

광대역 접지임피던스 측정기의 설계 및 제작

길경석^{1,a}, 박대원¹, 장운용¹, 한주섭², 길형준³

¹ 한국해양대학교 전기전자공학부

² 한국해양대학교 부설산업기술연구소

³ 한국전기안전공사 전기안전연구원

Design and Fabrication of a Wideband Ground Impedance Meter

Gyung-Suk Kil^{1,a}, Dae-Won Park¹, Un-Yong Jang¹, Ju-Seop Han², and Hyoung-Jun Gil³

¹ Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

² Research Institute of Industrial Technology, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

³ Electrical Safety Research Institute, Korea Electrical Safety Corporation, Gapyeong 477-814, Korea

(Received May 7, 2010; Revised September 3, 2010; Accepted September 7, 2010)

Abstract: The basic performance of the ground system is evaluated as the ground resistance by applying low frequency current below 1 kHz. However, characteristics of the ground system should be analyzed by high frequency current up to 1 MHz since transient currents having a few hundred kHz component flow during a line-to-ground fault and/or a lightning strike. This paper deals with the design and fabrication of a wideband ground impedance meter (WGIM) which measures the impedance of ground systems in ranges from 65 Hz to 1.28 MHz. Also, a noise elimination algorithm using a digital bandpass filter is proposed. The maximum error of the WGIM is 4.91% in the measurement frequency range.

Keywords: Ground system, Ground resistance, Transient current, Wideband ground impedance meter, Noise elimination algorithm, Digital bandpass filter

1. 서론

접지는 전기회로에서 기준 전위를 정하거나 고장 전류를 대지로 흘려보내 전위상승을 억제하여 기기 및 설비를 보호하고 인체의 감전을 예방하는 역할을 한다 [1,2]. 접지시스템은 접지선과 접지극으로 구성되며, 접지성능은 접지저항으로 평가되고 있다 [3].

현재 접지저항은 1 kHz이하의 저주파 구형파 또는 정현파 전류를 대지에 흘려 전압과 전류의 비로부터 산출한다 [4-7]. 그러나 전로의 지락이나 낙뢰 시에는 수 kHz~수 백 kHz의 주파수 성분을 가지는 과도전류가 흐르게 되므로, 이 때 저주파 전류로 측정된 접지저항으로 계산되는 대지전위의 상승과는 상당한 차

이가 있다 [8]. 이는 접지시스템이 고주파 영역에서는 인덕턴스와 캐패시턴스 성분에 의한 영향이 나타나기 때문이다 [9,10]. 따라서 접지저항은 저주파에서의 접지저항뿐만 아니라 수 백 kHz의 고주파 영역에서 접지임피던스로 평가되어야 한다. 또한 접지임피던스 측정 시 접지계에 존재할 수 있는 60 Hz 전원 주파수 성분 외에 각종의 외부 노이즈 간섭을 제거할 수 있는 측정 기술이 요구된다.

접지저항은 접지선에 흐르는 전류와 주파수에 의한 임피던스 영향을 무시한 순수 저항성분에 의한 성능 척도이며, 인덕턴스와 대지의 캐패시턴스 성분을 포함한 것이 접지임피던스이다 [11]. 접지계를 통하여 지락전류 I 가 유입되면, 접지극 주변의 대지에 전위상승 V 가 발생한다.

접지임피던스는 토양의 특성, 대지저항률, 온도, 습

a. Corresponding Author; kilgs@hhu.ac.kr

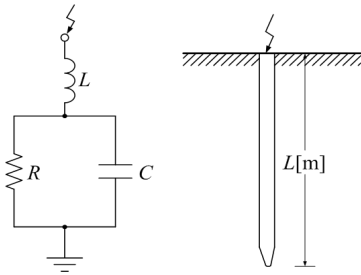


Fig. 1. Equivalent circuit of a ground rod.

도, 접지극의 모양과 접속상태 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하므로 등가회로 모델로 나타내기는 쉽지 않으나, 일반적인 가정을 통한 봉상접지극의 등가회로 모델은 아래의 그림 1과 같이 R-L-C 집중정수회로로 나타내며 접지임피던스는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 이 때 접지임피던스 Z_g 는 전위상승과 접지전류의 비 $\frac{V}{I}$ 로 정의된다.

$$Z_g = R_g + jX_g = j\omega L + \frac{\frac{R}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad [\Omega] \quad (1)$$

여기서, Z_g : 접지임피던스, R_g : 저항성분, X_g : 리액턴스 성분이다. 식 (1)에서 접지임피던스는 저항, 인덕턴스, 캐패시턴스, 주파수에 대한 함수이다 [12]. 접지계의 인덕턴스와 캐패시턴스는 가능한 적게 설계하므로 수 kHz이하의 저주파 영역에서 접지계에 미치는 영향이 없으나, 수 백 kHz의 고주파 영역에서는 큰 변화를 나타낸다.

본 논문에서는 주파수 대역 65 Hz~1.28 MHz에서 접지임피던스를 측정할 수 있는 장치의 설계 및 제작과, 측정시 외부 전원 노이즈를 제거할 수 있는 알고리즘에 대해 제안하였다.

2. 실험 방법

2.1 광대역 접지임피던스 측정기

본 논문에서 제안한 광대역 접지임피던스 측정기는 그림 2와 같이 가변주파수 정현파 전압발생부, 전력증폭부, 전압 및 전류 측정부, 신호처리부, 표시부 그리고 운영소프트웨어로 구성된다.

가변주파수 정현파 전압발생부는 마이크로프로세서와 16 bit D/A변환기 (digital to analog converter)에

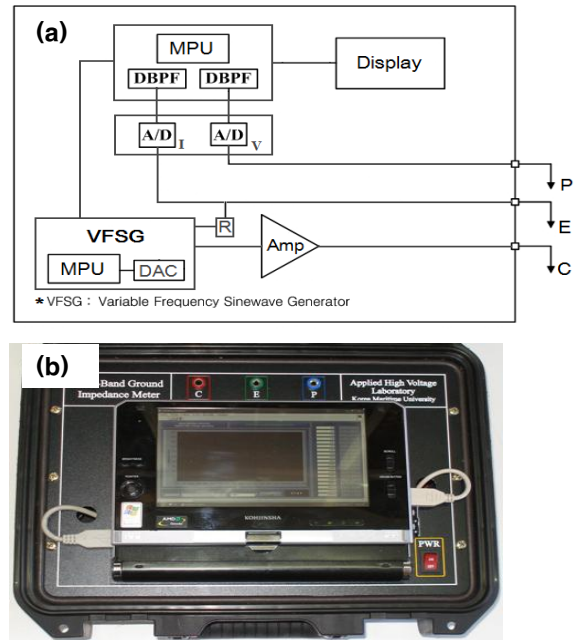


Fig. 2. The prototype WGIM; (a) configuration and (b) photograph.

의해 접지극 (E)와 전류보조극 (C)에 인가할 시험 전압 파형을 만들어 전력증폭부에 전송한다. 전력증폭부는 전압발생부에서 발생한 수 십 mV의 전압을 인체 안전하게 전압 30 V까지 증폭시키고, 낮은 출력임피던스로 접지극 (E)와 전류보조극 (C)에 최대 200 mA의 전류를 흘려보낼 수 있다. 전압 및 전류 측정부는 12 bit A/D변환기 (analog to digital)로 접지극 (E)과 전류보조극 (P)사이의 전위차와 접지극 (E)로 흐르는 전류를 측정하여 신호처리부로 전송 한다.

신호처리부는 본 장치에서 측정을 위해 인가한 주파수와 동일한 성분의 전압과 전류만을 디지털 대역통과필터로 분리하여 외부 노이즈에 의한 간섭을 제거하는 기능을 한다. 운영소프트웨어는 측정된 전압 및 전류의 비로부터 접지임피던스를 산출하며, 시험 전압, 측정 주파수 및 측정 시간 등을 제어한다.

표시부는 그래픽 디스플레이를 적용하였으며, 측정 조건과 산출한 결과를 텍스트 및 그래프로 출력한다. 시제작 접지임피던스 측정기의 동작흐름을 그림 3에 나타내었다.

측정을 개시하면 미리 입력한 주파수의 전압을 3초간 인가하며, 마지막 10주기의 전압 및 전류 파형으로부터 접지임피던스를 산출한다. 본 과정은 측정 주파수 65 Hz부터 순차적으로 증가하여 1.28 MHz까지

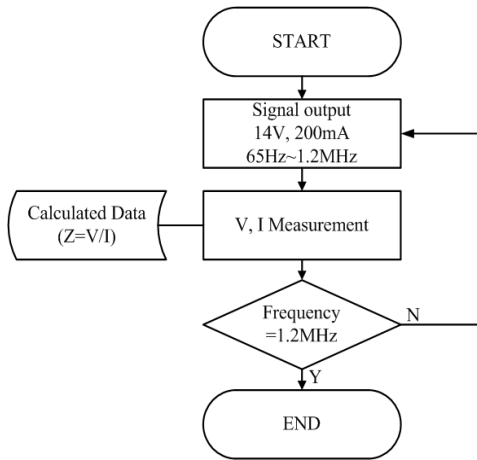


Fig. 3. Flowchart for the operation.

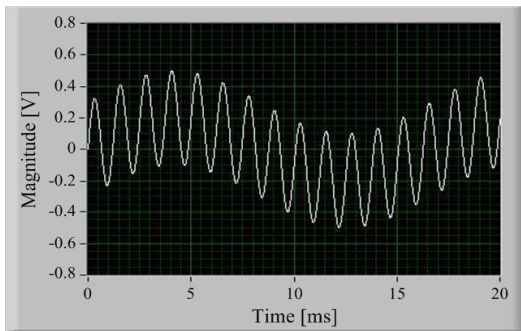


Fig. 4. Example waveform with an external noise influence.

반복한 후 종료된다.

2.2 외부 노이즈 제거기법

접지계에는 기기 및 설비의 정상운전 중에도 전자유도작용 또는 누설전류 등으로 접지임피던스 측정을 위해 인가하는 전원 주파수 성분 이외의 각종의 노이즈가 존재하게 된다. 이들 간섭은 그림 4와 같이 시험 전압파형에 중첩되어 나타나므로 측정값에 오차를 유발한다. 따라서 넓은 주파수 영역에서 접지임피던스를 정확히 측정하기 위해서는 외부 노이즈에 대한 대책이 필요하다.

본 논문에서는 디지털 대역통과필터 (bandpass filter)를 사용하여 여러 가지 주파수 성분 중에서 측정을 위해 인가한 주파수 성분만을 분리하여 접지임피던스를 산출하는 방식을 제안하였다. 디지털 대역통과필터는 5차의 버터워스 (butterworth)구성으로 측

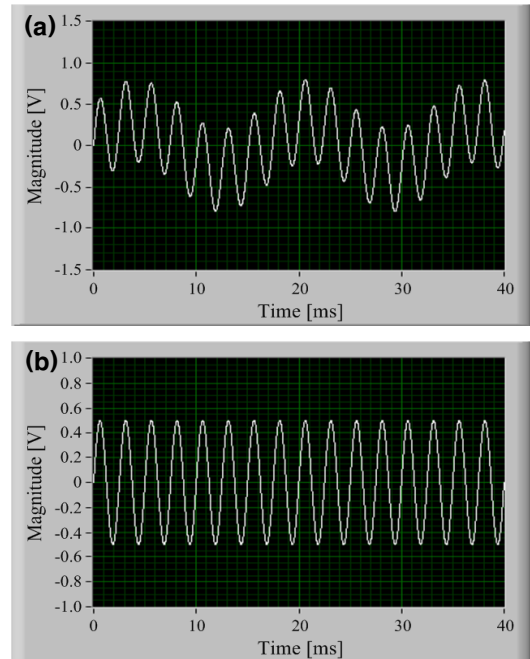


Fig. 5. Noise elimination by the bandpass filter; (a) before and (b) after.

정을 위해 인가한 전원 주파수만을 통과시키도록 설계되어 있으며, 대역폭은 인가 전원 주파수의 $\pm 3\%$ 이다.

그림 5는 60 Hz 전원 주파수 성분이 존재하는 환경에서 접지임피던스 측정용 전원으로 400 Hz를 인가하였을 때, 검출된 파형의 예를 나타낸 것이다.

그림 5(a)는 측정용 전원 400 Hz가 외부 노이즈에 해당하는 60 Hz에 중첩된 것이다. 그림 5(b)는 디지털 대역통과필터의 적용으로 외부 노이즈가 완전히 제거된 파형이며, 필터의 적용으로 파고값은 약간의 감소가 있으나, 전압 및 전류 검출 회로에 적용하는 필터의 특성이 동일하므로 최종적으로 산출되는 접지임피던스의 값에는 영향을 주지 않는다.

3. 결과 및 고찰

광대역 접지임피던스 측정기의 성능은 정밀 무유도 저항에 의한 교정과 3연접 접지극에 대한 전위강하법으로 비교·분석하였다.

1 Ω , 100 Ω 및 200 Ω 의 무유도 저항에 의한 측정 결과는 주파수 대역 65 Hz~1.28 MHz에서 최대 오차는 4.91%이었다.

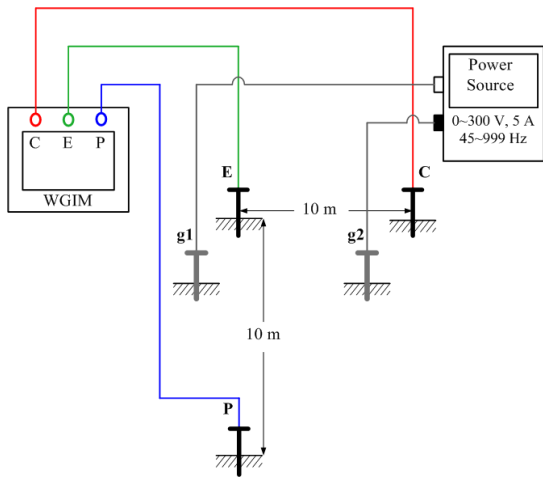


Fig. 6. Experimental setup.

3연접 접지극에서 접지임피던스 측정기의 평가는 그림 6에 나타난 것과 같이 전위강하법으로 수행하였다 [13,14]. IEEE Std. 80-2000에 따라 각 접지극의 간격은 10 m로 하고, 리드선 사이의 상호 유도결합에 의한 오차를 줄이기 위하여 90°로 배치하였다 [14,15].

외부 노이즈 간섭을 모의하기 위한 전압 인가용 전극 g1 및 g2는 측정용 전원이 인가되는 C극과 E극으로부터 각각 2 m떨어진 곳에 그림 5와 같이 설치하였다. 외부 노이즈 간섭을 위한 전원 장치는 주파수 45 Hz~999 Hz에서 최대 300 V, 5 A를 공급할 수 있다.

먼저 외부 간섭이 있는 환경에서 본 광대역 접지측정기의 성능을 분석하였다. 그림 7은 3연접 접지극에 시험 전압 650 Hz와 60 Hz의 외부 간섭을 모의하였을 때, 측정된 전압과 전류파형을 나타낸 것이다.

그림 7(a) 및 7(b)는 각 전극에 나타나는 전압 및 전류 파형이며, 그림 7(c) 및 7(d)는 측정기의 디지털 대역통과필터에서 시험 전압과 동일한 주파수 성분만의 전압과 전류 성분만을 나타낸 것이다. 이와 같이 디지털 대역통과필터에 의해 측정을 위해 인가한 시험 전원 주파수 이외의 성분은 모두 제거되어 외부 노이즈 간섭을 받지 않고 측정됨을 알 수 있다. 이와 같이 시제작 광대역 임피던스 측정기의 특성을 평가하고, 그림 6의 접지계의 임피던스 변화를 분석하였다.

그림 8은 주파수에 따른 접지임피던스의 변화를 나타낸 것으로, 65 Hz~1.28 MHz에서 주파수 증가에 따라 65 Hz에서는 104 Ω, 1.28 MHz는 65 Ω으로

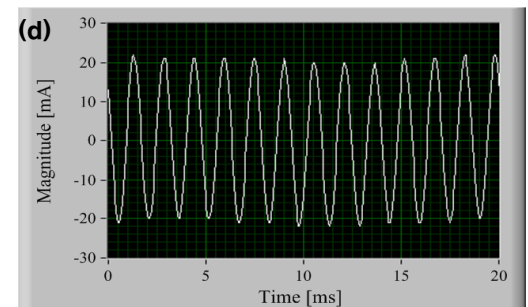
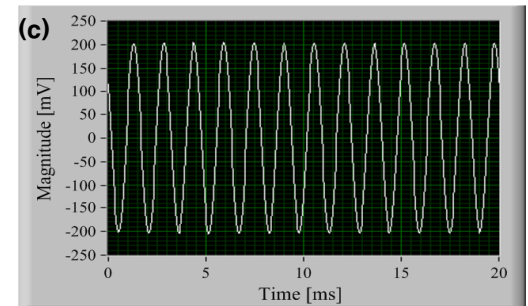
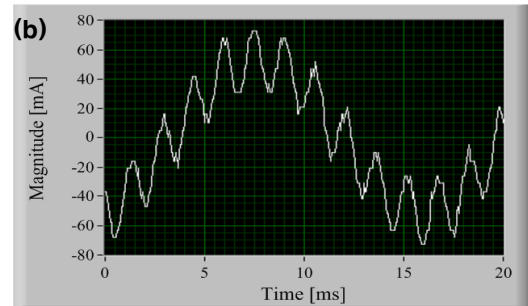
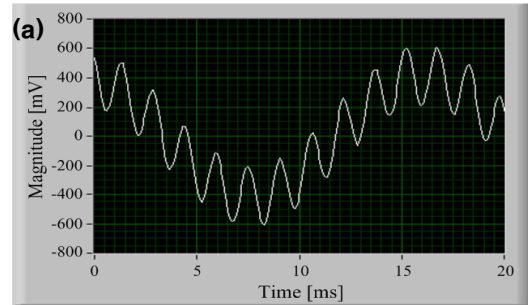


Fig. 7. Field test; (a) before signal processing (voltage), (b) before signal processing (current), (c) after signal processing (voltage) and (d) after signal processing (current).

저주파 영역에서의 접지임피던스에 비해 약 38% 정도 감소하였다. 본 실험의 경우는 선형적으로 감소하였으나, 접지계에 따라서는 특정주파수에서 공진

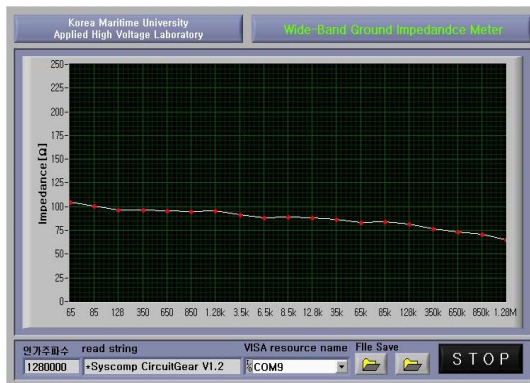


Fig. 8. Changes of ground impedance as a function of frequency.

점이 형성되어 접지임피던스가 급증하거나 급감하기도 한다.

4. 결론

본 논문에서는 고주파 대역에서 접지임피던스의 평가가 가능한 광대역 접지임피던스 측정기의 설계 및 제작에 대하여 기술하였다. 본 장치는 정현파 발생장치와 12 bit A/D변환기 및 디지털 대역통과필터로 구성되어 65 Hz~1.28 MHz에서 접지임피던스를 외부 노이즈 간섭없이 측정할 수 있었다. 고정밀 무유도 저항에 의한 교정평가에서 본 측정기의 최대 오차는 4.91%이었으며, IEEE Std. 80-2000에 따라 3연접 접지계에서도 디지털 대역통과필터의 적용으로 외부 노이즈에 간섭을 받지 않고 정확한 측정이 가능함을 알 수 있었다.

향후에는 접지계의 임피던스가 주파수에 따라 변화하는데, 접지극에 나타나는 전압과 전류의 위상차로부터 저항과 리액턴스 성분 분석에 대한 연구를 지속할 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의

지역혁신인력양성사업 및 지식경제부의 전력산업연구개발사업 (R-2007-1-014-02)에 의해 수행된 연구결과임.

REFERENCE

- [1] R. P. O Rily, *Electrical Grounding : Bringing Grounding Back to Earth* (Delmar Publishers, Albany, 2002) p. 40.
- [2] C.-H. Lee, and A. P. S. Meliopoulos, *Proc. Natl. Sci. Counc. Rep. China Pt. A: Phys. Sci. Eng.* **23**, 612 (1999).
- [3] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, *IEEE Trans. Power Deliv.* **2**, 1073 (1987).
- [4] R. Morrison and W. H. Lewis, *Grounding and shielding in facilities* (John Wiley & Sons, NY, 1990) p. 44.
- [5] T. Mitton and R. Watson, *CDEGS User Meeting* (Mitton Consulting Ltd, New Orleans, 2005) p. 1.
- [6] I. D. Lu and R. M. Shier, *IEEE Trans. Power Appar. Sys.* **PAS-100**, 1918 (1981).
- [7] A. P. Sakis Meliopoulos and G. Cokkinides, *IEEE Trans. Power Deliv.* **8**, 1095 (1993).
- [8] T. Hiyama, T. Miyake, T. Kita, and H. Andou, *Trans. IEE of Japan* **118-B**, 37 (1998).
- [9] L. Grcev, *Proceedings Ground 2000-International Conference on Grounding and Earthing* (Belo Horizonte, Brazil, 2000) p. 85.
- [10] R. L. Stoll, G. Chen, and N. Pilling, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.* **151**, 2, (2004).
- [11] TTAS KO-04-0042, *Measurements of Grounding Impedance* (2005) p. 1.
- [12] S. Bourg, B. Sacepe, and T. Debu, *Proc. IEEE Int. Symp. Electromagnetic Compatibility* (IEEE, GA, USA, 1995) p. 584.
- [13] IEEE Std. 81-1983, *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System.*
- [14] IEEE Std. 80-2000, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.*
- [15] IEEE Std. 81.2-1991, *IEEE Guide for measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems.*