

다양한 전류원에 대한 접지시스템의 위험전압 측정과 분석

論 文

58-1-18

Measurement and Analysis of Risk Voltages by Various Current Sources in Grounding System

吉 暻 碩[†] · 文 秉 斗^{*} · 金 冕 局^{*} · 朴 大 元^{**} · 吉 亨 准^{***}

(Gyung-Suk Kil · Byoung-Doo Moon · Hwang-Kuk Kim · Dae-Won Park · Hyoung-Jun Gil)

Abstract - Grounding systems set the reference voltage level of electric circuits and suppress the Ground Potential Rise (GPR) by flowing fault currents to the ground safely. There are several parameters which evaluate the performance of grounding systems as ground resistance, touch voltage and step voltage. The touch and step voltages, which is called "risk voltage", are especially important to ensure the safety of human body.

This paper dealt with the influence of current sources with the different frequency components on the touch and the step voltages. Three types of current sources as commercial frequency, square wave, and surge with the fast risetime of 50 ns~500 ns were used to analyze the risk voltages in a grounding system.

The risk voltages showed remarkable difference in the same current amplitude depending on the current sources, and increased linearly with the current amplitude in the same current source.

From the experimental results, it was confirmed that the risk voltages can be evaluated by a small current application in large-scale grounding systems and the possible largest risk voltage can be calculated by a surge current with the risetime of 200 ns or a current source with the same frequency component as the surge current.

Key Words : Grounding System, Ground Potential Rise (GPR), Risk Voltage, Touch Voltage, Step voltage

1. 서 론

접지란 전기·전자·통신설비를 대지와 전기적으로 접속하는 것을 말하며, 기기를 대지에 접속하기 위한 터미널이 접지전극이다. 접지의 목적은 회로의 기준전위를 정하거나, 뇌격전류 또는 지락전류가 대지로 유입될 때 대지전위의 상승을 억제하여 인체의 감전 (electric shock)이나 전기·전자통신기기의 사고를 방지하는 것이다[1-2]. 접지성능을 나타내는 주요 파라미터로는 접지저항(임피던스), 접촉전압과 보폭전압, 메쉬전압 등 위험전압이 있다. 특히 감전에 대한 인체의 안전성 평가에는 접촉전압과 보폭전압이 가장 중요한 파라미터이다[3-4].

현재까지 접지시스템의 성능평가는 주로 상용주파수 또는 1 kHz 이하의 저주파 전류에 의해 접지저항과 접촉 및 보폭전압과 같은 위험전압을 측정하여 평가하는 것이 대부분이다[5-8]. 그러나 실제의 접지시스템에는 고장상태에 따라 60Hz 상용주파수 전류, 지락시 수 ~ 수 십 kHz의 진동감쇄 전류, 낙뢰시 서지와 같은 고주파 전류가 흐른다.

접지시스템에 전류가 유입될 때, 전류의 주파수에 따라

접지전위가 크게 변화한다. 저주파의 경우에는 전류 유입점에서 전위상승이 높지만 전체적으로 접지전위의 상승비율이 낮다. 그러나 수 kHz ~ 수 백 kHz의 고주파 성분을 가진 과도(transient) 또는 서지(surge)전류가 유입될 때에는 접지도체 임피던스에 의한 전압강하, 도체 간 유도전압 및 대지의 커패시턴스의 영향이 매우 커지며, 이러한 접지시스템의 리액턴스 성분으로 인해 접지임피던스 및 위험전압은 저주파 전류가 유입될 때의 특성과는 전혀 다른 응답특성을 나타낸다[9-10].

따라서 본 논문은 접지시스템 그 자체의 특성평가가 아니라 접지시스템의 위험전압 평가에 있어 주파수 성분이 다른 다양한 전류원에 따른 영향을 평가하는데 주목적이 있으며, 임의의 접지시스템에서 상용주파수와 구형파 및 서지전류인가에 의해 대지표면에 나타나는 접촉전압과 보폭전압을 인체모델로 측정하였다[11]. 실험에서는 고장전류와 위험전압의 상관관계를 분석하기 위해 인가전류에 대해 접촉전압과 보폭전압을 측정하였으며, 서지의 상승시간에 따른 영향도 분석하였다.

2. 접촉전압 및 보폭전압

2.1 접촉전압

접지전극에 뇌격전류 또는 계통의 고장전류가 유입하면 접지시스템 부근의 대지전위가 상승한다. 이 때 인체가 접지전극 부근의 구조물에 접촉되면, 구조물의 전위와 인체가 서있는 지점의 대지표면 사이의 전위차를 접촉전압(touch

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國海洋大 電氣電子工學部 教授
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr

^{*} 正會員 : 韓國海洋大 電氣電子工學部 碩士課程

^{**} 正會員 : 韓國海洋大 電氣電子工學部 博士課程

^{***} 正會員 : 韓國電氣安全研究院 先任研究員

接受日字 : 2008年 7月 28日

最終完了 : 2008年 11月 13日

voltage)이라 하며, 인체의 손과 다른 신체의 일부 사이에 인가되는 위험전압이다. 인체가 구조물에 접촉한 상태를 전기적 등가회로로 나타내면 그림 1(a)와 같다. 한쪽 발에 대한 대지접촉저항을 R_F , 인체전기저항을 R_B , 손과 구조물의 접촉저항을 R_H , 인체에 흐르는 전류를 I_B 라고 하면, 접촉전압 V_t 는 식 (1)과 같다[11-12].

$$V_t = I_B(R_H + R_B + R_F/2) \quad [V] \quad (1)$$

2.2 보폭전압

접지전극을 통하여 고장전류가 대지로 유입될 때, 그림 1(b)와 같이 접지전극 주변의 대지 표면에 전위차 (potential difference)가 발생한다. 이때 인체의 양발 사이에 인가되는 보폭전압 (step voltage)은 고장전류와 양쪽 다리 사이의 거리에 해당하는 접지저항의 곱으로 나타나며, 접촉전압과 더불어 감전보호에 있어서 매우 중요한 요소이다. 고장전류가 흐르는 접지전극의 근처에 인체가 서 있는 경우, 인체의 전기저항을 R_B , 한쪽 발의 대지접촉저항을 R_F , 그리고 인체를 통하여 흐르는 전류를 I_B 라 하면, 보폭전압 V_s 는 다음 식 (2)와 같다[11-12].

$$V_s = I_B(R_B + 2R_F) \quad [V] \quad (2)$$

IEEE 규정에 정의된 접촉전압은 접지되어 있는 구조물과 대지표면상의 거리 1m인 지점사이의 전위차, 보폭전압은 인체가 서 있는 상태에서 양발을 1m 간격으로 벌렸을 때 대지표면 위의 양발 사이의 전위차로 정의한다.

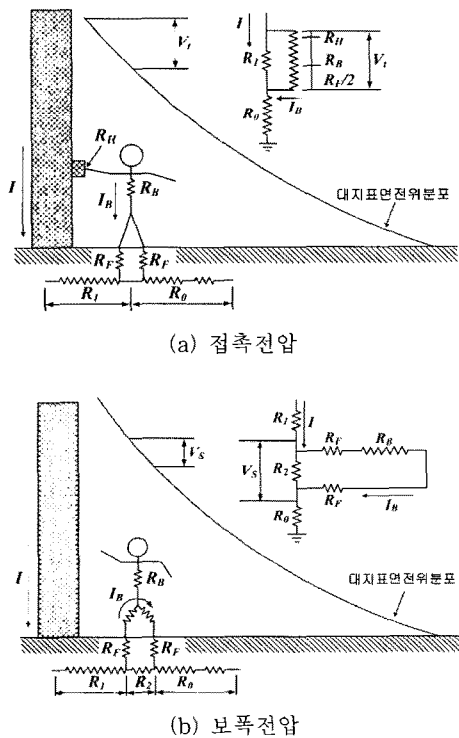


그림 1 접촉전압과 보폭전압
Fig. 1 Touch and step voltages

3. 실험 및 방법

접촉전압과 보폭전압을 측정하기 위해 접지봉(지름 14 mm, 길이 1 m) 3 개를 연결한 접지전극, 높이 1 m의 접지된 구조물, 발 모형전극 (footprint electrode) 및 인체 등가저항을 이용한 인체모델 방법 (simulated-personnel method)으로 그림 2와 같이 실험계를 구성하였다[11]. 대지표면과 접촉하고 있는 양발은 가로 10 cm, 세로 20 cm, 두께 1.5 cm의 직사각형 모양 금속판으로 발 모형 전극(F1, F2)을 구성하고, 인체의 등가 전기저항은 1000 Ω의 탄소 피막저항을 사용하였다. 전류보호전극 C는 구조물과 약 10 m의 간격으로 설치하였다.

접촉전압과 보폭전압은 상용주파수, 구형파 및 서지 전류를 접지극에 인가하여 측정하였다. 상용주파수 전류는 교류 절연변압기 (0 ~ 220 V, 20 A), 구형파 전류는 스위칭 펄스전원장치 (300 V_{p-p}, 10 A, 60 Hz ~ 1 kHz), 그리고 서지 전류는 서지발생장치 (0 ~ 5 kV, 상승시간 50 ~ 500 ns)로 접지극에 인가하였다. 접지전극을 통해 대지로 인가되는 전류측정은 광대역 변류기 (1 Hz ~ 20 MHz, 0.1 V/A)를 이용하고, 이때 인체 등가저항에 나타나는 접촉전압과 보폭전압은 차동프로브 (DC ~ 20 MHz)로 측정하였다. 서로 다른 전류원에 대해 접지극에 발생하는 위험전압을 비교 분석하기 위해 실험은 상용주파수 전류 인가시와 동일한 조건에서 수행하였다[10].

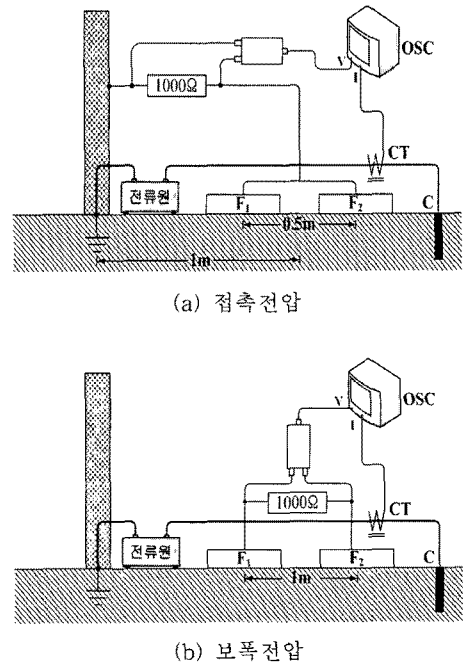


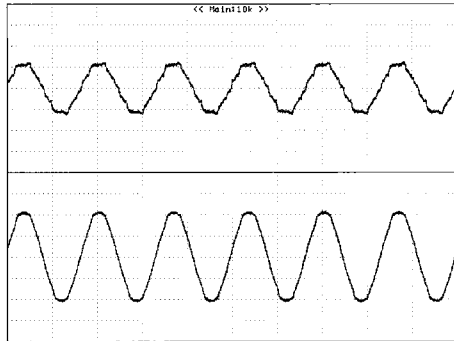
그림 2 실험계의 구성
Fig. 2 Configuration of the experimental system

4. 측정결과 및 고찰

4.1 접촉전압 및 보폭전압

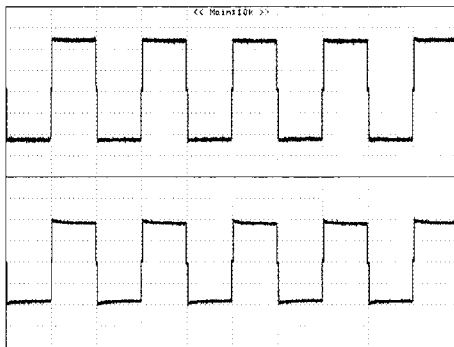
그림 3에 3가지 전류원에 대해 측정된 접촉전압과 보폭전압 파형의 예를 나타내었다. 2.1 A_{max}의 상용주파수 전류, 500 Hz 구형파 전류 및 500 ns 서지전류 인가시, 접촉전압의

크기는 각각 $12.24 V_{max}$, $25 V_{max}$ 및 $35.65 V_{max}$ 이며 가장 높은 주파수 성분을 갖는 서지전류에서 접촉전압이 가장 크게 나타났다.



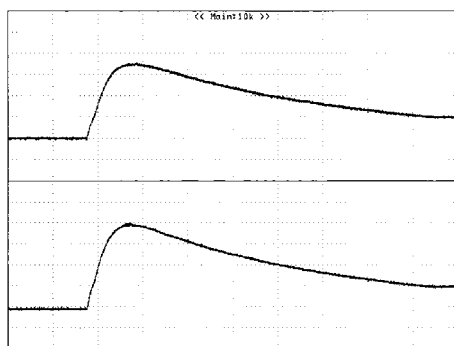
상 : 접촉전압[10 V/div, 10 ms/div]
하 : 인가전류[1 A/div, 10 ms/div]

(a) 상용주파수



상 : 접촉전압[10 V/div, 1 ms/div]
하 : 인가전류[1 A/div, 1 ms/div]

(b) 구형파



상 : 접촉전압[10 V/div, 2 μs/div]
하 : 인가전류[0.5 A/div, 2 μs/div]

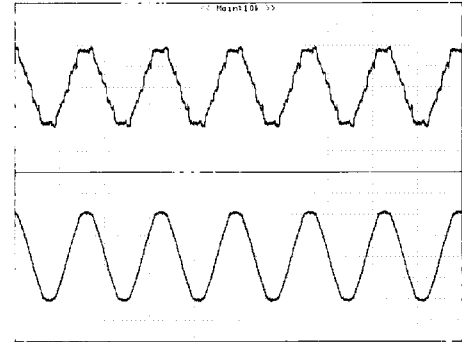
(c) 서지

그림 3 접촉전압의 파형 예

Fig. 3 Typical waveforms of touch voltages

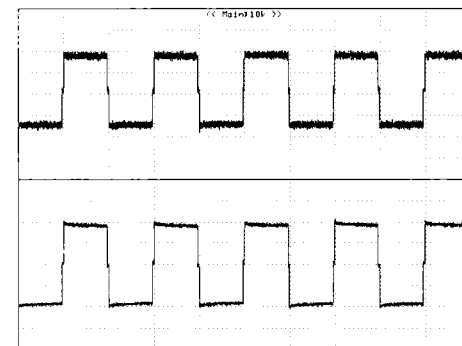
그림 4는 실험계 그림 2(b)에 3가지 전류원을 인가하였을 때 측정된 보폭전압 파형으로, 접촉전압과 마찬가지로 각각의 전류원에 대해 인가전류와 전압 파형이 정확히 나타나고

있다. $2.1 A_{max}$ 의 상용주파수 전류, 500 Hz 구형파전류 및 500 ns 서지전류 인가시에 보폭전압의 크기는 각각 $3.99 V_{max}$, $10.42 V_{max}$ 및 $11.72 V_{max}$ 이었으며, 인가전류를 가변하여 동일한 전류에서 전류원에 따른 위험전압의 크기를 비교·분석하였다.



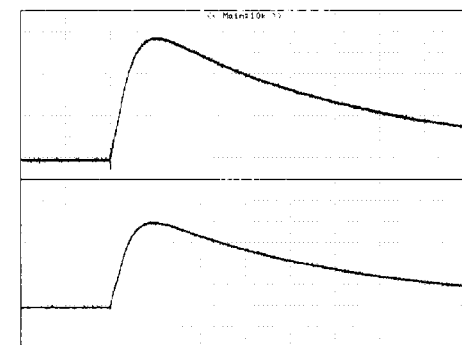
상 : 보폭전압[2 V/div, 10 ms/div]
하 : 인가전류[1 A/div, 10 ms/div]

(a) 상용주파수



상 : 보폭전압[5 V/div, 1 ms/div]
하 : 인가전류[1 A/div, 1 ms/div]

(b) 구형파



상 : 보폭전압[2 V/div, 2 μs/div]
하 : 인가전류[1 A/div, 2 μs/div]

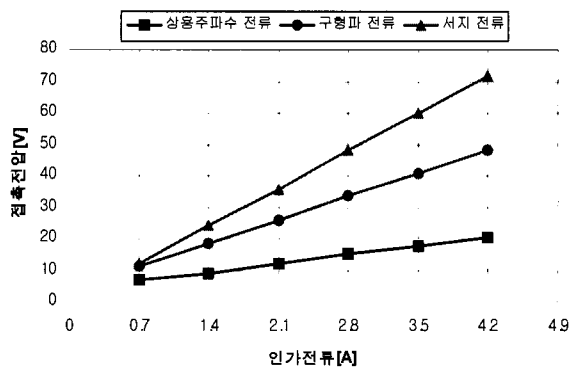
(c) 서지

그림 4 보폭전압의 파형 예

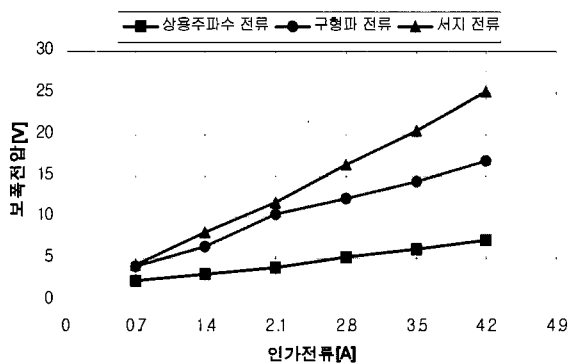
Fig. 4 Typical waveforms of step voltages

그림 5는 전류원의 크기에 따른 접촉전압과 보폭전압의 최대값을 나타내었으며, 동일 접지극에 인가한 전류의 크기는 $0.7 A_{max} \sim 4.2 A_{max}$ 이다.

실험 결과로부터 접촉전압과 보폭전압의 크기는 전류원에 따라 현저한 차이를 나타내었으며, 서지, 구형파, 상용 주파수 전류의 순서로 크게 나타났다. 이와 같이 동일한 전류의 크기에 대해 주파수 성분이 다른 전류원에 따라 위험전압이 다르게 나타나는 것은 접지시스템의 주파수 의존성을 나타내는 것이다. 즉, 서지전류와 같은 고주파 성분의 전류가 인가될 때에는 접지시스템의 리액턴스 성분의 작용으로 접지 임피던스의 응답특성이 달라지며, 그림 2의 실험계는 주파수 특성이 유도성으로서 고주파 성분의 인가전류에서 접지 임피던스가 상승하고 접촉 및 보폭전압이 저주파의 상용주파수 전류보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 접지저항, 접촉 및 보폭전압과 같은 접지시스템의 성능 및 인체의 안전성을 평가할 때에는 광대역 또는 고주파 전류원에서의 평가가 필요하다고 판단된다.



(a) 접촉전압



(b) 보폭전압

그림 5 인가전류에 따른 위험전압의 변화

Fig. 5 Changes of the risk voltages as a function of the amplitude of applied current

그림 5에서 인가전류와 접촉 및 보폭전압은 선형적인 관계가 있으며, 이 관계를 식 (3)으로 나타낼 수 있다[13-14].

$$V_t = V_k \frac{\text{실제고장전류}}{\text{시험평가전류}} \quad [V] \quad (3)$$

여기서, V_t : 실제 고장전류에 의한 접촉전압[V]

V_k : 시험평가전류에 의한 접촉전압[V]

그러므로 대규모 접지시스템에 큰 전류를 직접 흘리지 않더라도 식 (3)의 관계로부터 접지시스템의 위험전압을 평가할 수 있을 것이다.

4.2 상승시간에 따른 영향

접지극에 인가되는 전류원의 주파수성분에 따라 위험전압이 다르게 나타남을 확인하였다. 본 논문에서는 서지의 상승시간, 즉 서지전류의 최대주파수를 변화시킬 때, 위험전압의 변화를 분석하였다. 그림 6은 인가전압을 5kV로 고정하고 상승시간을 50 ns, 100 ns, 200 ns 및 500 ns로 하였을 때, 접촉전압과 보폭전압의 크기를 나타낸 것이다. 본 논문의 실험계에서 접촉전압과 보폭전압은 상승시간이 늦어질수록 다소 감소하였으나, 200 ns보다 빠른 상승시간에 대해서는 변화가 없었다. 접지시스템은 고주파 영역에서 주파수가 증가할수록 유도성 리액턴스의 영향이 우세하게 나타나므로 상승시간 200 ns까지 또는 동일한 주파수성분의 전류를 인가하면 접지시스템에 나타날 수 있는 최대 위험전압을 평가할 수 있을 것이다.

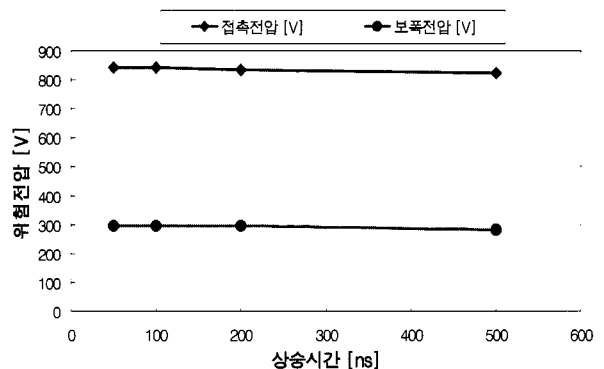


그림 6 서지의 상승시간에 따른 위험전압의 변화

Fig. 6 Changes of the risk voltages as a function of the risetime of surge

5. 결 론

접지극에 상용주파수, 구형파 및 서지전류를 인가하여 접촉전압과 보폭전압을 측정하고, 상호 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 접촉 및 보폭전압의 크기는 전류원에 따라 달라지며, 서지 전류에 의한 위험전압이 가장 높게 나타났다. 이는 접지시스템의 주파수 의존성을 의미하며, 현재의 방법과 같이 1kHz이하의 저주파 전류원으로 평가하면 실제 발생할 수 있는 것보다 위험전압이 낮게 나타나게 되므로, 위험전압에 대한 정확한 평가는 광대역 또는 서지와 같은 고주파 전류로 수행되어야 할 것이다.
- (2) 접촉 및 보폭전압은 인가전류의 크기에 따라 선형적인 특성을 나타내므로, 대규모 접지시스템에서 대전류를 흘리지 않더라도 최대 고장전류에 대한 위험전압을 평가할 수 있다.

(3) 서지의 상승시간 50 ns~500 ns에서 접촉 및 보폭전압을 측정 한 결과, 200 ns 보다 빠른 상승시간의 서지에 대해서는 거의 일정하게 나타났다. 따라서 접지시스템은 목적에 따라 상승시간 200 ns까지 또는 동일한 주파수성분의 전류까지 인가해 보면 접지시스템에 나타날 수 있는 최대 위험전압을 평가할 수 있을 것이다.

이상의 실험결과로부터, 접지시스템의 설계와 정확한 접지성능의 평가를 위해서는 접지임피던스, 대지저항률 뿐만 아니라, 여러 가지 전류원에 대한 접촉 및 보폭전압과 같은 위험전압 등 접지시스템과 관련된 파라미터들을 종합적으로 측정하고 검증하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 전력산업연구개발사업 (R-2007-1-014-02)의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] Ronald P. O Riley, "Electrical Grounding: Bringing Grounding Back to Earth", DELMAR, pp.40-43, 2002.
 [2] Chien-Hsing Lee, A.P Sakis Meliopoulos, "A Comparison of IEC 479-1 and IEEE Std. 80 on Grounding Safety Criteria", Proc. Natl. Sci. Coun. ROC(A), Vol. 23, No. 5, pp.612-621, 1999.
 [3] A. Geri, "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, 1999.
 [4] A.P. Sakis Meliopoulos, "Power System Grounding and Transient : An Introduction", Marcel Dekker, INC., 1988.
 [5] Romuald Kosztaluk, Dinkar Mukhedkar, Yvon Gervais, "Field Measurements of Touch and Step Voltages", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 11, pp.3286-3294, 1984.
 [6] A. P. Sakis Meliopoulos, George Cokkinides "A PC Based Ground Impedance Measurement Instrument", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp.1095-1106, 1993.
 [7] H. Zhao, H. Gruffiths, A. Haddad, A. Ainsley, F. Ainslie, D. Frame, "Error in Step and Touch Voltage Measurements at Large Substations" XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, B-18, 2005.
 [8] Tony Mitton, Robin Watson, "Practical Testing of Grounding Systems by Current Injection", CDEGS User Meeting, pp. 1-8, 2005.
 [9] 최홍규, 최병숙, 송영주, "접지설비 및 설계", 성안당, pp. 223-229, 2007.
 [10] 길경석, 류길수, 김일권, 문병두, 김항국, 박찬용,

"Design and Fabrication of a Surge Impedance Meter", 한국철도학회 논문집, 제 10권, 제 6호, pp.645-649, 2007.
 [11] IEEE Std 81.2, "IEEE Guide for measurement of Impedance and Safety characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems," pp.51-55, 1991.
 [12] IEEE Std 80, "IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding," pp.43-48, 1986.
 [13] G. Parise, U. Grasselli, R. Iaconelli, "Measurements of touch and step voltages adopting multi current auxiliary electrodes", Industry Applications Conference, vol. 5, pp.3187-3193, 8-12 Oct. 2000.
 [14] Y. L. Chow, M. M. A. Salama, G. Djogo, "Thevenin source resistances of the touch, transferred and step voltages of a grounding system", Generation, Proceedings of IEE Transmission and Distribution, Volume 146, Issue 2, pp.107-114, March 1999.

저 자 소 개



길 경 석 (吉 曠 碩)

1962년 6월 30일생. 1984년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년 3월 ~ 2004년 2월 영국 카디프대학 방문교수. 1996~ 현재 한국해양대학교 전기전자공학부 교수
 Tel : 051-410-4414, Fax : 051-403-1127
 E-mail : kilgs@hhu.ac.kr



문 병 두 (文 秉 斗)

1971년 3월 16일생. 1998년 영남대학교 전기공학과 졸업. 2007년 ~ 현재 한국해양대학교 대학원 석사과정. 한국산업안전공단 검사팀 대리
 Tel : 051-410-4893, Fax : 051-403-1127
 E-mail : bdmooon@kosha.net



김 항 국 (金 晃 局)

1981년 7월 25일생. 2007년 경남대학교 전자공학과 졸업. 2007년 ~ 현재 한국해양대학교 대학원 석사과정.
 Tel : 051-410-4893, Fax : 051-403-1127
 E-mail : hkkim@hhu.ac.kr



박 대 원 (朴 大 元)

1977년 12월 28일생. 2003년 한국해양대학교 전기시스템공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2007년 ~ 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : 051-410-4893, Fax : 051-403-1127

E-mail : dwpark77@hhu.ac.kr



길 형 준 (吉 亨 准)

1969년 8월 27일생. 1997년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년 ~ 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.

Tel : 031-580-3034, Fax : 031-580-3045

E-mail : fa523@paran.com