

# 가변주파수 인버터를 이용한 접지임피던스 측정

(Measurement of Impedance of the Grounding Grid using Variable Frequency Inverter)

이복희 · 엄주홍 · 김교운

(Bok-Hee Lee · Ju-Hong Eom · Kyo-Woon Kim)

## Abstract

This paper presents a novel method for measuring the ground impedance in grounding systems. A square wave current was injected to the main grounding grid through auxiliary electrode systems. A current and ground potential rise(GPR) were measured using the band-pass filter. Ground impedance was calculated from the sinusoidal waveforms of the test current and GPR in frequency range of 20~2100Hz. Also the resistance and reactance component of ground impedance were analyzed.

액티브 성분으로 분석하였다.

## 1. 서론

접지시스템에 고장전류가 흐르면 접지임피던스에 따라 접지전극의 전위상승이 나타난다. 접지시스템이 소규모이거나 시설장소의 대지저항률이 큰 경우에 접지임피던스는 저항성분이 큰 값을 가지므로 접지저항측정기를 사용하여 측정된 접지저항이 접지성능을 평가하는 주요 지표가 된다. 하지만 접지시스템의 규모가 크거나 접지저항이 대단히 작아서 상대적으로 리액턴스 성분이 큰 값을 가지는 경우에는 단순한 접지저항으로 접지시스템의 성능을 평가하는 방법은 정확성이 떨어지므로, 접지전류가 뇌서지와 같이 빠른 상승시간을 가지는 높은 주파수 성분을 포함하는 경우에는 접지저항 보다는 접지임피던스를 측정하여 접지시스템의 리액턴스 성분을 분석한 후 성능평가의 지표로 하는 것이 바람직하다.[1][2] 일반적인 저항기의 경우 온도변화나 주파수의 변동에 따라 저항 또는 임피던스가 어느 정도 변화하며, 그 변화정도를 기존의 데이터나 실험식 등을 통하여 예측하는 것이 가능하다. 하지만 접지전극에서는 여러 접지도체들이 접속되어 있으며 토양의 특성, 대지저항률, 대지의 함습정도 등 보다 복잡한 양상을 나타내므로 접지임피던스의 변동을 수식적으로나 정량적으로 분석하기는 어렵다.[3] 또한 현재 접지저항 측정기로 사용되는 상용제품은 대부분 고정주파수의 측정전류를 발생시키므로 주파수에 따른 접지임피던스의 변동특성을 측정하기가 곤란하며, 접지임피던스의 성분분석이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 가변주파수 인버터를 제작하여 20~2100[Hz]의 주파수 범위에서 접지임피던스를 측정하는 새로운 측정방법을 제시하였으며, 접지임피던스의 크기 및 위상을 토대로 접지임피던스를 저항성분과 리

## 2. 측정장비 및 방법

접지임피던스의 측정회로를 그림 1에 나타내었다. 측정방법으로는 전위강하법을 적용하였으며, 측정전류는 가변주파수 인버터를 사용하여 인가하였다. 교류전형과 측정전류의 주파수를 20~700 [Hz]의 범위에서 가변시키면서 주접지전극(E<sub>1</sub>)과 전류보조전극(C) 사이에 인가하였을 때 접지전위상승은 주접지전극(E<sub>1</sub>)과 전류보조전극(P)간의 전위차로 측정하였다.

주접지전극은 5×7 [m<sup>2</sup>]의 메시전극 형태로 주위토양의 대지저항률이 약 50 [Ω·m]인 부지에 0.5 [m]깊이로 시설하였다. 전류보조전극은 주접지전극으로부터 28 [m]지점에 길이 1 [m]의 봉접지전극을 사용하여 시설하였으며, 전류보조전극은 45 [m]지점에 길이 1.8 [m]의 봉접지전극 2조를 병렬로 연결하여 시설하였다.

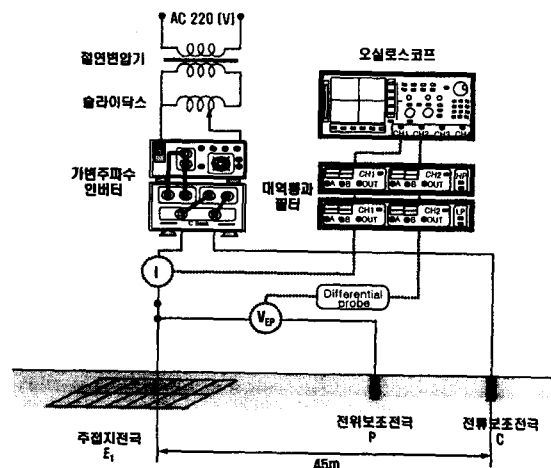


그림 1. 접지임피던스의 측정회로  
Fig.1. Circuit diagram for measuring the ground impedance

접지임피던스의 연산에 사용한 시험전류와 접지전위 상승 파형은 각각 CT와 절연분리기능이 있는 프루브로 측정하여 대역통과필터를 이용한 신호처리과정을 거친 후 구형파의 기본파 및 3고조파 성분인 정현파를 사용하였다. 즉, 구형파는 구형파의 주파수와 동일한 기본파 성분과 기수고조파 성분의 합으로 이루어져 있으므로 대역통과필터를 사용하면 기본파 성분의 정현파 시험전류와 접지전위상승 파형을 선택하여 접지임피던스의 연산이 가능하다. 접지임피던스의 크기는 접지전위상승과 시험전류의 amplitude 값과 rms 값의 비로, 위상  $\theta$ 는 두 정현파의 위상차를 측정하여 산출하였다.

접지임피던스의 측정에 적합한 전류를 인가하기 위하여 그림 2와 같이 가변주파수 인버터를 제작하였다. 인버터의 구성은 full-bridge 정류부와 평활용 필터부, IGBT 구동부로 이루어져 있으며 출력  $V_{out}$ 은 단상 교류 구형파 전압이 발생되도록 하였다. IGBT를 이용한 가변주파수 인버터는 주파수 및 출력전압의 조정이 용이하며 구조가 비교적 간단한 특징을 가진다.[4],[5] 또한 출력은 3 [kW]로 접지임피던스 측정에 필요한 충분한 시험전류를 발생시킬 수 있도록 하였다.

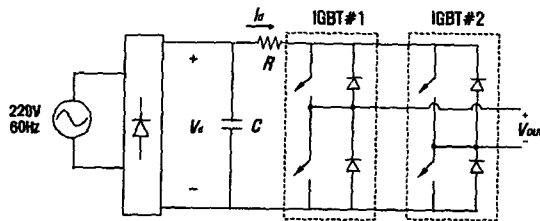


그림 2 인버터의 구성  
Fig.2 Configuration of the inverter

그림 3은 인버터의 구동을 위한 제어회로로써 논리소자 및 photo-coupler 로 구성하였다. 이 회로의 기준신호는 그림 4와 같이 연산증폭기와 비교기로 이루어진 함수발생장치의 출력전압을 사용하였으며, 가변저항 VR1의 값을 변화시켜 출력주파수를 20~700[Hz]범위에서 조정함으로써 IGBT의 스위칭을 제어하였다.

구형파 시험전류 및 접지전위상승 파형으로부터 기본파 및 3고조파 성분의 검출에는 통과대역을 자유롭게 조절할 수 있는 대역통과필터를 사용하였으며, 각각의 주파수 조절가능한 차단주파수 대역은 1 [Hz]~100 [kHz]이다. 동일한 통과대역에서 채널간 위상오차는 10 [kHz]이하에서  $\pm 0.25^\circ$ 로 시험전류와 접지전위상승 파형간의 위상차 검출에 적합하다.

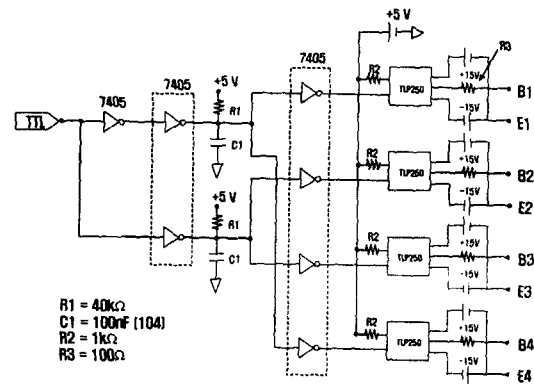


그림 3 IGBT 제어회로  
Fig.3 Control circuit for IGBT

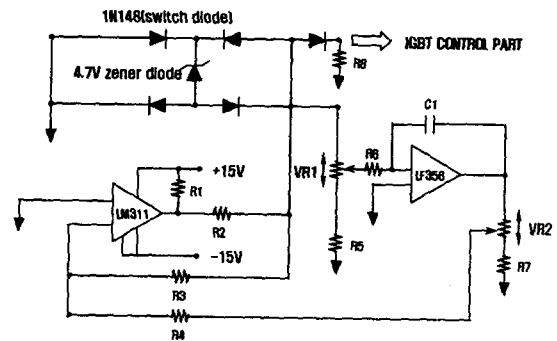
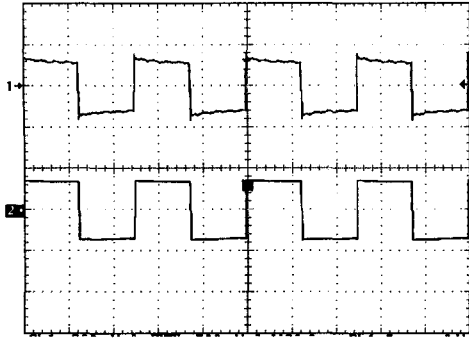


그림 4 TTL 회로  
Fig.4 Circuit diagram of TTL signal

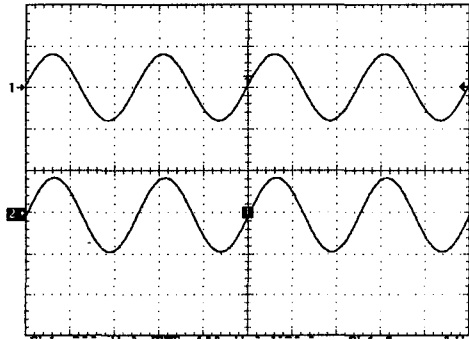
### 3. 결과 및 고찰

가변주파수 인버터를 사용하여 주접지전극과 전류보조전극 사이에 인가한 전류와 전압 파형을 그림 5에 나타내었다. 20 [Hz] 주파수를 가지는 구형파 인가전압 및 시험전류가 접지전극에 유입될 때 시험전류( $I_T$ ) 및 접지전위상승( $V_{EP}$ )의 기본파 성분만을 대역통과필터를 통하여 측정하였으며, 측정된 파형을 그림 6(a)에 나타내었다. 대역필터의 통과대역은 각 측정파형의 위상결정에 중요한 영향을 미치므로 선택도를 2.5로 동일하게 하여 통과대역을 결정하였다. 시험전류의 기본파 성분의 크기는 3.56 [A<sub>amp</sub>]이며, 이 시험전류에 의하여 접지전극에 나타나는 접지전위상승의 기본파 성분의 크기는 8.80 [V<sub>amp</sub>]로 측정되었다. 따라서 20 [Hz]에서 측정된 시험전류와 접지전위상승의 amplitude 값으로 연산한 접지임피던스의 크기는 2.47 [Ω]이다. 이 때 두 파형간의 시간지연은 그림 6(b)에 나타난 바와 같이 -0.8 [ms](진상전류)로 전류측정용 CT와 전압측정용 프루브의 위상차 -10.8°(진상전류)를 보정한 접지임피던스의 위상  $\theta$ 는 5.0°이다.

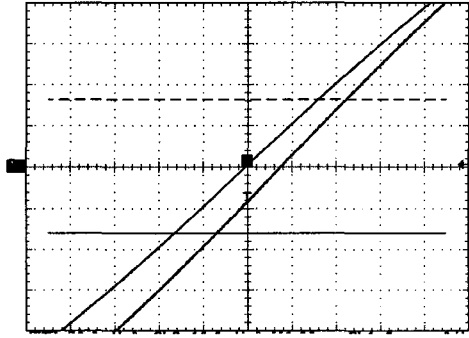


Ch1 :  $I_r$ , 2[A/div] Ch2:  $V_{ec}$ , 25[V/div], 20[ms/div]

그림 5. 20[Hz]에서 측정한 인가전류와 전압 파형  
Fig.5. Waveforms of applied current and voltage with 20Hz



(a) Ch1:  $I_r$ , 2[A/div] Ch2:  $V_{ep}$ , 5[V/div], 20[ms/div]



(b) phase difference, 1[ms/div]

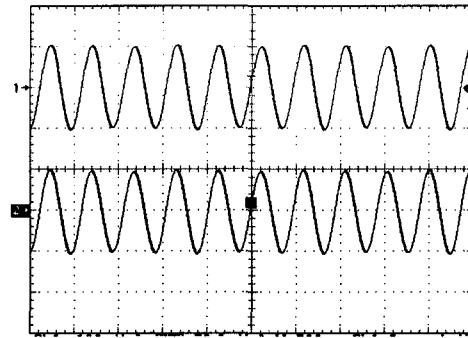
(a) 시험전류와 접지전위상승  
(b) 위상차

그림 6. 20[Hz]에서 측정한 파형  
(a) test current and GPR  
(b) phase difference  
Fig.6. Waveforms measured at 20Hz

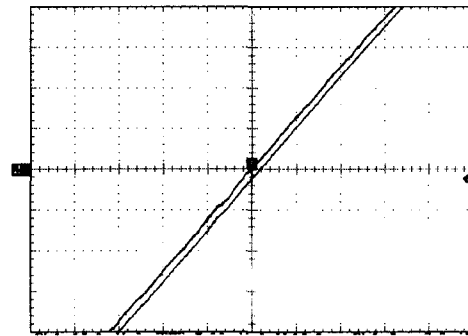
인가전류의 주파수가 20~700 [Hz]범위에서는 인버터의 주파수 가변을 통하여 접지임피던스를 측정하였으며 보다 높은 주파수 대역의 접지임피던스 측정을 위해서 구형파의 3고조파 성분을 이용하였다. 그림 7에 나타낸 2100 [Hz]의 주파수는 700 [Hz] 주파수의 3배수로써 대

역통과 필터의 통과대역을 구형파 주파수의 3배를 기준으로 선택되는 기본파를 이용한 측정과 동일하게 2.5가 되도록 통과대역을 설정하여 측정하였다. 따라서 2100 [Hz]의 주파수를 가지는 구형파 인가전압 및 시험전류가 접지전극에 직접 유입된 것이 아니라 700 [Hz] 구형파의 3고조파 성분에 의한 측정이며, 시험전류 및 접지전위상승이 기본파의 약 1/3정도의 크기로 나타나게 된다. 시험전류와 접지전위상승 파형의 크기가 크게 감소하는 경우에 접지임피던스의 측정은 오차가 증가할 수 있으므로[6][7] 3고조파를 이용하는 900~2100 [Hz] 대역에서의 측정에서는 인가전압을 높여 측정되는 시험전류와 접지전위상승이 20~700 [Hz] 대역에서의 측정값의 2/3정도로 하였다.

700 [Hz] 주파수를 가지는 측정전류 및 접지전위상승의 3고조파 성분인 2100 [Hz] 주파수만을 대역통과필터를 통하여 측정하여 그림 6(a)에 나타내었다. 시험전류의 3고조파 성분의 크기는 1.74 [A<sub>amp</sub>]이며, 이 시험전류에 의하여 접지전극에 나타나는 접지전위상승의 크기는 4.75 [V<sub>amp</sub>]으로 측정되었다. 두 파형간의 시간지연은 0.002 [ms](지상전류)로 보정된 위상  $\theta$ 는 12.3°이다.



(a) Ch1:  $I_r$ , 1[A/div] Ch2:  $V_{ep}$ , 2.5[V/div], 0.5[ms/div]



(b) phase difference, 1[ms/div]

(a) 시험전류와 접지전위상승  
(b) 위상차

그림 7. 2100[Hz]에서 측정한 파형  
(a) test current and GPR  
(b) phase difference  
Fig.7. Waveforms measured at 2100Hz

측정전류와 접지전위상승 파형으로부터 연산한 접지임피던스의 크기와 위상  $\theta$ 를 그림 8에 나타내었다. 접지임피던스의 크기는 amplitude값 또는 rms값으로 측정된 결과는 거의 같았으며, 주파수의 변화에 따라 약 2.45 [Ω]에서 2.72 [Ω]까지 변동되는 값으로 측정되었다. 위상  $\theta$ 는 5.0°에서 12.3°까지 증가하는 것으로 나타났다. 그림 8에 나타낸 접지임피던스의 크기와 위상  $\theta$ 를 이용하여 접지임피던스를 저항성분과 리액턴스성분으로 구분하여 그림 9에 나타내었다.

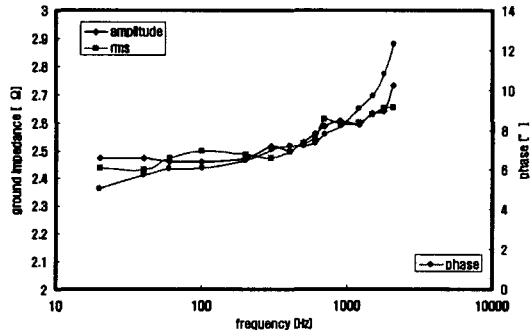


그림 8. 주파수에 따른 접지임피던스의 크기와 위상  
Fig.8. Magnitude and phase of the ground impedance measured as a function of frequency

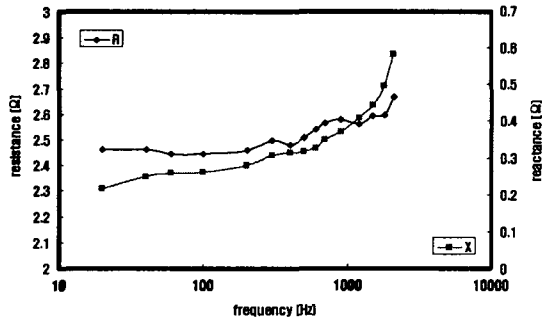


그림 9. 접지임피던스의 저항성분과 리액턴스성분  
Fig.9. Resistance and reactance of Measured ground impedance

측정된 접지임피던스에서 저항성분의 값이 약 2.46~2.66 [Ω] 정도의 범위에서 측정전류의 주파수에 따라 약간 증가하였다. 리액턴스 성분은 저항성분에 비하여 상대적으로 작은 값을 가지나 0.22~0.58 [Ω]으로 증가폭이 저항성분보다 크게 나타났다. 리액턴스 성분의 증가폭이 큰 접지전극에서는 접지전류의 주파수가 높거나 뇌격전류와 같이 빠른 상승시간을 가지는 서지전류의 유입시 접지시스템의 응답특성이 상용주파수 영역과는 다르며

리액턴스 성분의 영향을 크게 받게 됨을 알 수 있다. 또한 주파수가 20~2100 [Hz]의 대역에서 변동할 경우 저항성분의 변동폭이 약 10% 정도에 이르는 것은 일반적인 저항기의 경우와는 차이가 있다. 이러한 특성은 접지전극이 여러 접지도체들의 결합으로 이루어진 메시전극이며 대지에 매설되어 있으므로 토양의 특성에 대한 영향을 지배적으로 받기 때문인 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

가변주파수 인버터와 대역통과필터를 이용한 접지임피던스 측정실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대규모 접지시스템의 접지임피던스 측정에 적합하며 주파수를 가변시켜 접지임피던스의 크기와 위상을 측정할 수 있는 측정방법을 제안하였다.
- (2) 5×7 [m<sup>2</sup>]의 접지그리드에 대하여 20~2100 [Hz]의 주파수 범위에서의 접지임피던스의 저항성분 및 리액턴스 성분은 주파수에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내었다.
- (3) 본 실험에서 제안한 접지임피던스의 평가방법은 뇌격전류와 같이 높은 주파수를 포함하는 접지전류의 유입시 접지시스템의 응답특성을 예측하는데 활용할 수 있다.

#### 참고 문헌

- [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 義積, 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] 이복희, 엄주홍, 이승철, "저역필터를 이용한 수변전실 접지저항의 새로운 측정방법", Trans. KIEE., Vol. 50C, No. 8, pp.387~393, 2001.
- [7] 이복희, 엄주홍, 김성원, "측정전류전이법을 이용한 운전중 인 접지시스템의 접지저항 측정", Trans. KIEE., Vol. 51C, No. 8, pp.347~353, 2002.