Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 19, No.6, pp. 67~74 September 2005 논문 19-6-10

배전계통에 사용되는 봉형 접지전극의 접지 임피던스 특성 분석

(Ground Impedance Characteristics Analysis of a Rod Type Grounding Electrode used for Distribution Systems)

김경철* · 진성은 · 이주홍 · 김유준 · 최종기 · 백남웅
(Kyung-Chul Kim · Seong-Eun Jin · Joo-Hong Lee · You-June Kim · Jong-Ki Choi · Nam-Woong Baek)

요 약

접지 시스템은 전기설비의 기준 전위점을 확보할 뿐만 아니라, 대지에 낮은 저항으로 고장 전류를 흐르게 한다. 고장전류는 넓은 범위의 주파수를 포함하기 때문에 접지의 성능을 평가하기 위해선 주파수에 대한 함수로 접지임피던스에 대한 특성의 분석이 필요하다. 본 논문에서는 상용화된 접지봉(매직봉)의 접지임피던스를 0[Hz]에서 100[kHz] 범위까지 측정하였고, 접지임피던스를 회로 모델과 전달함수 모델로 구하여 측정된 값과 비교 검토하였다.

Abstract

Grounding insures a reference potential point for electric devices and also provides a low resistance path for fault currents in the earth. The ground impedance as a function of frequency is necessary for determining its performance since fault currents could contain a wide range of frequencies. In this paper, the ground impedance of Magic rods which are commercially available has been measured in frequency ranging from 0[Hz] up to 100[kHz] and an equivalent circuit model, transfer function model of the ground impedance are identified from the measured values.

Key Words : Ground impedance, Magic rod, Frequency characteristic, Equivalent circuit model, Transfer function model

1. 서 론

접지는 전기설비의 기준 전위점을 확보하고 대지에 낮은 저항으로 고장전류를 흘러 보내기 위해 쓰인다. 주파수 성분의 접지 임피던스는 고장전류, 낙뢰, 개폐 임펄스 등에 대한 보호를 목적으로 하는 접지 시스템에 있어서 매우 중요한 요소이다.

본 논문에서는 주파수 영역에서의 접지임피던스를 실측을 통하여 구하였다. 시험 장소의 대지저항률은 Wenner 4전극법을 토대로 측정하고, 접지의 구성은 상용화된 ϕ100 x L1000[mm] 매직봉[1]으로 한 개일 때와 두 개를 직렬로 연결 했을 때를 고려하였다. 접지 임피던스는 주파수를 0[Hz]부터 100[kHz]까지 변화시키면서 3점 전위강하법으로 전

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2005년 5월 19일
1차심사 : 2005년 5월 24일
심사완료 : 2005년 6월 13일

류와 전압을 측정하여 구하였다.

측정된 접지임피던스를 회로 모델과 전달함수 모델로 하여 파라메터를 구하고, 실측한 접지임피던스와 비교 하고자 한다.

2. 접지임피던스 측정

2.1 시험장소의 대지저항률 측정

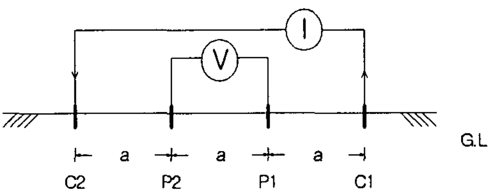


그림 1. Wenner 4 전극법
Fig. 1. 4-point Wenner Method

그림 1은 현장에서 가장 많이 쓰이고 있는 Wenner 4 전극법[2]으로 대지 고유 저항률을 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 변화 시키면서 측정한 결과는 그림 2에 간추려 놓았다. 측정 장비는 AVO사의 모델 MEGGER DET 2/2[3]이다.

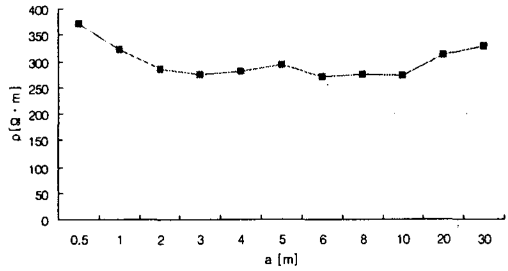


그림 2. 측정된 대지고유저항률
Fig. 2. Measured Soil resistivity

측정한 대지고유저항률을 토대로 접지해석 프로그램인 CDEGS(Current Distribution, Electromagnetic fields, Grounding and Soil Structure Analysis)[4]을 사용하여 curve fitting하면 표 1과 같은 등가인 수평 2층 구조의 토양모델을 구할 수 있다.

표 1. 2층 구조 접지 토양 모델 파라메터
Table 1. Two-layer soil model parameter

	저항율 [Ωm]	층 두께 [m]
표토층	397.9	0.44
심 층	283.2	∞

2.2 접지 시스템 구성

사례연구에 적용한 접지 시스템은 상용화된 접지봉(매직봉[1])을 매설하여 구성하였다. 그림 3은 사용된 접지봉의 외관이다. 크기는 ϕ100 x L 1000[mm]이고, 고강도 도전성 모르터 및 무기물질 등을 혼합한 접지체이다..

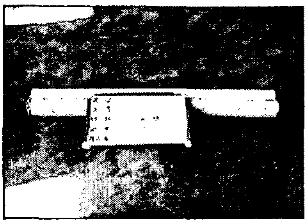


그림 3. 매직봉의 외관
Fig. 3. Outside view of Magic rod

그림 4는 접지 시스템의 구성을 보여준다. (a)는 매직봉 한 개를 사용한 것이고, (b)는 매직봉 1[m]짜리를 직렬로 연결했다. 매설지선에 사용된 전선은 GV케이블 22[mm^2]이다.

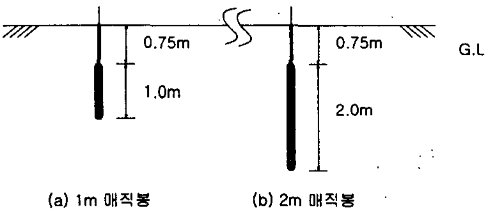


그림 4. 접지봉의 구성
Fig. 4. Ground rods layout

2.3 접지저항 및 접지임피던스 측정

그림 5는 전위강하법(Three-point fall-of-potential method)으로 접지저항 및 접지임피던스를 측정하기 위한 회로도이다.

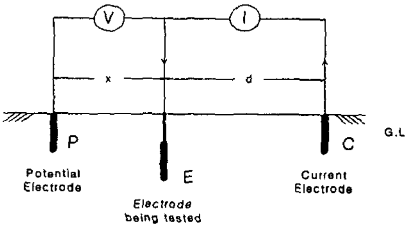


그림 5. 3점 전위강하법
Fig. 5. Three-Point fall-of-potential method

3점 전위강하법에서 측정하고자 하는 접지극과 전류보조극의 위치를 d[m]라고 할 때, 토양모델이 수평 2층 구조일 때는 보정계수 K에 따라 전위보조극의 위치가 변하게 된다[5]. 시험부지의 토양모델에 적용하면,

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

여기서 ρ_1은 표토층, ρ_2는 심층의 대지저항률을 나타낸다. 보정계수가 -0.17일 때는 전위보조극의 위치 x=0.6d로 하면 접지저항 및 접지임피던스 측정이 정확하다고 볼 수 있다. 접지전극과 전류보조극 사이는 200[m], 접지전극과 전위보조극의 간격은 120[m]로 하여 측정하였다.

우선 접지저항을 측정하기 위한 시스템의 구성요소는 접지저항 측정 장비(SAS1000[6]), 오실로스코프, 노트북, PT(Potential Transformer), CT (Current Transformer)로 되어있고, 그림 6은 그 외관도이다. 좌측부터 노트북, 오실로스코프(앞), SAS1000(뒤), PT, CT가 배치되어 있다.

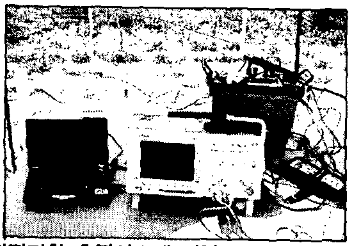


그림 6. 접지저항 측정시스템 외관도
Fig. 6. Outside view of the ground resistance measuring system

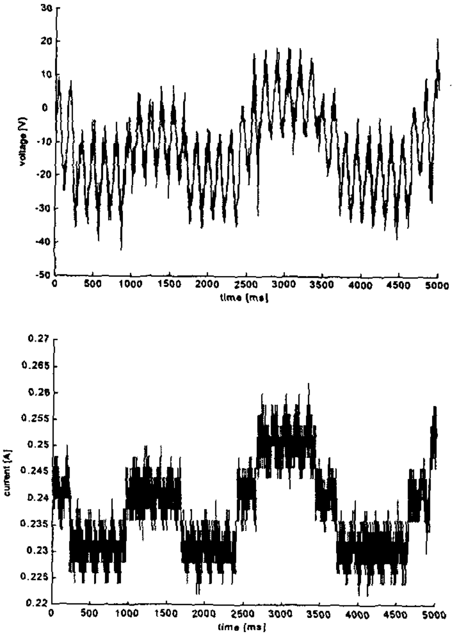


그림 7. 1[m] 매직봉의 측정된 전압 및 전류 파형
Fig. 7. Measured voltage and current waveforms for 1[m] Magic rod

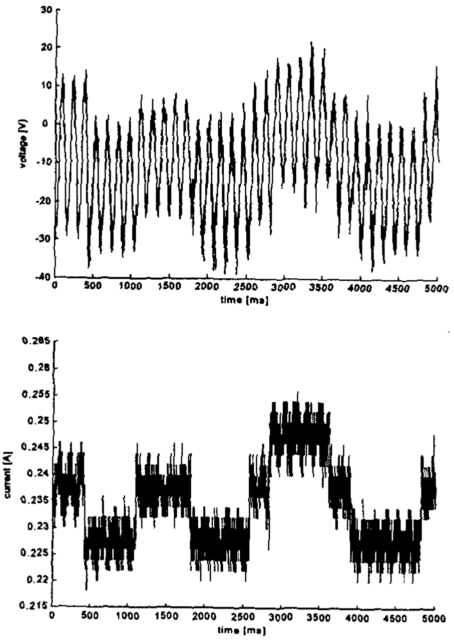


그림 8. 2[m] 매직봉의 측정된 전압 및 전류파형
Fig. 8. Measured voltage and current waveforms for 2[m] Magic rod

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

그림 7은 1[m] 매직봉의 측정된 전압과 전류 파형이고, 그림 8은 2[m] 매직봉의 측정된 전압과 전류 파형이다. 1주기는 5[sec]이다.

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

표 2. 측정된 접지저항
Table 2. Measured ground resistance

접지구성 종류	입력전류[mA]	전압[V]	접지저항[Ω]
1[m] 매직봉	239.4	28.49	119
2[m] 매직봉	236.0	19.82	84

측정된 접지저항을 Tagg식[7]과 CDEGS에 의해 계산한 값으로 비교해 보고자 한다. 접지봉의 접지저항(R)은 Tagg가 제안한 식에 따르면 다음과 같다.

$$R=\frac{\rho}{2\pi l}\left(\ln\frac{8l}{d}-1\right)\quad[\Omega] \tag{2}$$

여기서 ρ는 대지고유저항률로 계산시 283.2[Ω · m]으로 표 1의 결과를 참조하였다. l은 접지봉의 길이로 지표면과 접지봉과의 깊이 0.75[m]를 포함한다. d는 접지봉의 지름으로 0.1[m]이다.

그 결과는 표 3에 간추려 놓았다.

표 3. 접지저항 비교
Table 3. Ground resistance comparisons

접지구성 종류	SAS로 측정된 저항[Ω]	Tagg식에 의해 계산된 저항[Ω]	CDEGS에 의해 계산된 저항[Ω]
1[m] 매직봉	119	102	113
2[m] 매직봉	84	72	74

측정 시 대지의 온도, 습도 그리고 접지전극의 특성 등 여러 가지 영향을 고려하여 비교 할 때 비교적 작은 오차를 보임을 알 수 있다.

그림 9은 전위강하법으로 접지임피던스를 측정하기 위한 측정시스템의 외관도이다. 구성요소는 신호발생기(0~900[kHz] 정현파), 신호증폭기, 고역필터, 오실로스코프, 노트북으로 되어 있다. 배치는 좌측부터 함수발생기(상), 신호증폭기(하), 오실로스코프, 노트북으로 배치되어 있다.

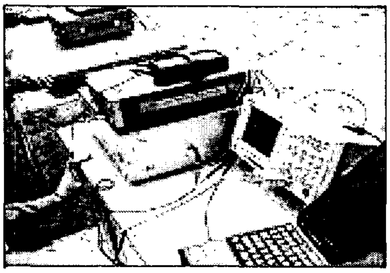


그림 9. 접지임피던스 측정시스템 외관도
Fig. 9. Outside view of the ground impedance measuring system

접지임피던스 측정은 임의로 선택한 주파수 전류를 접지극으로 주입시키면서 접지 전위와 전류를 측정하여 접지임피던스를 계산하였다. 그 결과는 표 4와 같다.

표 4. 측정된 접지임피던스
Table 4. Measured ground impedance

Frequency [Hz]	1[m] 매직봉 접지임피던스		2[m] 매직봉 접지임피던스	
	Z[Ω]	Phase [deg]	Z[Ω]	Phase [deg]
60	97.87	2.1	76.21	-5.6
180	104.77	2.9	78.62	5.4
300	105.38	3.2	75.92	0.6
420	106.48	3.5	76.15	0.8
540	106.59	4.0	75.91	0.0
900	108.23	6.0	77.17	5.3
1[k]	108.91	6.5	77.14	2.8
3[k]	124.73	11.3	89.28	12.2
5[k]	139.50	11.4	95.80	18.2
10[k]	151.37	15.1	105.02	20.4
30[k]	166.13	22.9	112.85	28.6
50[k]	174.41	24.9	112.41	29.2
100[k]	201.06	35.9	140.92	33.9

3. 접지임피던스 모델링

3.1 회로 모델링

접지임피던스는 토양의 특성, 대지 고유저항률, 온도, 습도, 접지체 모양과 접속 상태 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하므로 접지임피던스를 모델링하기는 쉽지 않다.

참고문헌[8]에서 제시한 저항 R, 인덕턴스 L, 커패시턴스 C의 조합으로 그림 10과 같다.

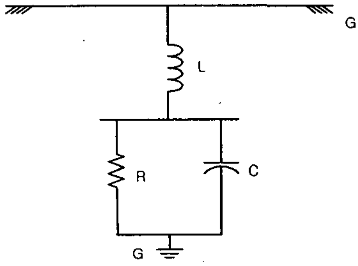


그림 10. 접지임피던스의 회로 모델
Fig. 10. Circuit model of the ground impedance

회로모델의 R, L, C를 구하는 방법은 일종의 시행착오법인 Pattern Search Method[9]을 이용한다. 그림 11과 같이 Pattern Search Method는 R, L과 C를 변화시키면서 실측된 접지임피던스 Z_{sim}값과 회로모델에서 계산된 접지임피던스 Z_{sim}값의 차가 최소화 될 때까지 반복하여 구하면 된다.

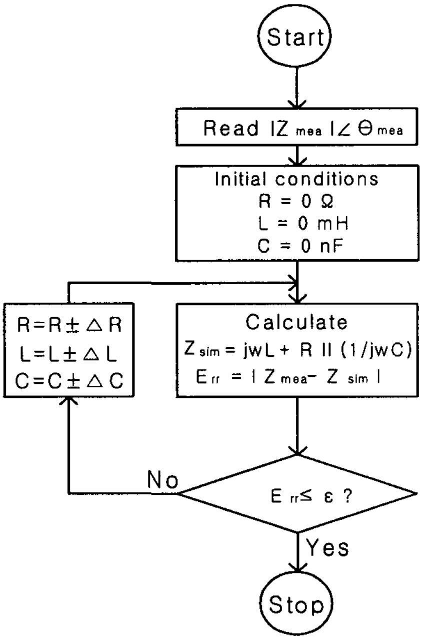


그림 11. PSM 순서도
Fig. 11. Flowchart of the pattern search method

표 5는 Pattern search method로 구한 R, L, C 값을 간추려 놓았다.

표 5. 계산된 회로모델의 파라미터
Table 5. Calculated circuit model parameters

접지종류	R[Ω]	L[mH]	C[nF]
1[m] 매직봉	104.0	0.20	0.00
2[m] 매직봉	75.0	0.15	0.05

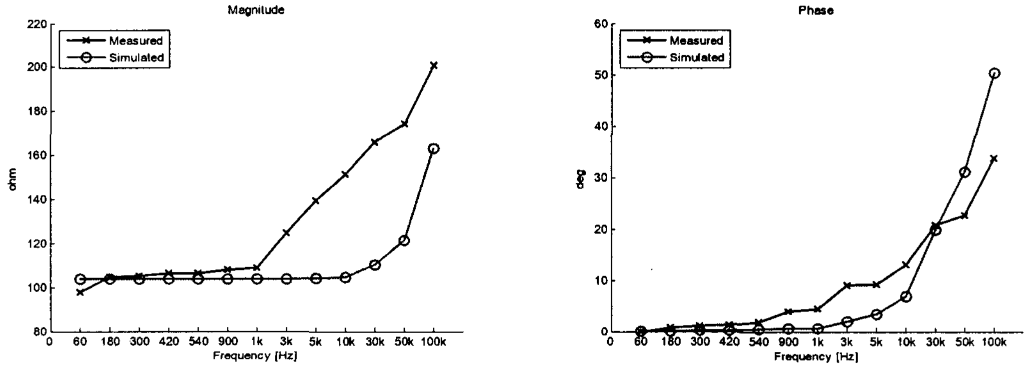


그림 12. 1[m] 매직봉의 접지임피던스 비교
Fig. 12. Ground impedance comparison for 1[m] Magic rod

그림 12와 그림 13은 Pattern search method로 구한 접지임피던스(Z_{sim})와 측정된 접지임피던스(Z_{mea})를 비교한 파형을 나타낸다.

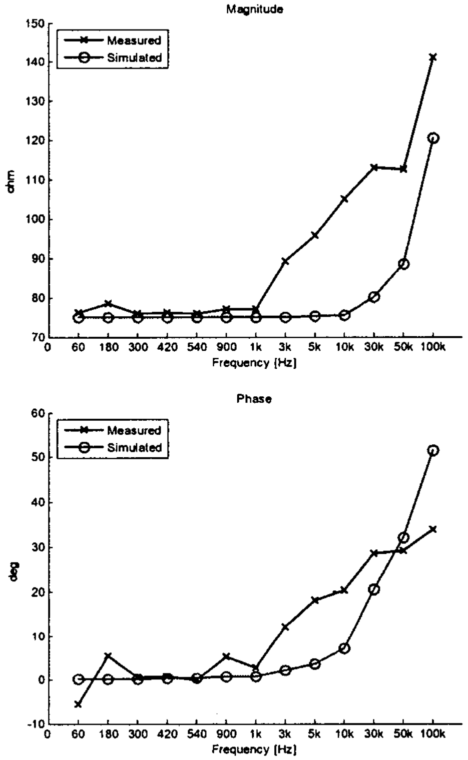


그림 13. 2[m] 매직봉의 접지임피던스 비교
Fig. 13. Ground impedance comparison for 2[m] Magic rod

3.2 전달함수 모델링

전달함수 H(z)를 z-domain에서 n차로 표현하면,

$$H(z)=\frac{B(z)}{A(z)}=\frac{b_0+b_1z^{-1}+\cdots+b_nz^{-n}}{a_0+a_1z^{-1}+\cdots+a_nz^{-n}} \quad (3)$$

으로 된다.

전달함수 계수인 ai's와 bi's는 MATLAB의 System Identification Toolbox[10]를 이용하여 구하기로 한다. ARMA(Auto Regressive Moving Average) method[11]은 N개의 데이터가 있을 때, N-n개의 방정식을 세우고 전달함수의 계수를 실측한 값과 계산된 값과의 오차가 최소화 될 때까지 반복해서 구하는 방법이다.

표 6은 ARMA method로 구한 전달함수를 간추려 놓았다.

표 6. 계산된 전달함수 모델의 파라메터
Table 6. Calculated transfer function model parameters

접지종류	전달함수 Z(s)
1[m] 매직봉	$Z(s)=\frac{1.13\times10^{-10}s^2+6.67\times10^{-5}s+1}{8.17\times10^{-14}s^2+4.21\times10^{-7}s+0.0102}$
2[m] 매직봉	$Z(s)=\frac{2.04\times10^{-12}s^2+1.57\times10^{-5}s+1}{-9.8\times10^{-14}s^2+9.66\times10^{-8}s+0.0131}$

그림 14와 15은 ARMA method로 구한 접지임피던스(Z_{sim})와 측정된 접지임피던스(Z_{mea})를 비교한 파형을 나타낸다.

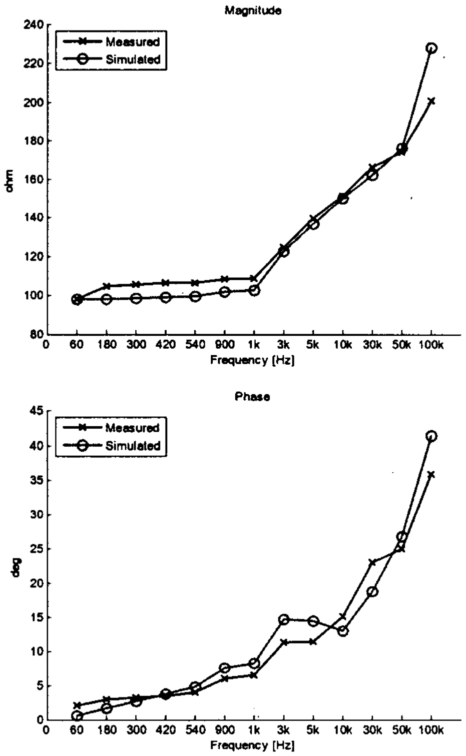
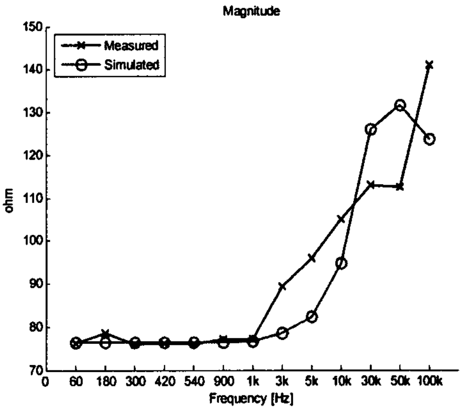


그림 14. 1[m] 매직봉의 접지임피던스 비교
Fig. 14. Ground impedance comparison for 1[m] Magic rod



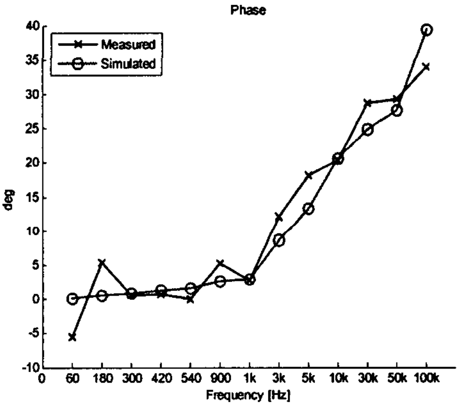


그림 15. 2[m] 매직봉의 접지임피던스 비교
Fig. 15. Ground impedance comparison for 2[m] Magic rod

3.3 회로 모델과 전달함수 모델의 오차 비교

접지 임피던스 모델을 회로 모델과 전달함수 모델로 나타내어 비교해 보았고 모델들로 계산한 값과 실측된 값과의 오차를 각각 구해 보았다.

$$E_{rr} = \sum_{f=60}^{100000} | Z_{mea} - Z_{\sim} | \tag{4}$$

여기서 Z_{mea}는 측정된 접지임피던스의 크기와 위상이고, Z_{sim}는 회로모델이나 전달함수 모델의 계산된 접지임피던스의 크기와 위상이다.

표 7에 두 모델의 오차를 간추려 놓았다.

표 7. 회로 및 전달함수 모델의 오차비교
Table 7. Error comparisons for the circuit and the transfer function model

접지 종류	회로 모델의 오차	전달함수 모델의 오차
1[m] 매직봉	271.41	80.18
2[m] 매직봉	153.63	89.07

4. 결 론

배전계통에서 매직봉 접지극이 쓰이고 있다. 접지극에는 상용 주파수뿐만 아니라 고조파 성분의 전류가 흐르므로 주파수에 대한 함수로 접지임피던스 특성을 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 Wenner 4전극법으로 대지 저항률을 측정하였고, 3점 전위강하법으로 접지저항 및 접지임피던스 측정시스템을 구성하여 접지저항과 접지임피던스를 측정하고 주파수 응답특성을 살펴보았다. 실측한 접지임피던스는 Pattern search법으로 회로모델을, ARMA method로 전달함수 모델로 등가화 시켜 비교하였다. 주파수에 대한 접지임피던스는 대부분 저항성분으로 나타났고, 1[kHz] 이상에서는 자기인덕턴스에 의한 유도성분의 지배적인 영향으로 접지임피던스가 증가하는 현상을 보였다.

2[m] 매직봉 접지극의 경우는 회로모델의 분석결과 0.05[nF]의 용량 성분이 포함된 것을 알 수 있었다. 전달함수 모델의 경우는 회로 모델 보다는 더 오차가 적은 접지임피던스를 구할 수 있었다.

본 논문에서 제시한 접지임피던스 모델링 기법으로 접지시스템의 주파수 응답특성을 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

(1) "매직 접지봉 사양서", 동양 산전(주), 2002.
(2) F.A. Wenner, "A Method of Measuring Resistivity", National Bureau of Standards, 1916.
(3) Digital Earth Tester Model MEGGER DET 2/2", AVO International Ltd., 2000.
(4) CDEGS User's Guide, SES Technologies Ltd., 2003.
(5) IEEE std 81-1983, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potential of a Ground system", IEEE Inc., 1983.
(6) "Instruction Manual for ABEM Transmeter ASA4000", ABEM Instrument Inc. Sweden,1999.

[7] G.F. Tagg, "Earth Resistances", London Ltd., 1964.
[8] I.F. Gonos, F.V. Topalis, I.A. Stathopulos, "Transient impedance of grounding rods", International Symposium on High Voltage Engineering, Vol 2, pp272-275, 1999.
[9] J.A. Cadow and H.R. Martens, "Discrete-time and Computer Control System", Prentice-Hall Inc., 1970.
[10] MATLAB User's Guide,"System Identification Toolbox", Math Work, 2002.
[11] L. Ljung, "System Identification", Prentice Hall, 1999.

◇ 저자소개 ◇

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

진성은(陳聖恩)
1980년 1월 8일생. 2005년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

이주홍(李柱洪)
1978년 10월 23일생. 2005년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

김유준(金有寯)
1982년 7월 1일생. 2005년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

최종기(催鍾基)
1969년 2월 1일생. 1992년 동국대학교 전기 공학과 졸업. 1995년 홍익대학교 전기기제어공학과 석사. 1995년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통 연구실 선임연구원.

백남웅(白南雄)
1955년 1월 9일생. 1978~1989년 진영전기 기술이사. 1989~1996년 미광전업 전무이사. 1997년~현재 동양산전(주) 대표이사, 한국 접지기술 연구소장. 접지프로젝트그룹 특별위원.