 개의 방정식을 세우고 전달함수의 계수를 실측한 값과 계산된 값과의 오

배전계통에 사용되는 봉형 접지전극의 접지 특성 분석

차가 최소화 될 때까지 반복해서 구하는 방법이다.

측정된 접지임피던스(표 4)는 크기(Amplitude), 위상(Phase), 주파수(Frequency)를 입력데이터로 하고, 결과는 Z-domain의 전달함수 H(z)로 계산된다. 일반적으로 사용되는 s-domain의 전달함수 H(s)는 Bliiner transformation 기법[5]을 사용하였다.

ARMA method로 구한 전달함수는 다음과 같다.

동봉의 접지임피던스 전달함수,

$$Z(s) = \frac{6.565e^{-32}S^5 + 1.728e^{-24}S^4 + 1.765e^{-17}S^3}{2.429e^{-26}S^4 + 1.205e^{-19}S^3 + 1.037e^{-12}S^2} + \frac{3.812e^{-11}S^2 + 2.324e^{-5}S + 1}{7.969e^{-7}S + 0.0312} \quad (2)$$

콘크리트봉의 접지임피던스 전달함수,

$$Z(s) = \frac{7.985e^{-13}S^2 + 3.145e^{-6}S + 1}{9.831e^{-8}S + 0.0259} \quad (3)$$

의 결과를 얻었다.

표 6은 동봉의 접지임피던스 측정치와 시뮬레이션한 접지임피던스 값을 비교한 것이고, 표 7은 콘크리트봉의 접지임피던스 비교표이다.

표 6. 동봉의 접지임피던스 비교

Table 6. Grounding impedance comparison for the copper rod

f[Hz]	Measured Z		Simulated Z	
	Mag[Ω]	phase[deg]	Mag[Ω]	phase[deg]
100	32.07	-1.89	32.05	-0.919
500	31.23	-1.58	31.95	-4.590
1[k]	30.85	-1.54	31.64	-9.130
10[k]	27.69	-0.81	14.93	-61.853
50[k]	28.26	5.83	10.91	85.227
100[k]	28.28	15.51	24.04	67.110
300[k]	39.30	43.38	47.44	57.736
500[k]	63.43	57.14	71.39	59.632
700[k]	99.85	54.20	108.68	54.647
1[M]	182.05	44.35	156.40	24.628

표 7. 콘크리트봉의 접지임피던스 비교

Table 7. Grounding impedance comparison for the concrete rod

f[Hz]	Measured Z		Simulated Z	
	Mag[Ω]	phase[deg]	Mag[Ω]	phase[deg]
100	38.51	-2.07	38.61	-0.023
500	35.81	-2.05	38.61	-0.117
1[k]	35.23	-2.0	38.61	-0.234
10[k]	33.63	-1.74	38.17	-2.203
50[k]	31.90	0.70	33.52	-3.023
100[k]	30.97	4.56	31.23	3.607
300[k]	32.59	22.36	33.15	25.093
500[k]	40.51	41.59	38.80	39.548
700[k]	58.50	45.44	46.09	49.573
1[M]	94.28	48.12	58.67	59.395

주파수영역 특성시험에 의한 과도접지임피던스 모델링은 앞에서 사용한 기법인 ARMA method를 이용한다.

MATLAB의 입력데이터는 시간영역의 입력전류값, 출력전압 값과 Sampling time(2×10^{-8} [sec])이 필요하다. 데이터 수는 50,000개를 사용했다.

그림 10은 사용된 동봉의 전류와 전압파형을 나타내고, 그림 11은 사용된 콘크리트봉의 전류와 전압 파형이다.

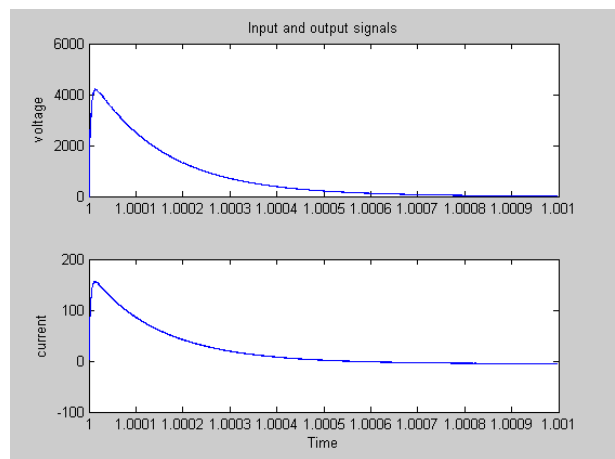


그림 10. 사용된 동봉의 전류와 전압파형

Fig. 10. Used current and voltage waveform of the copper rod

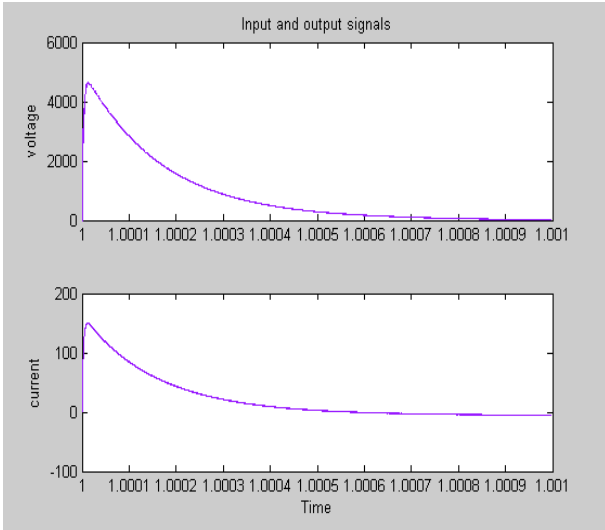


그림 11. 사용된 콘크리트봉의 전류와 전압파형
Fig. 11. Used current and voltage waveform of the concrete rod

ARMA method로 구한 z-domain의 전달함수 $H(z)$ 는 Bilinear transformation 기법을 사용하여 계산한 s-domain 전달함수는 다음과 같다.

동봉의 접지임피던스 전달함수,

$$Z(s) = \frac{-0.608S^6 - 2.637e^8 S^5 - 1.981e^{16} S^4 + 3.246e^{24} S^3}{S^6 + 4.2e^8 S^5 + 9.834e^{16} S^4 + 9.362e^{24} S^3} - \frac{3.216e^{31} S^2 + 2.292e^{40} S + 1.235e^{46}}{2.899e^{32} S^2 + 1.724e^{39} S + 4.323e^{44}} \quad (4)$$

콘크리트봉의 접지임피던스 전달함수,

$$Z(s) = \frac{-1.675S^5 - 2.323e^5 S^4 + 1.977e^{16} S^3}{S^5 + 5.083e^8 S^4 + 6.69e^{16} S^3} + \frac{8.07e^{22} S^2 + 1.922e^{32} S + 1.85e^{38}}{2.768e^{24} S^2 + 1.623e^{31} S + 5.621e^{36}} \quad (5)$$

의 결과를 얻었다.

그림 12는 동봉의 입력 임펄스전류에 대한 출력전압 측정치와 입력 임펄스전류로 시뮬레이션한 출력전압 값을 비교한 것이고, 그림 13은 콘크리트봉의 출력전압 비교 그림이다.

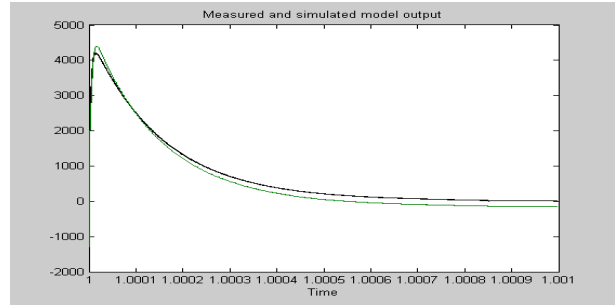


그림 12. 동봉의 출력전압 비교
Fig. 12. Output voltages comparison for the copper rod

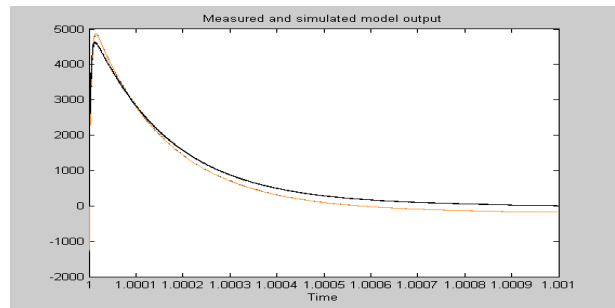


그림 13. 콘크리트봉의 출력전압 비교
Fig. 13. Output voltages comparison for the concrete rod

4. 결 론

배전계통에서 동봉과 콘크리트봉은 가장 널리 쓰이고 있는 접지전극이다. 본 논문에서는 동봉과 콘크리트봉 접지전극의 접지특성을 분석하였다.

시험장소의 대지저항률 측정은 Wenner 4전극법으로 하여, 토양모델을 수평 3층 구조 접지토양모델로 등가화시켰다.

3점 전위강하법으로 접지저항 측정한 결과 동봉은 47.5[Ω]이었고, 콘크리트봉은 58.2[Ω]이었다. 주파수를 변화시키면서 주파수영역 특성시험으로 접지임피던스를 측정하였다. 접지전극에 임펄스 전류를 주입시켜 시간영역 특성시험으로 과도접지임피던스를 측정하였고, 규약 접지임피던스는 측정결과 동봉은 23.07[Ω]이었고, 콘크리트봉은 30.96[Ω]이었다. 실측한 규약접지임피던스와 전달함수로 구한 임피던스값

배전계통에 사용되는 봉형 접지전극의 접지 특성 분석

은 유사한 값이 되어 전달 함수 모델이 접지전극의 접지 특성을 잘 나타낸다고 사료된다.

이 논문은 2011학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

References

- [1] IEEE Std 142-2007, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- [2] IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in Ac Substation Grounding.
- [3] NESC(National Electrical Safety Code), 2006 Edition.
- [4] F.A. Wenner, "A Method of Measuring Resistivity", National Bureau of Standards, 1916.
- [5] L. Ljung, "System Identification", Prentice Hall, 1999.
- [6] KSC IEC 62305, "피뢰시스템", 2007.
- [7] "Digital Earth Tester Model MEGGER DET 2/2", AVO International Ltd., 2000.
- [8] "CDEGS User's Guide", SES Technologies Ltd., 2007.
- [9] IEEE std 81-1983, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth surface Potential of a Ground system", IEEE Inc., 1983.
- [10] "Instruction Manual for ABEM Transmeter ASA4000", ABEM Instrument Inc., Sweden 1999.
- [11] MATLAB User's Guide, "System Identification Toolbox", Math Work, 2007.

◇ 저자소개 ◇



김경철(金慶哲)

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



정지원(鄭址元)

1984년 3월 18일생. 2010년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2010년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.