

## 서지임피던스 측정기의 설계 및 제작

### Design and Fabrication of a Surge Impedance Meter

길경석<sup>†</sup> · 류길수\* · 김일권\*\* · 문병두\*\*\* · 김황국\*\*\* · 박찬용\*\*\*

Gyung-Suk Kil · Keel-Soo Rhyu · Il-Kwon Kim · Byung-Doo Moon · Hwang-Kuk Kim · Chan-Yong Park

**Abstract** Ground systems flow fault currents into the ground, and suppress Ground Potential Rise (GPR) by the current. In this paper, we designed and fabricated a surge impedance meter to analyze the ground impedance in wide frequency ranges. The meter consists of a surge generator, a high speed sample/hold (S/H) circuit and an associated electronics. The surge generator produces surge voltage up to 5kV in ranges of 50 ~ 500ns. Field tests were carried out to evaluate the surge impedance meter at a driven-rod ground system. The results showed that surge impedance of ground systems should be measured by various fast surge waveforms, since the impedance increases as the rise time of applied voltage increases.

**Keywords** : Surge impedance meter, Ground system, Fault current, Surge current, Lightning discharge, Transient current, Rise-time, Surge generator

**요 지** 접지시스템은 고장전류를 대지로 방출시켜 대지전위상승을 억제하는 역할을 한다. 본 논문에서는 넓은 주파수 범위에서 접지임피던스를 분석하기 위하여 서지임피던스 측정기를 설계·제작하였다. 본 측정기는 서지발생회로, 고속 샘플/홀드회로 및 주변 전자회로로 구성되어 있으며, 서지발생회로는 상승시간 50ns ~ 500ns 범위에서 최대 5kV까지 발생시킬 수 있다. 제작한 서지임피던스 측정기는 심타접지극으로 구성된 접지계에서 실질적 평가가 수행되었다. 실험 결과로부터 접지계의 서지임피던스는 인가전압의 상승시간에 따라 증가하는 경향을 나타내므로, 접지임피던스는 여러 가지 고속의 서지파형으로 평가되어야함을 확인하였다.

**주요어** : 서지임피던스 측정기, 접지시스템, 고장전류, 서지전류, 뇌방전, 과도전류, 상승시간, 서지발생기

## 1. 서론

접지시스템은 기기 및 장치의 기준전위를 정하거나, 절연 파괴에 의한 단락이나 지락시 고장전류를 대지로 안전하게 흘려보내 전위상승을 억제하는 기능을 한다[1-3]. 접지시스템의 접지저항은 고장전류를 단시간 내에 대지로 흘려보내기 위해 가능한 한 낮은 것이 요구되며, 이를 위한 다양한 형태의 접지극이 개발되고 있다[4-6]. 접지시스템의 접지저항은 일반적으로 500 ~ 1,000Hz 대역의 저주파 전류에 의해 측정되고 있다[7,8]. 그러나 전로의 지락이나 낙뢰시에는

수 kHz ~ 수 백 kHz의 과도(Transient) 또는 서지(Surge) 전류가 흐르게 되며, 파형의 상승시간도 수 백 ns ~ 1 $\mu$ s의 범위가므로 저주파 전류로 측정할 접지저항으로 계산되는 대지전위 상승과는 상당한 차이가 있다[9]. 이는 접지선과 접지극의 인덕턴스 및 접지극이 설치되는 대지의 특성에 따라 달라진다[10-13]. 현재 접지극의 서지임피던스 측정은 4/10 $\mu$ s 및 8/20 $\mu$ s 표준 뇌서지전류와 1 $\mu$ s 이하의 상승시간을 갖는 비진동 감쇄파형에 한정되어 평가되고 있다.

따라서 본 논문에서는 여러 가지 파형에 대해 접지시스템의 과도특성 분석이 가능한 서지임피던스 측정기를 설계·제작하였다. 본 측정기에서 발생하는 파형의 상승시간은 50ns, 100ns, 200ns, 500ns의 4단계 설정과 출력전압을 최대 5kV까지 가변할 수 있는 전원발생회로 및 전압·전류 측정회로로 구성되어 있어, 각종의 접지시스템에서 서지에 대한 접지

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, 한국해양대학교, 전기전자공학부, 교수  
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr  
TEL : (051)410-4414 FAX : (051)403-1127

\* 정회원, 한국해양대학교, IT공학부, 교수

\*\* 정회원, 한국해양대학교, 전기전자공학부, 박사과정

\*\*\* 정회원, 한국해양대학교, 전기전자공학부, 석사과정

임피던스와 전위상승 등을 보다 광범위하게 분석하는데 사용될 수 있을 것이다.

## 2. 서지임피던스

접지시스템의 서지임피던스는 낙뢰나 지락사고시 방전전류가 대지로 흐르는 동안 접지시스템의 동작특성과 성능을 판단하는데 중요한 파라미터이다.

서지임피던스는 접지극에 유입되는 과도전류에 대한 과도전압의 비로 정의되며, 식 (1)과 같다[14,15].

$$Z(t) = \frac{V(t)}{i(t)} \quad [\Omega] \quad (1)$$

또한, 서지임피던스를 나타내는 파라미터는 그림 1과 같이 전압과 전류의 최대값을 기준으로 다음과 같다[16].

$$Z_1 = \left( \frac{V(t)}{i(t)} \right)_{\max} = (Z(t))_{\max} \quad (2)$$

$$Z_2 = \frac{V(t_1)}{i(t_1)} \quad (3)$$

$$Z_3 = \frac{V(t_1)}{i(t_2)} \quad (4)$$

$$Z_4 = \frac{V(t_2)}{i(t_2)} \quad (5)$$

여기서,  $Z_1$  : 전압과 전류비의 최대값,  $Z_2$  : 전압이 최대값에 도달할 때 ( $t_1$ ), 전압의 최대값과 전류값의 비,  $Z_3$  : 최대전압과 최대전류의 비,  $Z_4$  : 전류가 최대값에 도달할 때 ( $t_2$ ), 전압과 전류 값의 비이다.

특히,  $Z_3$ 은 실효서지임피던스 (effective surge impedance) 라고 하며, 서지전류에 대하여 경제성을 고려한 보호수준으

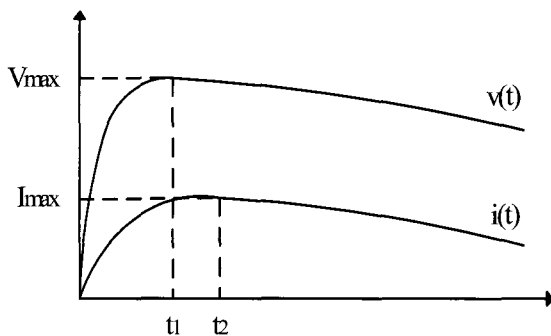


Fig. 1. Definition of surge impedance

로써 접지설계시 중요한 파라미터이다. 일반적으로 서지임피던스는 실효서지임피던스를 나타낸다.

## 3. 설계 및 제작

그림 2는 서지임피던스 측정기를 나타낸다. 서지발생장치를 통하여 접지극 E와 보조극 C에 서지를 인가하며, 이 때 발생하는 전압과 전류를 검출, 연산하는 회로로 구성된다.

서지의 발생원리는 그림 3에서 충전용 콘덴서 C에 전하를 충전한 후, 그 전하를 회로에 방전함으로써 필요한 파형의 전압을 얻는 방법이다. 직류고전압 발생장치로부터 충전저항  $R_s$ 를 통해 콘덴서가 충전되고, 콘덴서의 전압이 E가 되었을 때, 방전전극 G를 통해  $LR_s + R_0$  회로에 콘덴서의 전하를 방전시키면, 회로정수에 따라  $R_0$  단자에 충격전압이 발생된다. 회로에서 방전전극 G의 방전 시 저항을 무시하면 다음 식 (6)이 성립된다.

$$L \frac{di}{dt} + (R_s + R_0)i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = E \quad (6)$$

$R_s + R_0 = R$  로 놓고,  $t=0$  에서 방전전극이 동작할 때, R의 3가지 조건에 대해 위의 식을 풀면,

1)  $R > 2\sqrt{L/C}$  일 때,

$$e = iR_0 = E \frac{R_0}{R} \cdot \frac{\alpha}{\beta} \{ e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t} \} \quad (7)$$

급상승후 서서히 감소되는 파형이며,

2)  $R = 2\sqrt{L/C}$  일 때,

$$e = E \frac{R_0}{R} \cdot 2\alpha t \cdot e^{-\alpha t} \quad (8)$$

임계감쇠 진동파형이며,

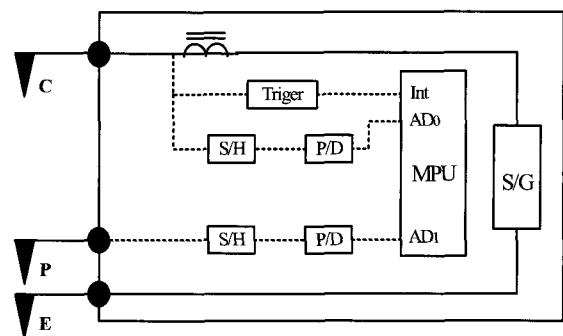


Fig. 2. Configuration of the surge impedance meter

3)  $R < 2\sqrt{L/C}$  일 때,

$$e = E \frac{R_0}{R} \cdot \frac{2\alpha}{\omega} \cdot e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (9)$$

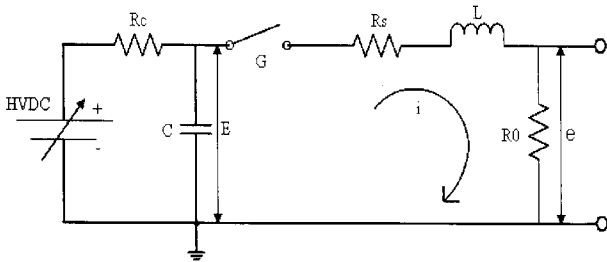
부족 감쇠진동 즉, 진동성분을 포함하는 파형을 발생시킨다.

여기서,  $\alpha = \frac{R}{2L}$ ,  $\beta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$ ,  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$  이다.

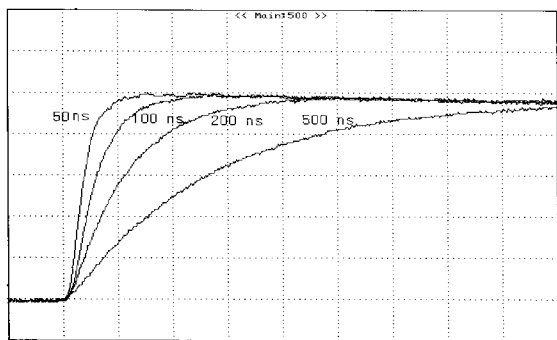
본 논문에서는 식 (7)의 조건에서 그림 3(b)에 나타난 파형과 같이 상승시간을 50ns, 100ns, 200ns, 500ns의 4단계 설정과 출력전압을 최대 5kV까지 가변할 수 있는 서지발생회로를 설계·제작하였다.

서지임피던스의 측정회로는 그림 4와 같이 서지전류 및 대지 전압강하를 검출하기 위한 P/D(Peak detector), 신호분석과 계산을 위한 마이크로프로세서 유닛(MPU), 출력신호의 최대값으로 읽고 유지하는 S/H(Sample/Hold) 및 그 주변회로로 구성된다. S/H에 출력이 나타나면 일정시간(10us)동안 최대값을 유지하고, 동시에 MPU의 아날로그 입력(A/D)에서 읽어지고 초기상태로 대기한다.

서지발생회로의 전류는 전류보조극 C에 인가되며, 전류의 크기는 광대역 변류기(1 Hz ~ 20 MHz, 0.1 V/A)에 의해 비접촉식으로 검출된다. 대지에 서지전류를 인가하여 전위보조극 P에 나타나는 전위차는 저항분압으로 검출되며 S/H에 입력



(a) Equivalent circuit



[ 1 kV/div, 100 ns/div]

(b) Waveforms

Fig. 3. Surge generator

된다. MPU는 이들 전압과 전류값으로부터 식 (4)의 실효서지 임피던스  $Z_3$ 를 산출한다.

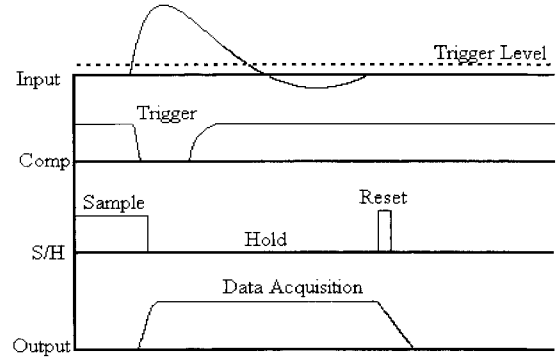


Fig. 4. Time sequence for data acquisition

#### 4. 평가 및 분석

본 논문에서는 제작한 서지임피던스 측정기의 성능을 평가하기 위하여 그림 5와 같이 실험계를 구성하였다. 서지임피던스 측정기의 전류발생회로의 (+)극은 전류보조극 C, 전위보조극 P는 저항분압기 및 고전압 프로브에 연결되며, 측정기의 접지단자는 피측정 대상 접지극에 접속된다. 또한 측정값의 비교를 위해 측정회로는 MPU에서 산출과 오실로스코프에 의한 파형관측이 가능하도록 병렬로 구성하였다.

각 접지극의 간격은 10 m로 하고, 연결선은 인덕턴스 성분에 의한 영향을 최소화하기 위하여 루프를 형성하지 않도록 하였다[17]. 접지극 시설기준에 따르면 모든 접지극은 지표면으로부터 0.75 m깊이에 매설하도록 규정하였으나, 이는 지표면에 전위상승에 의한 전위경도를 줄이기 위한 것으로 측정장치를 접지극의 저항구역을 고려한 일정거리 이상으로 간격을 유지하면 규정에 따른 매설깊이를 고려하지 않아도 된다.

그림 6에 상승시간 100 ns와 500 ns에서 인가전압의 크기

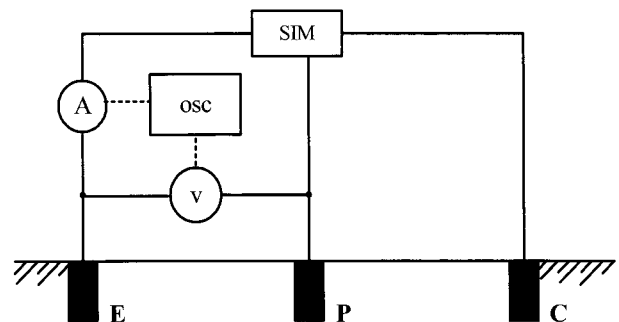
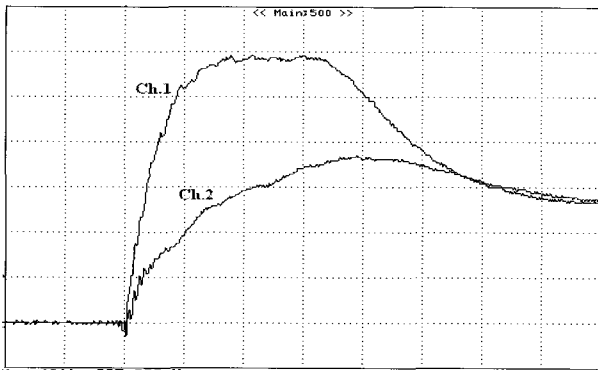
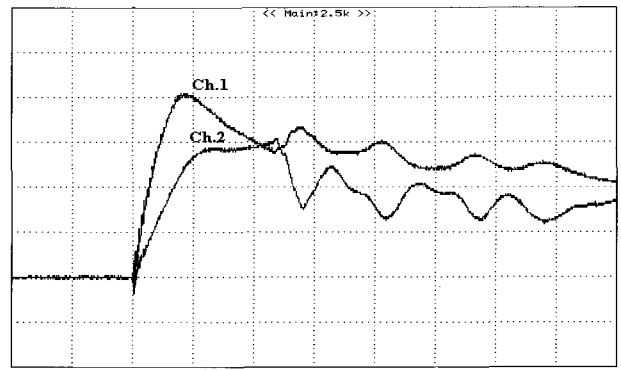


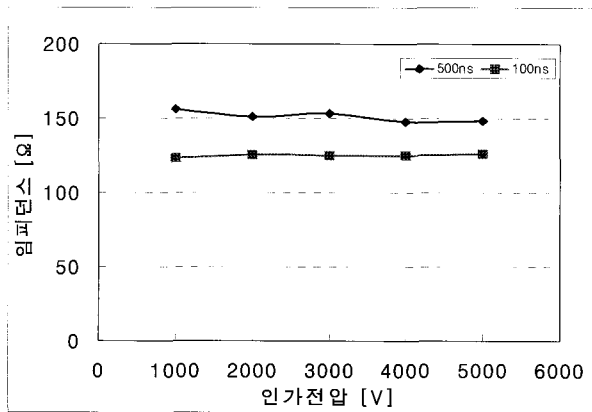
Fig. 5. Experimental set-up



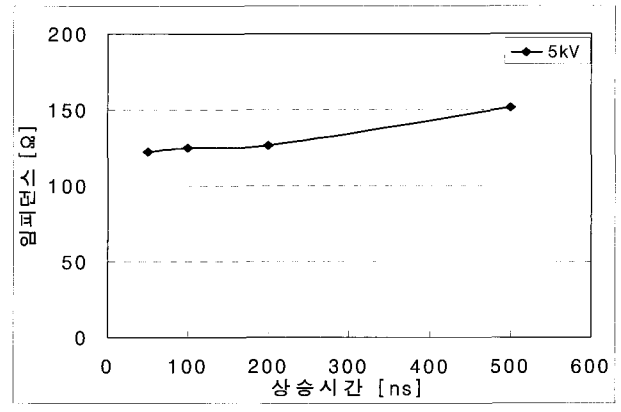
Ch.1 : 인가전류 [ 0.5 A/div, 100 ns/div]  
 Ch.2 : 검출전압 [ 200 V/div, 100 ns/div]  
 (a) Voltage and current waveforms



Ch.1 : 인가전류 [ 0.5 A/div, 100 ns/div]  
 Ch.2 : 검출전압 [ 200 V/div, 100 ns/div]  
 (a) Voltage and current waveforms



(b) Applied voltage vs. impedance



(b) Rise-time vs. impedance

Fig. 6. Changes of impedance as a function of applied voltage

Fig. 7. Changes of impedance as a function of rise-time

에 따른 과도접지 임피던스의 변화를 나타내었다. 그림 6(b)에 나타난 바와 같이 서지임피던스는 인가전압의 상승시간에 의해 크게 변화하지만, 크기에 따라서는 거의 일정함을 알 수 있으며, 다소의 차이는 과도상태에 기인하는 측정편차로 생각된다.

서지전류는 뇌격전류의 파형과 전력계통의 지락조건 등에 의해 달라질 수 있으므로, 접지시스템은 이에 대한 영향을 고려하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 인가전압의 크기를 5kV로 일정하게 하고, 인가전압의 상승시간에 따른 서지임피던스의 특성을 조사하였다.

인가전압 5kV, 상승시간 500ns로 하였을 때, 측정된 전압과 전류의 파형 예를 그림 7(a)에 나타내었다. 서지 임피던스의 크기는 그림 7(b)와 같이 상승시간의 증가에 따라 동일한 경향으로 증가함을 알 수 있다.

본 논문의 실험에서는 접지시스템의 임피던스가 용량성으로 상승시간의 증가에 따라 임피던스도 증가하지만, 대지의 특성에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 서지임피던스의 측정

은 인가전압의 상승시간을 변화시켜 뇌격전류와 여러 가지 고장전류에 대해서도 정확하게 분석할 필요가 있다.

## 5. 결론

본 논문은 서지 및 뇌충격전류에 대한 접지시스템의 과도 특성을 분석할 수 있는 서지임피던스 측정기를 설계·제작하였다. 본 측정기는 고속의 서지발생회로와 서지전류 및 대지전압강하를 검출할 수 있는 측정회로로 구성되며, 기존의 접지저항계 또는 서지임피던스 측정기와는 달리 접지극에 인가하는 서지전압의 크기를 최대 5kV까지 가변할 수 있다. 또한 서지파형의 상승시간도 50ns~500ns 범위에서 선택이 가능하기 때문에 각종 서지에 대한 접지시스템의 과도특성을 광범위하게 측정, 분석할 수 있다.

제작한 서지임피던스 측정기의 성능을 평가하기 위하여 실험접지극으로 구성된 접지시스템에서 인가전압의 크기와 상승시간 변화에 따른 접지임피던스의 특성을 분석하였다.

실험결과로부터, 전력계통에서 접지시스템의 서지에 대한

광범위한 특성평가가 가능함을 확인하였으며, 향후에는 과도 대전류에 대한 접지시스템의 평가가 가능하도록 서지발생장치의 대응량화에 대한 연구가 지속될 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 강인권(2005), "최신 피뢰 시스템과 접지 기술", 성안당, pp.65-66
2. Ronald P.O Riley (2002), "Electrical Grounding: Bringing Grounding Back to Earth", DELMAR, pp.40-43.
3. 광동걸(2006), "전기화재 예방을 위한 낙뢰 및 써지 보호시스템 개발에 관한 연구", 마이크로 전자 및 패키징학회지, 제13권, 제3호, pp.27-32.
4. A. Geri (1999), "Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: the Model and Its Validation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.14, No.3, pp.1008-1017.
5. G. Vijayaraghavan, Mark Brown, and Malcolm Barnes (2004), "Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection", Newnes, pp.62-78.
6. 고희석 외 3명(2002), "병렬 접속에 의한 접지저항에 관한 연구", 한국 조명·전기설비학회 학술대회 논문집, pp.307-312.
7. 高橋 健彦, 金聖模, 李炯秀(1997), "接地技術入門", オーム社, pp.203-218.
8. Ralph Morrison, Warren H. Lewis (1990), "GROUNDING AND SHIELDING IN FACILITIES", John Wiley & Sons, pp.44-45
9. T. Hiyama, T. Miyake, T. Kita, and H. Andou (1998), "Experimental Evaluation of Fuzzy Logic Excitation Control System on Analog Simulator", Trans. IEE of Japan, Vol.118-B, No.1, pp.37-43.
10. R. J. Gustafson, R. Pursley, V. D. Albertson (1990), "Seasonal grounding Resistance Variations on Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No. 2, pp.1013-1018.
11. 김경철 외 5명(2005), "배전계통에 사용되는 봉형 접지전극의 접지 임피던스 특성 분석", 조명·전기설비학회논문지, 제19권, 제6호, pp.67-74.
12. 三谷 弘(1990), "接地抵抗のサージ特性とその測定法", 日本電気設備學會誌, pp.871-877.
13. IEEE Std 81 (1983), "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", pp.17-24.
14. I. F. Gonos, F. V. Topalis, I. A. Stathopoulos (1999), "Transient Impedance of Grounding Rods", 11th International Symposium on High-Voltage Engineering, CP467, pp.2-272.
15. 김경철 외 5명(2004), "현장시험에 의한 중성선 고조파 해석용 접지 임피던스 모델링", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.369-371.
16. I. F. Gonos (2006), "Experimental study of transient behaviour of grounding grids using scale models", Measurement Science and Technology, Vol.17, No.7, pp.2022-2026.
17. Henry W. Ott. (1988), "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems", Wiley, pp.93-96.

(2007년 11월 2일 논문접수, 2007년 11월 13일 심사완료)