

접지전극의 길이 및 접지도선의 접속위치에 따른 접지임피던스의 주파수의존성

(Frequency-Dependant Grounding Impedances According to the Length of Grounding Electrode and the Joint Position of Ground Conductors)

최중혁* · 최영철 · 조성철 · 이복희**

(Jong-Hyuk Choi · Young-Chul Choi · Sung-Chul Cho · Bok-Hee Lee)

요 약

넓은 범위의 주파수 스펙트럼을 포함하고 있는 낙뢰나 전력변환 기기들을 고려할 때 접지시스템의 성능은 접지임피던스에 의해 평가되어야 한다. 본 논문은 실규모의 수직 접지전극과 매설지선에 대한 접지임피던스의 주파수 의존성에 대한 측정결과를 나타낸다. 수직 접지전극과 매설지선의 접지임피던스는 접지전극의 길이와 토양의 대지저항률에 따라 용량성 또는 유도성 특성을 나타내었으며, 단순히 접지저항을 낮추기 위해 접지전극의 길이를 증가시키는 것은 비효율적이며 접지임피던스를 고려한 접지설계가 요구된다. 또한 매설지선의 접지임피던스를 저감시키기 위해 접지도선은 매설지선의 중앙에 접속되어야 하며, 봉상 접지전극을 매설지선과 병렬로 설치하는 것이 접지임피던스의 저감에 효과적인 것으로 나타났다.

Abstract

When lightning surges with wide frequency spectrum and power converting devices are considered, it is desirable to evaluate grounding system performance by grounding impedances. This paper presents the measured results for frequency-dependent grounding impedance for the vertical grounding electrode and counterpoise on a scale of full size. Grounding impedances of vertical grounding electrodes and counterpoises give capacitive or inductive behaviors according to the length of grounding electrodes and soil resistivity. It is inefficient to extend the length of the grounding electrode in order to decrease the ground resistance, and when designing the grounding system, the consideration of the grounding impedance should be desirable. In order to reduce the grounding impedance of counterpoise, the grounding conductors are jointed at the center of counterpoises. It is effective to reduce the grounding impedance by connecting ground rods to counterpoises in parallel.

Key Words : Grounding Impedance, Soil Resistivity, Vertical Grounding Electrode, Counterpoise, Lightning Surge

* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정

** 교신저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822, E-mail : bhlee@inah.ac.kr

접수일자 : 2010년 1월 7일, 1차심사 : 2010년 1월 8일, 심사완료 : 2010년 1월 26일

1. 서 론

최근 기후변화로 인한 낙뢰의 급증과 전력변환소자의 사용증가로 인하여 접지시스템에 흐르는 고주파수의 전류가 크게 증가하고 있다. 이러한 시점에서 인체와 기기의 전기적 안전성에 중요한 역할을 하는 접지시스템이 대형화 및 공용화 되어가고 있으며, 그에 따라 접지저항만으로는 접지성을 평가할 수 없게 되었다. 이미 여러 문헌에서 제시되었듯이 접지전극의 고주파 특성은 저주파에서와 큰 차이를 나타낸다[1]. 낙뢰와 같이 저주파수에서 1[MHz]까지 넓은 영역의 주파수 스펙트럼을 갖는 전류가 접지시스템에 인가되었을 때 보호성능의 평가를 위해 접지임피던스에 대한 정확한 정의가 필요하며 주파수에 따른 접지시스템의 성능평가가 요구되고 있다[2]. 접지임피던스에 영향을 주는 요인은 접지전극의 형상과 토양의 특성(대지저항률과 비유전율) 등이며, 이러한 요인에 따른 접지임피던스의 주파수 의존성이 분석되어야 한다. 접지전극의 접지임피던스의 주파수의존성에 대한 모델링 결과들을 제시하고 있지만 실규모에 대한 실험적인 결과들과의 비교를 통한 분석은 매우 적은 실정이다[3-4]. 따라서 본 논문은 접지전극의 형태 및 크기 등에 따른 접지임피던스의 주파수의존성을 분석할 목적으로 실규모의 수직 접지전극과 매설지선에 대하여 인가전류의 주파수에 따른 접지임피던스를 토양의 대지저항률을 고려하여 측정하였다. 또한 매설지선의 경우 접지도선의 접속위치에 대한 영향을 실험적으로 분석하여 접지임피던스의 저감방법을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 실험계의 구성 및 방법

접지전극의 형상 및 크기에 따른 접지임피던스의 주파수의존성을 실험적으로 분석하기 위해 길이가 다른 수직 접지전극과 매설지선을 설치하였다. 접지임피던스를 측정하기 위해 그림 1과 같이 IEEE Standard 81.2에서 제안하고 있는 수정된 전위강하법을 적용하여 실험을 수행하였다[5]. 수정된 전위강하법의 경우

필연적으로 도전유도에 의한 오차가 다르게 되는데 이에 대한 오차평가를 선행하여 도전유도에 의한 오차가 3[%] 미만인 거리에 전류보조전극과 전위보조전극을 설치하여 접지임피던스를 측정하였다[6].

함수발생기와 DC-250[MHz]의 주파수대역을 갖는 전력증폭기를 이용하여 피측정 접지전극과 전류보조전극 사이에 정현파 전류를 흘렸다. 50[MHz]까지 측정할 수 있는 전류프로브와 70[MHz]의 주파수 대역을 갖는 차동전압프로브를 이용하여 접지전극과 전위보조전극의 전위차를 측정하였다. 측정된 신호는 A/D 변환기를 거쳐 디지털 필터를 통해 PC기반 접지임피던스 분석기로 전송되며 주파수에 따른 임피던스와 위상차가 산출된다.

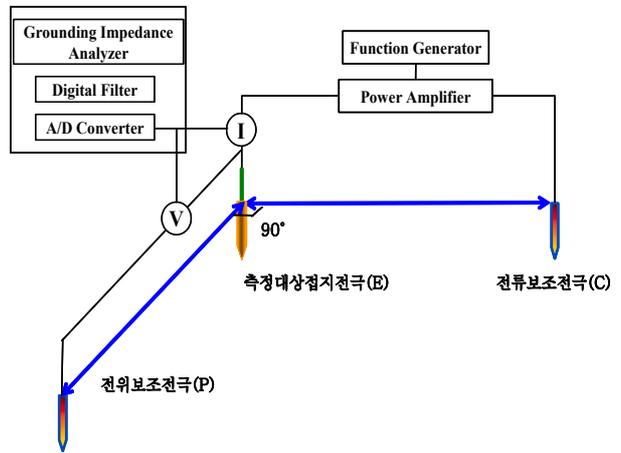


그림 1. 접지임피던스 측정을 위한 실험계 구성
Fig. 1. Experimental set up for measuring the grounding impedance

2.2 수직 접지전극의 길이 및 대지저항률에 따른 접지임피던스의 주파수의존성

본 연구에서는 지표로부터 깊이 0.5[m]에 반경 27[mm]의 길이 10, 30, 48[m]인 수직 접지전극을 설치하였다. 접지저항을 산출하는 수식을 이용하여 측정된 접지저항으로부터 평균적인 겉보기 대지저항률을 계산하였다[3]. 수직 접지전극의 길이별 접지저항과 식 (1)로부터 산출한 접지전극 주변의 평균적인 겉보기 대지저항률을 표 1에 나타내었다.

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} (\ln \frac{4l}{a} - 1) \quad (1)$$

대지저항률이 같은 경우 접지전극의 길이가 길어질 수록 접지저항이 낮아지지만, 접지전극이 설치된 지점의 대지저항률을 산출한 결과 30[m] 접지전극 주변의 대지저항률이 높기 때문에 10[m] 접지전극 보다 큰 접지저항을 나타내었다.

표 1. 수직 접지전극의 길이별 접지저항 및 겉보기 대지저항률

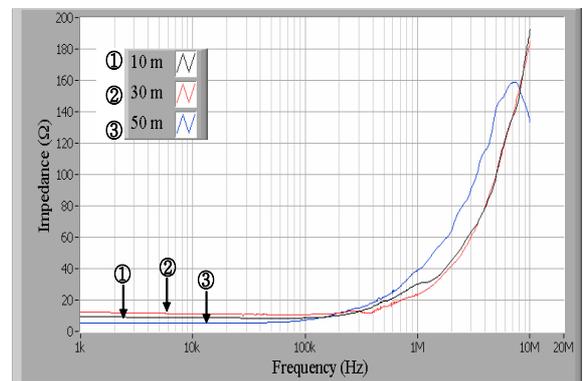
Table 1. Ground resistance and apparent soil resistivity as a function of the length of vertical grounding electrode

접지전극의 길이 [m]	10	30	48
접지저항 [Ω]	8.5	12.9	5.7
겉보기 대지저항률 [Ω·m]	73.2	289.5	193.8

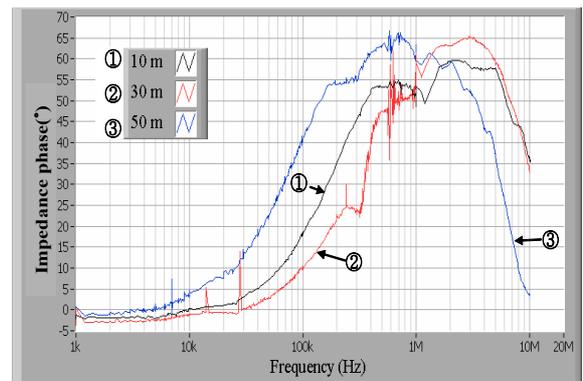
그림 2는 수직 접지전극의 길이별 접지임피던스와 위상차의 주파수 의존성을 나타낸다. 3개의 접지전극 모두 10[kHz] 이하의 주파수에서는 접지임피던스가 접지저항보다 약간 작은 용량성 특성을 나타내었다. 하지만 어느 주파수 이상에서 3개의 접지전극의 접지임피던스와 위상차가 증가하였고, 길이가 가장 긴 50[m] 접지전극의 경우 유도성 특성이 약 10[kHz] 주파수에서부터 나타나기 시작하였다. 때문에 약 300 [kHz] 이상의 주파수에서는 접지저항이 가장 낮은 50[m] 접지전극의 접지임피던스가 가장 크게 나타났다. 길이 10[m] 수직 접지전극의 경우 30[m] 수직접지전극 보다 대지저항률이 낮기 때문에 저주파수에서 측정된 접지저항이 낮으며, 어느 주파수 이상에서 접지전극의 길이가 긴 30[m] 접지전극의 접지임피던스가 더욱 빨리 상승하여 10[m] 접지전극의 접지임피던스와 거의 비슷한 값을 나타내었다. 이러한 결과는 대지저항률의 차이를 고려할 때 접지저항을 낮추기 위해 접지전극의 길이를 무조건 길게 하는 것은 고 주파수 영역에서 접지임피던스가 오히려 크게 증가하여 접지성능의 저하를 야기할 수 있다는 것을 의미한다.

그림 2 (b)는 주파수에 따른 전류와 전압의 위상차

를 나타낸다. 접지임피던스가 가장 낮은 주파수에서 상승하는 50[m] 수직접지전극의 경우 약 7[kHz] 이상의 주파수에서 전류의 위상이 전압에 비해 늦어지는 유도성 특성을 나타냈으며, 10[m]와 30[m]의 경우 약 10[kHz]까지 전류가 전압에 앞서는 용량성 특성을 나타내었다. 전류와 전압에 대한 위상차의 변화는 주파수가 상승함에 따라 모든 접지전극에서 0보다 약간 작은 부(-)에서 정(+)로 바뀌었으며, 이러한 변화는 대지저항률이 가장 높은 30[m] 수직접지전극에서 가장 늦게 발생하였다.



(a) 접지임피던스



(b) 위상차

그림 2. 수직 접지전극의 길이 및 대지저항률에 따른 접지임피던스와 위상차의 주파수 의존성

Fig. 2. Frequency-dependant grounding impedance and impedance phase according to the length of vertical grounding electrode and soil resistivity

2.3 매설지선의 길이 및 대지저항률에 따른 접지임피던스의 주파수의존성

수직 접지전극과 마찬가지로 대지저항률과 접지전극의 길이에 따른 매설지선의 접지임피던스의 주파수의존성을 측정하여 비교하였다. 25[mm²]의 나동선을 이용하여 길이 0.5[m]에 길이 10, 30, 50[m]의 매설지선을 설치하였다. 매설지선의 접지임피던스의 측정에 수정된 전위강하법을 이용하였으며, 접지전극의 형태에 의한 오차가 발생하지 않도록 전류보조전극을 매설지선의 길이방향으로 설치하였고[6], 도선유도에 의한 오차가 5[%] 미만인 지점에 보조전극을 설치하였다[8].

매설지선이 설치된 실험장의 대지저항률은 대체적으로 높았으며, 매설지선의 접지저항은 표 2와 같이 매우 크게 나타났다. 수직 접지전극과 마찬가지로 매설지선의 접지저항을 산출하는 식 (2)에 따라 대지저항률을 역산하였고[9], 그 결과를 표 2에 나타내었다. 매설지선의 경우 길이 30[m] 매설지선 주변의 대지저항률이 50[m] 매설지선 주변의 대지저항률 보다 낮기 때문에 30[m] 매설지선의 접지저항이 50[m] 매설지선과 거의 비슷한 값을 나타내었다.

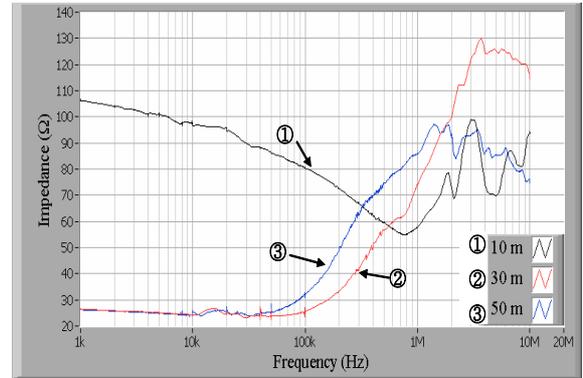
$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{l^2}{2ah} \right] \quad (2)$$

표 2. 매설지선이 다른 위치에 설치된 경우 길이별 접지저항 및 겹보기 대지저항률

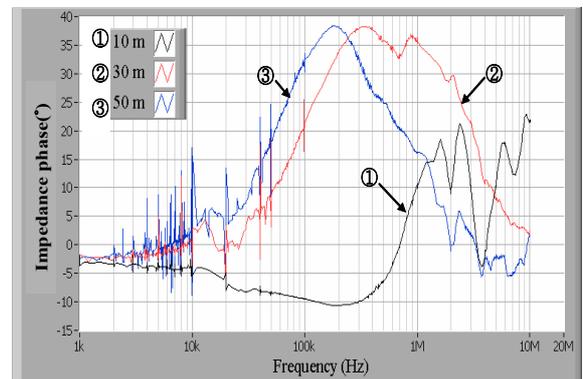
Table 2. Ground resistance and apparent soil resistivity as a function of the length as the counterpoises were buried at different sites

매설지선의 길이 [m]	10	30	50
접지저항 [Ω]	105.9	30.6	31.1
겹보기 대지저항률 [Ω·m]	635.1	455.1	713.4

매설지선의 길이별 대지저항률에 따른 접지임피던스와 위상차의 주파수의존성을 그림 3에 나타내었다. 10[m] 매설지선의 경우 대지저항률이 매우 높기 때문에, 약 800[kHz]까지 주파수가 증가함에 따라 접지임



(a) 접지임피던스



(b) 위상차

그림 3. 매설지선의 길이 및 대지저항률에 따른 접지임피던스와 위상차의 주파수의존성

Fig. 3. Frequency-dependant grounding impedance and impedance phase according to the length of counterpoise and soil resistivity

피던스가 감소하는 용량성 특성을 나타내었다. 반면에 30[m]와 50[m] 매설지선의 경우 약 30[kHz]까지 접지임피던스가 약간 감소하는 것으로 나타났으며 그 이후 주파수가 증가함에 따라 접지임피던스가 증가하는 유도성 특성을 나타내었다. 접지저항은 30[m] 매설지선과 50[m] 매설지선이 거의 같았으나 50[m] 매설지선의 경우가 더 낮은 주파수에서 유도성 특성을 나타내며, 50[kHz]이상의 주파수에서 1[MHz]까지 30[m] 매설지선보다 큰 접지임피던스를 나타내었다. 길이 10[m]인 매설지선의 접지저항은 길이 30, 50[m]인 매설지선에 비하여 약 3배 이상인 105.9[Ω]이었으나 약 300[kHz] 이상의 주파수에서 접지임피던스는

10[m]의 매설지선보다 30, 50[m]의 매설지선이 크게 나타났다.

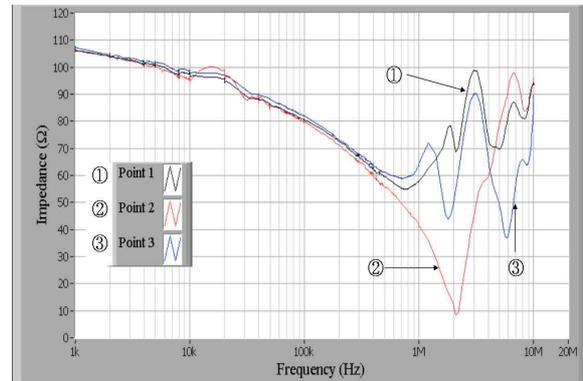
접지임피던스의 유도성과 용량성 특성은 그림 3 (b) 위상차의 주파수 특성에 따라 더욱 구분된다. 저주파수 영역에서는 모든 매설지선의 위상차가 부(-)를 띄어 용량성 특성을 나타낸다. 주파수가 상승함에 따라 50[m] 매설지선의 위상차가 먼저 증가하며, 그 뒤를 이어 30[m] 매설지선이 조금 더 높은 주파수에서 동일한 변화 양상을 나타낸다. 즉, 위상차가 증가하기 시작한 후 조금 더 높은 주파수에서 접지임피던스가 급격히 상승하며 유도성 특성을 나타낸다. 반면 10[m] 매설지선의 경우 약 200[kHz]까지 위상차가 감소하며 그 이후 급격하게 증가한다. 위상차가 감소하는 동안 더 높은 주파수까지 접지임피던스가 감소하는 용량성 특성을 나타내고 위상차가 증가한 이후 접지임피던스가 상승하는 유도성 추세를 나타낸다.

2.4 전류인가점에 따른 매설지선의 접지임피던스의 주파수의존성

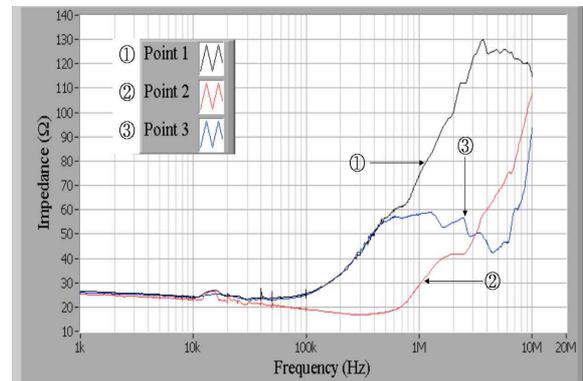
매설지선의 경우 접지그리드처럼 접지전극을 대지에 수평으로 설치하기 때문에 전류의 인가점을 다양하게 채택할 수 있다. 본 연구에서는 길이 10, 30, 50[m] 매설지선에 대하여 전류의 인가점에 따른 접지임피던스의 주파수 의존성을 분석하였다. 그림 4에 나타난 바와 같이 매설지선의 전류의 인가점 Point 1은 매설지선의 끝단에 전류가 인가되는 경우이고, Point 2는 매설지선의 중앙에 전류가 인가되어 전류가 2 방향으로 분류되는 것을 모의하였다. 또한 Point 3은 매설지선 끝단에 1.8[m] 수직 접지전극의 추가설치 여부에 따른 차이점을 분석하였다.



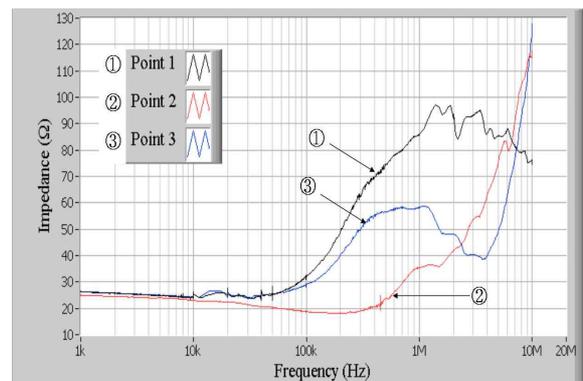
그림 4. 본 연구에서 채택한 매설지선의 측정전류의 인가위치
 Fig. 4. Injected point of the test current taken in this work



(a) 10[m] 매설지선



(b) 30[m] 매설지선



(c) 50[m] 매설지선

그림 5. 측정전류의 인가지점에 따른 주파수 의존성
 Fig. 5. Frequency-dependant grounding impedances of counterpoises according to the injected point of test current

그림 5는 매설지선의 길이별 측정전류의 인가위치에 따른 접지임피던스와 위상차를 나타낸다. 길이

10[m] 매설지선의 경우 Point 2 인가점에서는 Point 1 과 Point 3 인가점에 비해 높은 주파수까지 용량성 특성을 나타낸다. 이러한 특성은 전류가 중앙에 인가됨에 따라 매설지선의 양방향으로 분기되어서 매설지선 2개가 병렬로 연결된 효과와 한 방향의 전류가 흐르는 접지도체의 길이가 짧아져 인덕턴스성분의 감소 효과가 접지임피던스에 영향을 미치지 않기 때문이라고 판단된다. Point 3 인가점의 경우 Point 1 인가점에서와 거의 동일한 주파수에서부터 유도성 특성을 보이지만 1.8[MHz] 접지전극의 영향을 받아 Point 1 인가점과는 다르게 1.3[MHz]의 주파수에서부터 접지임피던스의 감소가 나타나는 경향을 보였다.

그림 5의 (b)와 (c)에 나타난 30[m] 매설지선과 50[m] 매설지선에서도 10[m] 매설지선에서와 동일하게 중앙점인 Point 2 인가점에서 용량성 특성이 높은 주파수까지 나타났다. 뿐만 아니라 30[m] 매설지선과 50[m] 매설지선의 경우 Point 1 인가점과 Point 3 인가점의 경우 1.8[m] 접지봉이 접속되어 있는 것과 그렇지 않은 것에 대한 명확한 차이를 나타내었다. 이러한 현상은 유도성 특성이 지배적으로 나타나는 길이가 긴 매설지선과 용량성 특성이 지배적으로 나타나는 짧은 길이의 수직 접지전극이 병렬로 연결되어 접지전극의 영향이 크게 나타나기 때문인 것으로 판단되며, 10[m] 매설지선에서는 매설지선 자체가 용량성 특성을 보여 1.8[m] 수직 접지전극의 영향이 상대적으로 작게 나타난 것으로 분석된다. 측정전류의 인가점에 따른 분석을 수행한 결과 접지시스템의 설계 시 매설지선의 경우 접지도선을 매설지선의 끝단보다 중앙에 접속하는 것이 접지임피던스를 저감시킬 수 있는 방법이며, 접지도선의 끝단에 인가하더라도 추가적으로 수직 접지전극을 설치함으로써 주파수의 증가에 따른 접지임피던스의 상승을 감소시킬 수 있다고 판단된다.

3. 결 론

수직 접지전극과 매설지선의 주파수에 따른 접지임피던스를 측정하고 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대지저항률이 높고 접지전극의 길이가 짧은 경

우 용량성 특성이 지배적이며 대지저항률이 낮고 접지전극의 길이가 긴 경우 유도성 특성이 지배적으로 나타났다.

- (2) 접지임피던스는 접지전극의 길이와 대지저항률에 따라 특정 주파수까지 증가하거나 감소하기 때문에 단순히 접지저항을 낮추기 위해 접지전극의 길이를 길게 하는 것은 매우 비효율적이라 판단된다.
- (3) 매설지선의 경우 전류가 인가되는 접지도선 되도록 매설지선의 중앙에 접속하고 길이가 긴 매설지선의 경우 추가적으로 접지봉을 설치함으로써 접지임피던스를 저감시킬 수 있다고 판단된다.
- (4) 본 논문은 실규모의 접지전극에 대한 다양한 접지임피던스의 주파수의존성에 대한 측정결과를 제시하였으며, 접지시스템의 설계 자료로 활용될 것이라 판단된다.

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 한국전기안전공사 (과제번호 : R-2007-1-014)주관으로 수행된 과제임.

References

- [1] Pedro Llovera, Juan Antonio Liso, Alfredo Quijano, Vicente Fuster, "High frequency measurements of grounding impedance on resistive soils", 28th ICLP, pp. 727-729, 2006.
- [2] A. Rousseau, P. Gruet, "Practical high frequency measurement of a lightning earthing system." 27th ICLP, pp. 526-530, 2004.
- [3] Hideki Motoyama, "Experimental and Analytical Studies on Lightning Surge Characteristics of Ground Mesh", Electrical Engineering in Japan, Vol. 160, No. 4, pp.16-23, 2007. Translated from Denki Gakkai Ronbunshi, Vol.126-B, pp.687-693, 2006.
- [4] Bok-Hee Lee, Jeong-Hyun Joe and Jong-Hyuk Choi, "Simulation of Frequency-dependent Impedance of Ground Rods Considering Multi-layered Soil Structures", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.4, No.4, pp.531-537, 2009.
- [5] IEEE Std. 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", pp.12-17, 1991.
- [6] 최중혁, 최영철, 이복희, "수직 접지전극의 접지임피던스

측정에서 도전유도에 의한 오차 평가”, 전기학회 논문지, Vol.58, No. 9, pp.1778~1783, 2009.

- [7] Masanobu Tsumura, Yoshihiro Baba, Naoto Nagaoka, Akihiro Ametani, “FDTD Simulation of a Horizontal Grounding Electrode and Modeling of its Equivalent Circuit”, IEEE Trans. on EC, Vol.48, No.4, pp. 817-825, 2006.
- [8] 최영철, 최종혁, 이복희, 전덕규 “수직 또는 수평으로 매설된 접지전극의 접지임피던스 측정시 보조전극 위치에 따른 전자유도의 영향”, 조명·전기설비학회논문지, Vol. 23, No.8, pp.86-92, 2009.
- [9] 이복희, 이승철, “접지의 핵심 기초 기술”, 도서출판 의제, pp.84-87, 1999.

◇ 저자소개 ◇



최종혁(崔鍾赫)

1980년 5월 12일생. 2006년 2월 인하대 공대 전자공학과 졸업. 2008년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : chjohy80@naver.com



최영철(崔泳喆)

1980년 6월 28일생. 2008년 8월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : babocyc@hotmail.com



조성철(趙成哲)

1977년 12월 16일생. 2003년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : (02)885-9443
E-mail : canfeel@snu.ac.kr



이복희(李福熙)

1954년 6월 29일생 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경 대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대

IT공대 전기공학부 교수. 본 학회 회장.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr