

배전계통에 사용되는 동봉 접지전극의 접지 임피던스 특성 분석

(Ground Impedance Characteristics Analysis of a Copper Rod-type Grounding Electrode used for Electric Distribution Systems)

김경철* · 이주홍 · 진성은 · 오정석 · 박상영 · 최종기 · 김유준

(Kyung-Chul Kim · Joo-Hong Lee · Seong-Eun Jin · Jung-Suk Oh
· Sang-Young Park · Jong-Ki Choi · You-June Kim)

요 약

접지 시스템은 전기설비의 기준 전위점을 확보할 뿐만 아니라 대지에 낮은 저항으로 고장 전류를 흐르게 한다. 주파수에 대한 함수로 접지임피던스는 고장전류가 넓은 범위의 주파수를 포함하기 때문에 접지 성능을 평가하는데 필요하다. 동봉은 배전계통에서 가장 많이 쓰이는 접지 전극이다. 본 논문에서는 동봉의 접지임피던스를 주파수 60[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. A copper rod electrode is the most commonly used grounding electrode in electric distribution systems. In this paper, the ground impedance of copper rods has been measured in frequency ranging from 60[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, Copper rod, Frequency characteristic, Equivalent circuit model, Transfer function model

1. 서 론

접지는 전기설비의 기준 전위점을 확보하고 대지에 낮은 저항으로 고장전류를 흘러 보내기 위해 쓰

인다. 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

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2005년 4월 20일
1차심사 : 2005년 4월 25일
심사완료 : 2005년 5월 12일

한 개일 때와 두 개를 직렬로 연결 했을 때를 고려하였다. 접지 임피던스는 주파수를 60[Hz]부터 100[kHz]까지 변화시키면서 3점 전위강하법으로 전류와 전압을 측정하여 구하였다.

측정된 접지임피던스는 회로 모델과 전달함수 모델로 하여 파라미터를 구하고, 실측한 접지 임피던스와 비교하고자 한다.

2. 접지 임피던스 측정

2.1 시험장소의 대지저항률 측정

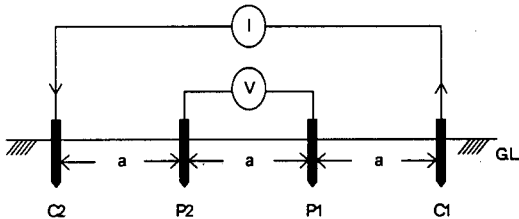


그림 1. Wenner 4 전극법
Fig. 1. 4-point Wenner Method

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

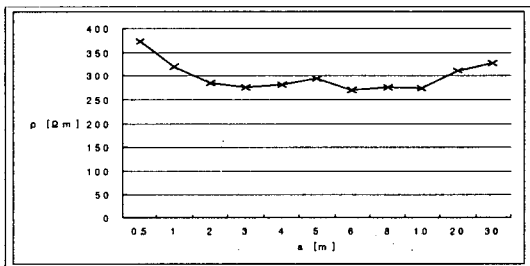


그림 2. 측정된 대지고유저항률
Fig. 2. Measured Soil resistivity

측정한 대지 고유 저항률을 토대로 접지해석 프로그램인 CDEGS(Current Distribution, Electromag-

netic 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 토양 모델 파라미터
Table 1. Two-layer soil model parameter

	대지고유저항률[Ω·m]	층 두께[m]
표토층(ρ_1)	397.9	0.44
심층(ρ_2)	283.2	∞

2.2 접지 시스템 구성

그림 3은 시험부지에 동봉($\phi 14 \times L1000$ [mm])을 매설하여 구성된 접지시스템이다. (a)는 동봉 1개를 사용한 것이고, (b)는 동봉 1[m]짜리를 직렬로 연결했다. 매설지선에 사용된 전선은 GV케이블 22[mm]이다.

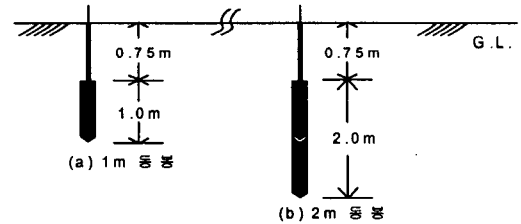


그림 3. 접지봉의 구성
Fig. 3. Ground rods layout

2.3 접지 임피던스 측정

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

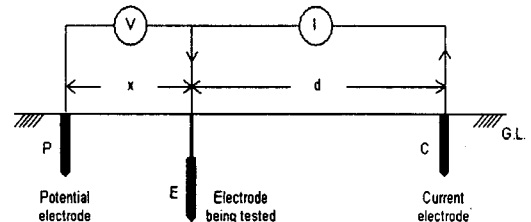


그림 4. 3점 전위강하법
Fig. 4. Three-point fall-of-potential method

3점 전위강하법에서 측정하고자 하는 접지극과

배전계통에 사용되는 동봉 접지전극의 접지 임피던스 특성 분석

전류보조극의 위치를 d[m]라고 할 때, 토양모델이 단일층 일 때는 전위 보조극의 위치는 0.618d이다. 토양모델이 수평 2층 구조 일 때는 보정계수 K에 따라 전위보조극의 위치가 변하게 된다[4].

식 (1)에 시험부지의 토양모델에 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=-0.17일 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 5는 전위강하법으로 접지임피던스를 측정하기 위한 측정시스템의 외관도이다. 측정시스템의 구성요소는 신호발생기(0~900[kHz] 정현파), 신호증폭기, 고역필터, 오실로스코프, 노트북으로 되어 있다. 그림 5에서 좌측으로부터 함수발생기(상), 신호증폭기(하), 오실로스코프, 노트북으로 배치되어 있다.

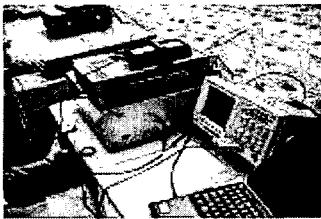


그림 5. 측정시스템 외관도
Fig. 5. Outside view of the measuring system

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

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

Frequency [Hz]	1[m] 동봉 접지임피던스		2[m] 동봉 접지임피던스	
	Z[Ω]	Phase [deg]	Z[Ω]	Phase [deg]
60	212.59	5.5	148.24	2.6
180	199.86	0.6	151.58	-2.2

Frequency [Hz]	1[m] 동봉 접지임피던스		2[m] 동봉 접지임피던스	
	Z[Ω]	Phase [deg]	Z[Ω]	Phase [deg]
300	195.83	0.8	145.34	-1.2
420	195.17	1.7	145.32	-0.2
540	195.73	2.7	143.85	0.7
900	195.79	5.0	145.07	3.6
1k	197.92	5.0	145.07	3.6
3k	225.33	10.5	161.94	8.9
5k	248.00	15.3	178.41	13.4
10k	269.31	28.1	186.85	24.3
30k	290.41	32.9	137.60	31.9
50k	294.24	35.4	207.20	32.8
100k	355.56	54.7	262.57	50.7

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 접지임피던스를 모델링하기는 쉽지 않다.

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

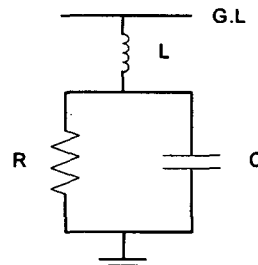


그림 6. 접지임피던스의 회로 모델
Fig. 6. Circuit model of the ground impedance

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_{mea} 값과 회로모델에서 계산된 접지임피던스 Z_{sim} 값의 차가 최소화될 때까지 반복하여 구하면 된다.

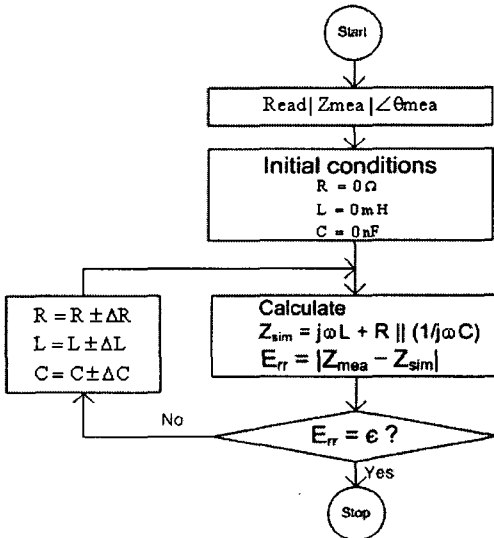


그림 7. PSM 순서도
Fig. 7. Flowchart of the pattern search method

표 3 은 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]
1[m] 동봉	195.0	0.40	0.0
2[m] 동봉	145.0	0.33	0.2

그림 8과 그림 9는 Pattern search method으로 구한 접지임피던스(Z_{sim})와 측정된 접지 임피던스(Z_{mea})를 비교한 파형을 나타낸다. 그림에서 X축은 주파수[Hz]이고, Y축은 Ohm과 Degree를 나타낸다.

3.2 전달함수 모델링

식 (2)는 전달함수 $H(z)$ 를 z -domain에서 n 차로 표현하고 있다.

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

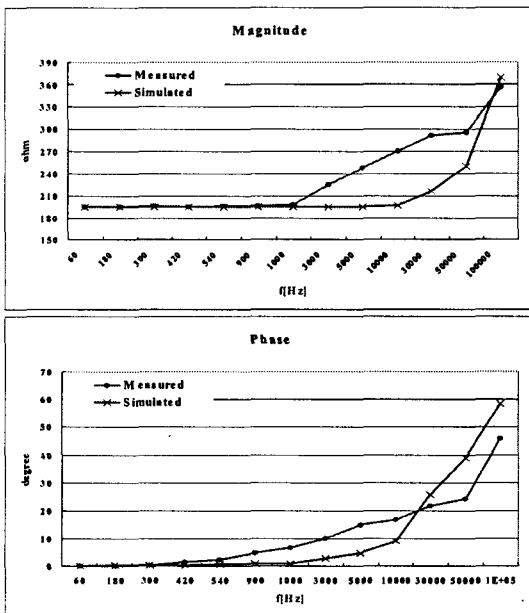


그림 8. 1(m)동봉의 접지임피던스 비교
Fig. 8. Ground impedance comparison for 1(m) copper rod

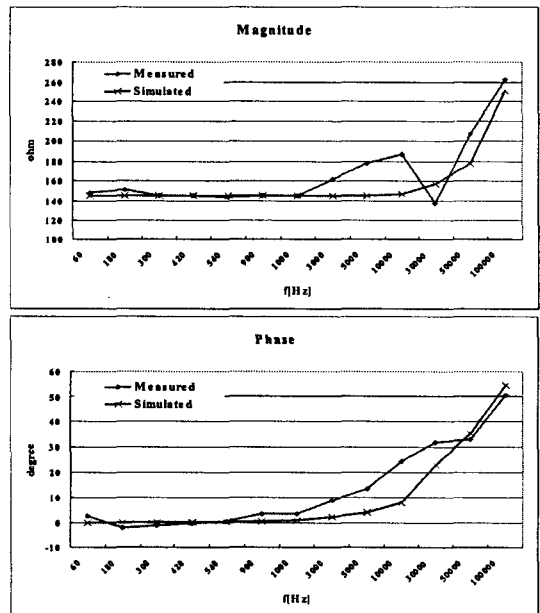


그림 9. 2(m) 동봉의 접지임피던스 비교
Fig. 9. Ground impedance comparison for 2(m) copper rod

배전계통에 사용되는 동봉 접지전극의 접지 임피던스 특성 분석

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

접지 종류	전달함수 Z(s)
1[m] 동봉	$\frac{1.937 \times 10^{-12} s^2 + 1.335 \times 10^{-5} s + 1}{-4.965 \times 10^{-14} s^2 + 2.52 \times 10^{-8} s + 0.0047}$
2[m] 동봉	$\frac{1.157 \times 10^{-13} s^2 + 4.7 \times 10^{-6} s + 1}{-1.12 \times 10^{-14} s^2 + 7.48 \times 10^{-9} s + 0.00674}$

그림 10과 그림 11은 ARMA method로 구한 접지 임피던스(Z_{sim})와 측정된 접지임피던스(Z_{mea})를 비교한 파형을 나타낸다.

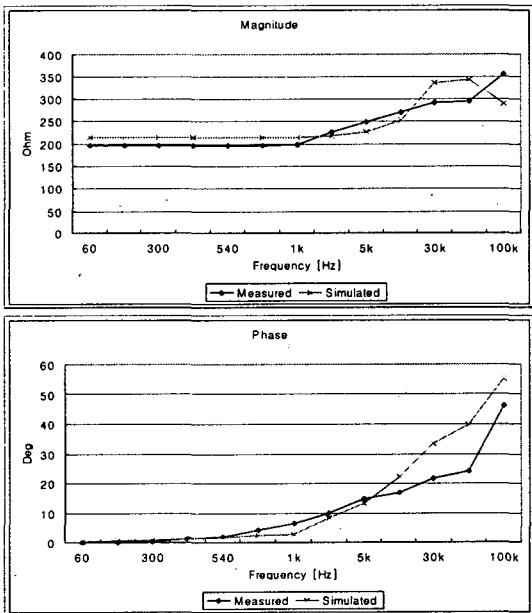


그림 10. 1(m) 동봉의 접지임피던스 비교
Fig. 10. Ground impedance comparison for 1(m) copper rod

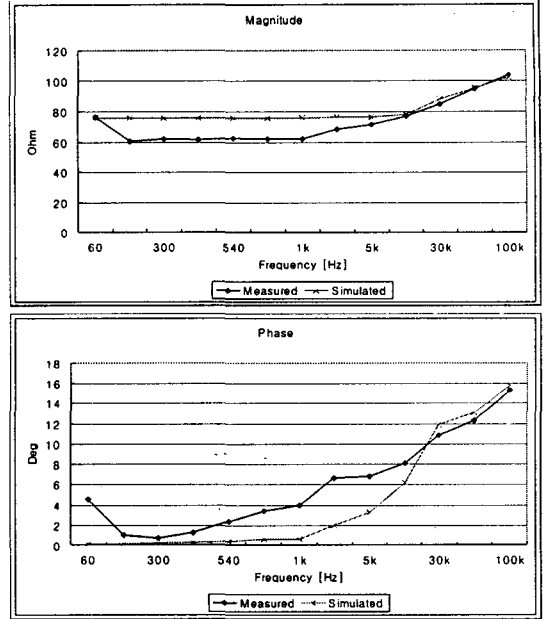


그림 11. 2(m) 동봉의 접지임피던스 비교
Fig. 11. Ground impedance comparison for 2(m) copper rod

3.3 회로모델과 전달함수 모델의 오차 비교

접지임피던스 모델을 회로모델과 전달함수 모델로 나타내었는데 두 개 모델의 오차를 구해 보았다.

$$E_{rr} = \sum_{f=60}^{100000} |Z_{mea} - Z_{sim}| \quad (3)$$

식 (3)에서 Z_{mea} 는 측정된 접지임피던스의 크기와 위상이고, Z_{sim} 은 회로모델이나 전달함수 모델의 계산된 접지임피던스의 크기와 위상이다. 표 5는 두 모델의 오차를 간추려 놓았다.

표 5. 회로 및 전달함수 모델의 오차비교
Table 5. Error comparisons for the circuit and the transfer function model

접지 종류	회로모델의 오차	전달함수 모델의 오차
1[m] 동봉	313.9	329.9
2[m] 동봉	163.3	157.82

4. 결 론

배전계통에서 동봉 접지극은 많이 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 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. 길이 2[m] 동봉 접지극의 경우는 회로 모델의 분석결과 0.2[nF]의 용량 성분이 포함된 것을 알 수 있었다. 전달함수 모델의 경우 차수를 높이면 실측과 오차가 적은 접지임피던스를 구할 수 있을 것으로 사료되었다.

본 논문에서 제시한 접지임피던스 모델링 기법으로 접지시스템의 주파수 응답특성을 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 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) CDECS User's Guide", SES Technologies Ltd., 2003.
- (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, pp272-275, 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, 2002.
- (8) 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.

이주홍 (李柱洪)

1978년 10월 23일생. 2005년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 홍익대학교 전력계통 연구실 석사과정.

진성은 (陳聖恩)

1980년 1월 8일생. 2005년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

오정석 (吳政錫)

1950년 9월 13일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2003년 충남대학교 산업대학원 졸업. 1977~2004년 조달청. 2004년~현재 조달청 IT 과장.

박상영 (朴相泳)

1976년 8월 7일생. 2003년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2004년~현재 홍익대학교 전력계통 연구실 석사과정.

최종기 (崔鍾基)

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

김유준 (金有鴈)

1982년 7월 1일생. 2005년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 홍익대학교 전력계통 연구실 석사과정.