

가변주파수 인버터를 이용한 접지임피던스의 새로운 측정기법

論 文

53C-5-4

A Novel Method for Measuring the Ground Impedance using Variable Frequency Inverter

李 福 熙 · 嚴 柱 弘

(Bok-Hee Lee and Ju-Hong Eom)

Abstract - In order to analyze the frequency dependance of ground impedance in grounding grids for lightning and surge protection, a novel method for measuring the ground impedance as a function of frequency were experimentally investigated. The experiments were carried out in rectangular grounding grids with 6×8 conductors of 22 mm² buried at a depth of 0.5 m. The test current was injected by the variable frequency inverter whose frequency is linearly controlled for the established period in the range of 5~500 kHz. The amplitude and phase of ground impedance were calculated from the waveforms of the test current and ground potential rise measured by the band-pass filter tuned in a specific frequency. The frequency dependence of ground impedance was mainly caused by the inductive current flowing through grounding conductors over the frequency of 100 kHz. The proposed measurement method of ground impedance would be applicable to evaluate the transient response characteristics in lightning protection grounding systems.

Key Words : 접지시스템, 접지임피던스, 뇌보호 설비, 접지임피던스의 주파수의존성, 접지임피던스 측정기

1. 서 론

접지시스템에 고장전류가 흐르면 접지전극의 전위가 상승하게 되어 인접한 설비에 위해를 가져올 수 있다. 접지시스템이 소규모이거나 시설장소의 대지저항률이 큰 경우에 접지임피던스는 대부분 저항성분이므로 상용 접지저항측정기를 사용하여 측정한 접지저항이 접지성능을 평가하는 주요 지표가 될 수 있다. 하지만 접지시스템의 규모가 크거나 접지저항이 대단히 작아서 상대적으로 리액턴스 성분이 큰 값을 가지는 경우에는 단순한 접지저항으로 접지시스템의 성능을 평가하는 방법은 정확성이 떨어진다. 뇌보호설비의 접지와 같이 접지전극에 흐르는 전류가 뇌서지와 같이 빠른 상승시간을 가지는 높은 주파수 성분을 포함하는 경우에는 접지저항보다는 접지임피던스를 측정하여 접지시스템의 리액턴스 성분을 분석하여 접지시스템의 성능평가의 지표로 삼는 것이 바람직하다.[1][2] 일반적인 저항기의 경우 온도변화나 주파수의 변동에 따라 저항 또는 임피던스는 어느 정도 변화하며, 그 변화정도를 기존의 데이터나 실험식 등을 통하여 예측하는 것이 가능하다. 하지만 접지시스템에서는 여러 접지도체들이 접속되어 있으며 토양의 특성, 대지저항률, 대지의 함습 정도 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하므로 접지임피던스의 변동을 수식적으로나 정량적으로 분석하기는 어렵

다.[3] 또한 현재 접지저항 측정기로 사용되는 상용 제품은 대부분 고정주파수의 측정전류를 발생시키므로 주파수에 따른 접지임피던스의 변동특성을 평가할 수 없으며, 접지임피던스의 주파수의존성과 같은 특성의 분석이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 뇌서지 전압이나 개폐서지전압에 대한 접지시스템의 특성을 정확하게 평가할 수 있는 기법을 제안할 목적으로 접지임피던스의 주파수 의존성에 대한 연구를 수행하였다. 가변주파수 인버터를 제작하여 5~500 [kHz]의 주파수범위에서 접지임피던스를 측정하는 새로운 방법을 제시하였으며, 접지임피던스의 크기 및 위상을 토대로 접지임피던스를 저항성분과 리액턴스성분으로 분석하였다.

2. 측정장비 및 방법

접지임피던스의 측정과 주파수 의존성 분석에 적합한 시험 전류를 인가하기 위하여 그림 1과 같이 가변주파수 인버터(variable frequency inverter : V-F 인버터)를 제작하였다. 인버터의 구성은 full-bridge 정류부와 평활용 필터부, IGBT 구동부로 이루어져 있으며, 출력 V_{out} 은 단상 구형파 전압이다. IGBT를 이용한 가변주파수 인버터는 주파수 및 출력전압의 조절이 용이하며 구조가 비교적 간단한 특징을 가진다.[4][5] 또한 출력은 3 [kW]로 접지임피던스 측정에 필요한 충분한 시험전류를 인가할 수 있도록 하였다.

인버터의 구동을 위한 제어회로는 논리소자 및 photo-coupler를 이용하여 그림 2와 같이 구성하였으며, 이 회로의 기준신호는 그림 3과 같이 전압-주파변환기를 사용하여 발생

* 正 會 員 : 仁荷大學 電子電氣工學部 教授 · 工博

** 正 會 員 : 基礎電力研究院 研究員 · 工博

接受日字 : 2003年 5月 14日

最終完了 : 2004年 3月 25日

시킨다. VR_2 를 변화시킴으로써 출력전압의 주파수 f_{out} 을 5~500 [kHz]의 범위에서 가변할 수 있다. 전압-주파수 변환기에서 발생된 5 [V]의 구형파 신호는 그림 2의 IGBT 제어 회로의 입력으로 들어가며 주파수 대역은 C_t 와 VR_1 에 의해 나타나는 E_t 및 VR_2 에 의해 식 (1)과 같이 된다.

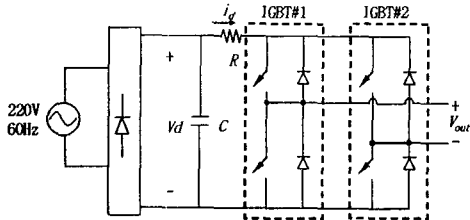


그림 1. 가변주파수 인버터의 구성
Fig. 1. Configuration of the V-F inverter

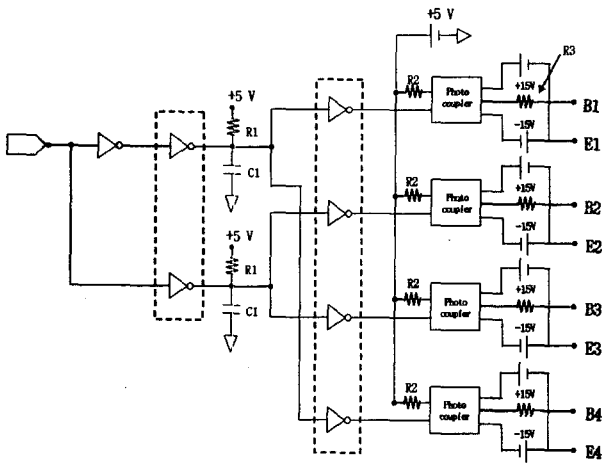


그림 2. IGBT 제어회로
Fig. 2. Control circuit for driving the IGBTs

$$f_{out} = \frac{E_t}{10 R_t C_t} \text{ [Hz]} \quad (1)$$

$E_t=1$ [V] 일 때 풀 스케일로 동작하며 최대발진주파수는 500 [kHz]정도이다.[6]

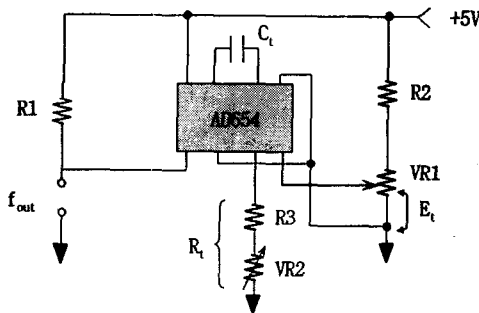


그림 3. 전압-주파수 변환기 회로
Fig. 3. Circuit diagram of the V-F converter

전위강화법을 이용한 접지임피던스의 측정회로를 그림 4에 나타내었으며, 측정전류는 설정된 시간동안 주파수제어가 선형적으로 이루어지는 인버터를 사용하여 인가하였다. 그림 4에서 E전극과 C전극 사이에 P전극을 설치하여 접지저항을 측정하는 61.8 % 법을 통상 전위강화법이라 한다[7]. 61.8 % 법을 적용하는 전위강화법은 특히 대지구조가 균일하지 않거나 고주파에 대해서 전류인가선과 전위검출용 리드선 사이의 유도결합으로 대단히 큰 오차를 유발시키게 되며[7][8], 심한 경우에는 500 [Hz]에서 200~500 %의 측정오차를 유발한 실험결과도 있다[9]. 따라서 고주파에 대해서는 피측정 전극으로부터 전류보조전극과 전위보조전극을 90°로 배치하거나 전류보조전극과 전위보조전극을 반대방향으로 배치하는 방법을 권고하고 있다[9][10]. 본 연구에서는 500 [kHz] 정도까지 측정주파수를 증가시키므로 전류보조전극과 전위보조전극을 반대방향으로 배치하여, 측정전류를 인가하는 폐회로와 접지전위상승을 측정하는 폐회로 사이에 작용하는 전자유도작용을 줄이고자 하였다.

구형파 측정전류의 주파수를 5~500 [kHz]의 범위에서 가변시키면서 측정대상인 접지전극(E)과 전류보조전극(C) 사이에 인가하여 원방 기준전위 접지전극(전위보조전극 P)에 대한 피측정 접지전극의 전위상승을 측정하였다. 측정대상 접지전극은 5×7 [m²]의 메시전극 형태로 주위토양의 대지저항률이 약 50 [Ω·m]인 부지에 0.5 [m]깊이로 시설하였다. 전위보조전극은 측정대상 접지전극으로부터 50 [m]지점에 길이 1 [m]의 봉접지전극을 사용하여 시설하였으며, 전류보조전극은 전위보조전극 반대방향으로 50 [m]지점에 길이 1 [m]의 봉접지전극 3조를 병렬로 연결하여 시설하였다. 이 때 전위보조극선을 측정하여 전위보조전극과 전류보조전극의 위치가 측정값에 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

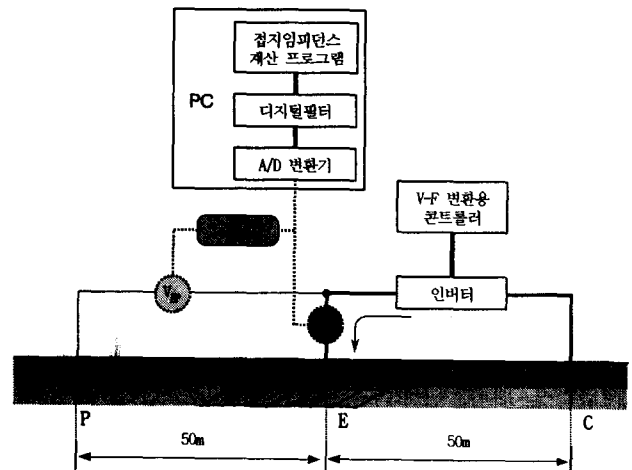


그림 4. 접지임피던스의 측정회로
Fig. 4. Circuit diagram for measuring the ground impedance

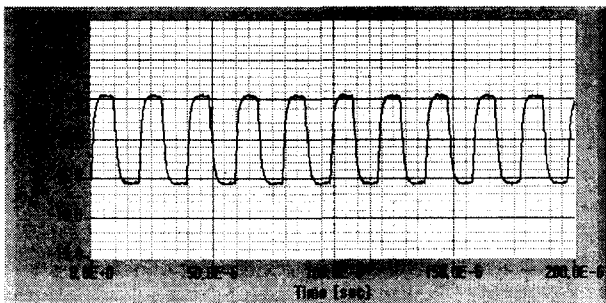
접지임피던스의 산출에 적용한 측정용 인가전류와 접지전극의 전위상승 파형은 각각 CT와 절연분리기능이 있는 능동형 프루브로 측정하였다. 측정된 파형들은 12bit, 50 [MS/s]의 A/D변환기를 사용하여 디지털 신호로 변환하였으며, 변환

된 신호들은 디지털필터를 통과시킨 후 접지임피던스의 산출에 적용하였다. 디지털필터는 2차 버터워스(Butterworth)형 대역통과필터로 설계하였으며, 검출된 구형파의 접지전위상승 및 시험전류 파형의 기본파 성분만을 통과시킨다. 즉, 구형파 전압은 기본파 성분과 기수고조파 성분의 합으로 이루어져 있으므로 대역통과필터를 사용하면 기본파 성분의 정현파 시험전류와 접지전위상승 파형을 선택하여 접지임피던스의 산출을 위한 연산이 가능하다. 접지임피던스의 크기는 접지전극의 전위상승과 시험전류의 amplitude(peak-to-peak) 값의 비 또는 rms 값의 비이며, 위상 θ 는 두 정현파의 위상차를 측정하여 산출하였다.

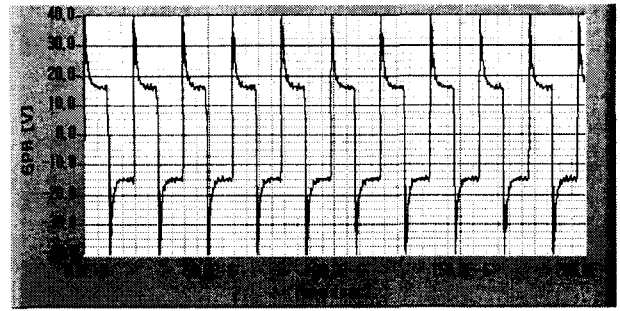
접지임피던스의 위상은 두 개의 채널에서 설정된 필터의 차단주파수가 일치되지 않으면 변동될 수 있으므로 인버터의 인가전류파형으로부터 기본파 주파수를 읽어 들여 동일한 선택도를 가지도록 프로그래밍하였다. 따라서 가변주파수 인버터의 출력주파수가 증가함에 따라 저역측 및 고역측 차단주파수가 자동으로 설정되어 선택도 2를 유지하면서 필터링 기능을 수행하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

가변주파수 인버터를 사용하여 측정용 접지전극과 전류보조전극 사이에 구형파 전압을 인가하여 측정된 시험전류의 파형과 접지전극의 전위상승파형의 예를 그림 5에 나타내었다. 접지전위상승(GPR) 파형에서 극성이 바뀔 때 높은 피크를 가지는 현상은 접지전극의 인덕턴스에 의한 영향이다. 즉, 시험전류의 미분값의 부호가 불연속적으로 변하는 지점에서 접지전위상승 파형은 급격하게 증가하고 접지전극과 주위 대지에 존재하는 정전용량에 의하여 진동하는 파형으로 감소하고 있다. 이러한 현상은 시험전류의 상승시간이 짧을수록, 접지전극에 포함된 인덕턴스 성분이 클수록 명확하게 나타난다. 주파수 50 [kHz]인 구형파 시험전류(I_T) 및 접지전위상승(V_{EP})의 기본파 성분만을 대역통과필터를 통과시켜 측정된 파형을 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 구형파 시험전류의 주파수 50 [kHz]를 받아들여 선택도 2를 가지도록 차단주파수가 자동으로 선택된 필터의 주파수 응답특성을 나타내었다.

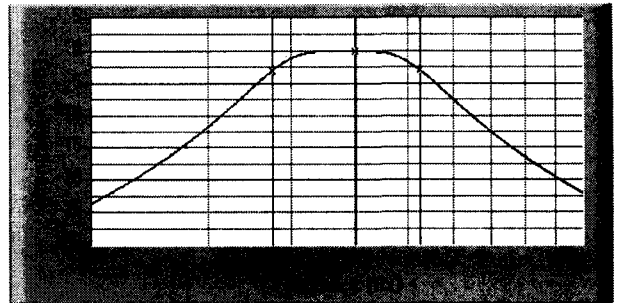


(a) 시험전류 파형

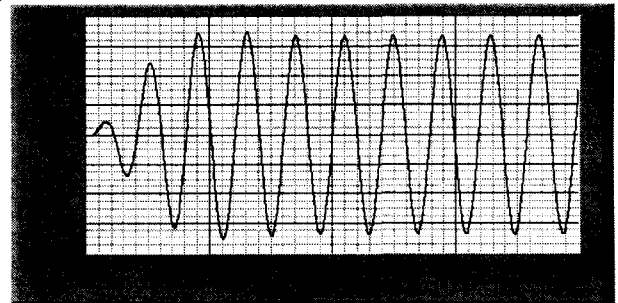


(b) 접지전위상승 파형

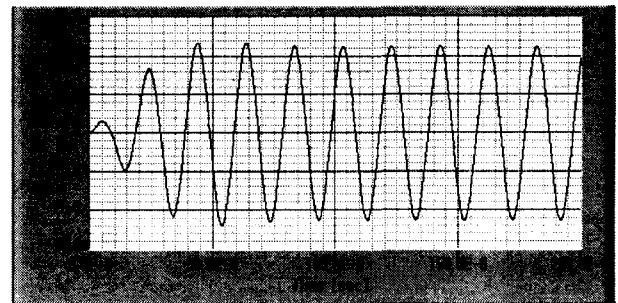
그림 5. 50 [kHz]에서 측정된 접지전위상승과 시험전류 파형
Fig. 5. Waveforms of the test current and GPR of 50 kHz



(a) 필터의 응답특성



(b) 시험전류 파형



(c) 접지전위상승 파형

그림 6. 필터를 통과한 접지전위상승과 시험전류 파형
Fig. 6. Filtered waveforms of the test current and GPR

시험전류의 기본파 성분의 크기는 약 14.1 [A_{amp}]이며, 이

시험전류에 의하여 접지전극에 나타나는 전위상승 파형의 기본파 성분의 크기는 약 47.4 [V_{amp}]으로 측정되었다. 따라서 측정된 시험전류와 접지전극의 전위상승을 amplitude 값으로 측정하여 산출한 접지임피던스의 크기는 3.4 [Ω]이다.

설정된 일정시간 동안 측정한 시험전류의 주파수를 그림 7에 나타내었다. 접지임피던스의 측정과정에서 시간에 따라 변동시켜 주는 요소는 주파수이며 주파수의 변동에 따라 대역통과 필터의 통과대역이 결정되면 접지전극의 전위상승 파형과 시험전류파형으로부터 접지임피던스의 연산에 필요한 파라미터가 얻어지며 접지임피던스의 크기와 위상이 결정된다. 접지임피던스의 크기와 위상으로부터 저항성분의 크기와 리액턴스 성분의 크기가 계산되어 그래프로 나타내어진다. 이러한 일련의 과정들은 설정한 시간동안에 누적되는 데이터에 의해 표현되며 A/D변환기와 연산 프로그램 내에서 변수를 모두 시간으로 설정하여 연속적으로 수행된다.

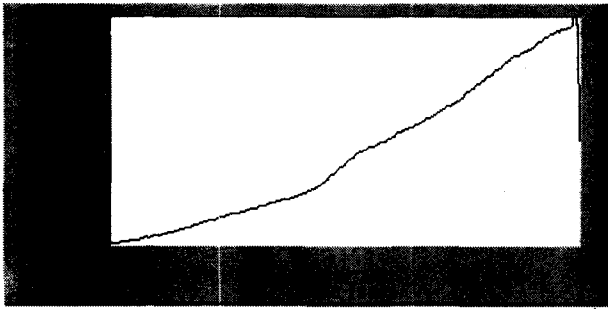
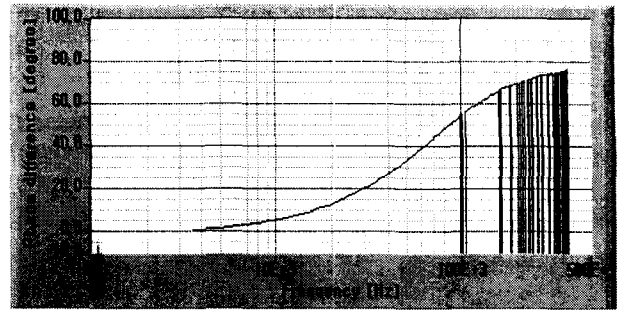
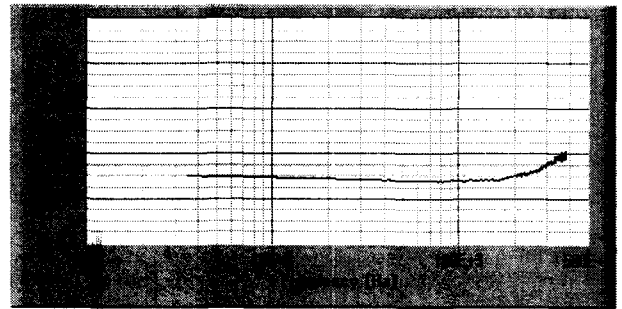


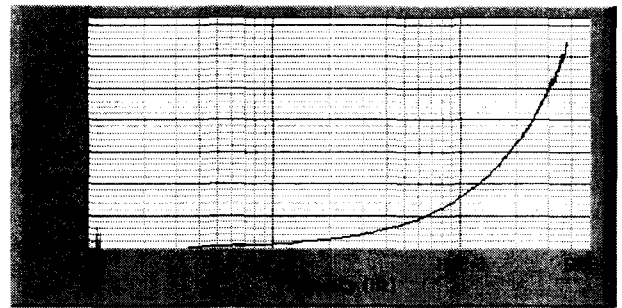
그림 7. 시험전류의 주파수 제어
Fig. 7. Frequency control of the test current



(c) 위상



(d) 접지임피던스의 저항성분

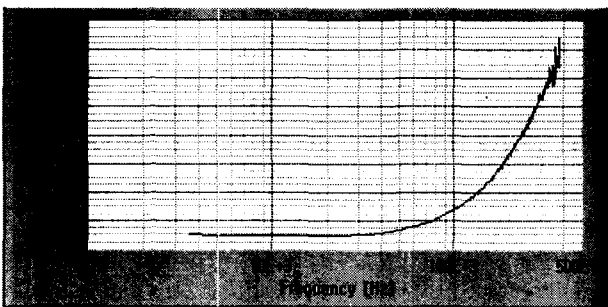


(e) 접지임피던스의 리액턴스성분

그림 8. 측정전류의 주파수에 따른 접지임피던스
Fig. 8. Ground impedances according to the frequency of test current



(a) Amplitude값으로 계산한 접지임피던스



(b) RMS값으로 계산한 접지임피던스

시간의 변화에 따라 누적된 데이터는 300 [sec]의 설정시간이 지난 후 주파수에 대한 그래프로 변환되어 그림 8과 같이 나타내어진다. 그림 8(a)는 주파수의 증가에 따라 변화하는 접지임피던스를 접지전위상승과 시험전류 파형의 amplitude값을 사용하여 연산한 결과이다. amplitude값을 이용한 연산과정은 계측기의 coupling이 DC인 경우 심한 움셋전압이 발생하여도 정확도가 좋은 장점이 있다. 그림 8(b)에는 주파수를 변화시켜 가면서 측정한 인가전류와 접지전극의 전위상승 파형의 rms값을 이용하여 접지임피던스 크기를 연산한 결과이다. rms값을 이용한 접지임피던스 크기의 그래프는 그림 8(a)의 결과와 거의 일치하고 있다. 3.5 [kHz]의 주파수에서 접지임피던스는 3.0 [Ω]에서 주파수의 증가와 더불어 약간 감소하여 20~30 [kHz]지점에서 약 2.9 [Ω]으로 최소값을 나타내었다. 이후 주파수의 증가에 따라 서서히 증가하다 약 70 [kHz]를 넘어서면서 급격히 증가하여 300 [kHz]에서는 약 12 [Ω]을 넘어서는 것으로 나타났다.

주파수가 증가함에 따라 변동하는 접지임피던스의 위상을 그림 8(c)에 나타내었다. 접지임피던스의 위상 θ 는 접지전극의 전위상승파형과 시험전류파형간의 위상차로 결정되며, 접지시스템이 유도성인 경우 정(+)의 부호를, 용량성인 경우 부(-)의 부호를 가진다. 위상은 3.5 [kHz]에서 약 1°이며 이후 점차 증가하여 10 [kHz]에서 5°가 된다. 이후 약 200 [kHz]까지 급격하게 증가하며, 200 [kHz]를 넘어서면서 어느 정도 완만한 증가율을 보인다. 그림 8(d), (e)에는 그림 8(c)에서 구한 접지임피던스의 위상각 θ 를 이용하여 접지임피던스의 저항성분과 리액턴스 성분의 변화를 나타내었다.

4. 결 론

가변주파수 인버터와 A/D변환기, 데이터 취득 및 실시간 접지임피던스 분석 프로그램을 이용하여 접지임피던스의 측정기법과 주파수의존성에 대한 실험적 연구를 수행한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 접지시스템의 고주파수 응답특성을 분석할 수 있는 효과적이며 간편한 접지임피던스 측정방법을 제안하였다.
- (2) 접지그리드에 대하여 5~500 [kHz] 주파수 범위에서 접지임피던스의 크기와 위상, 저항성분 및 리액턴스 성분을 분석한 결과 접지임피던스는 상용주파수 영역에서는 거의 접지저항값 정도이었으나 100 [kHz] 이상에서는 리액턴스 성분이 지배적이었다.
- (3) 본 실험에서 제안한 접지임피던스의 측정기법은 뇌격전류와 같이 높은 주파수를 포함하는 접지전류의 유입시 접지시스템의 과도응답특성을 평가하는데 활용될 것이다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업인프라지원 구축사업의 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] I. D. Lu, R. M. Shier, "Application of a Digital Signal Analyzer to the Measurement of Power System Ground Impedance", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 4, pp.1918~1922, 1981.
- [2] A. D. Papalexopoulos, A. P. Meliopoulos, "Frequency Dependent Characteristics of Grounding System", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 4, pp.1918~1922, 1981.
- [3] 이복희, 이승철, 접지의 핵심기초기술, 도서출판 義僖, 1999, p.64~69, 1981.
- [4] Mohan, Undeland, Robbins, Power electronics, John

Wiley & Sons, 1995, pp.626~634.

- [5] Muhammad. H. Rashid, Power Electronics, Prentice-Hall, 1993, pp.262~301.
- [6] 한경희, 황락훈, 이승환, 전력전자공학, 형설출판사, 1997, pp.129~132.
- [7] IEEE Std 81-1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, IEEE, Inc., pp.17~24, 1983.
- [8] Cheng-gang Wang, T. Takasima, T. Sakuta, Y. Tsubota, "Grounding resistance measurement using fall-of-potential method with potential probe located in opposite direction to the current probe", IEEE Trans. on PD, Vol. 13, pp.1128~1135, 1998.
- [9] J. Ma, F.P. Dawalibi, "Effects of inductive coupling between leads in ground impedance measurements using the fall-of-potential method", Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE, Vol. 1, pp.266~271, 1999.
- [10] IEEE Std 81-2-1991, IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, IEEE, Inc., pp.17~21, 1991.

저 자 소 개



이 복 희(李 福 熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기공학부 교수.
Tel. (032) 860-7398
Fax. (032) 863-5822
e-mail : bhlee@inha.ac.kr



엄 주 홍(嚴 柱 弘)

1972년 9월 5일생. 1998년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2004년 현재 기초전력연구원 연구원
Tel. (02) 871-6508
Fax. (02) 883-0827
e-mail : eommas@er.snu.ac.kr