

접지전극의 형상에 따른 과도접지임피던스

(Transient Ground Impedances According to Shapes of Grounding Electrodes)

이복희 · 이수봉 · 이태형 · 정현욱 · 정동철

(Bok-Hee Lee · Su-Bong Lee · Tae-Hyung Lee · Hyun-Uk Jung · Dong-Cheol Jeong)

요 약

본 논문은 임펄스전류에 따른 접지시스템의 과도 특성에 관한 것으로 임펄스 전류를 심매설 봉상 접지전극과 그 리드 접지전극에 인가하였을 때 나타나는 과도접지임피던스를 조사하였다. 과도접지임피던스는 인가전류의 상승시간과 접지전극의 크기 및 형태에 강하게 의존하며, 접지전극의 인덕턴스는 짧은 시간 영역에서 접지시스템의 과도 접지임피던스에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 심매설 봉상접지전극은 짧은 시간영역에서 과도접지임피던스를 줄이는데 효과적이었다.

Abstract

This paper presents the transient behaviors of grounding system impedance against lightning impulse currents. The dynamic characteristics of the deeply driven ground rod and grounding grid subjected to the impulse current were investigated. The transient ground impedance strongly depends on the configuration and size of grounding electrodes and the shapes of impulse currents, and the inductance of grounding electrodes has a significant affect on the transient ground impedance of grounding system. Also, the deeply-driven ground rod was effective to reduce the transient ground impedance in time domain of micoseconds.

Key Words : Transient ground impedance, Potential rise, Effective impulse impedance, Deeply driven ground rod, Grounding grids, Surge protection

1. 서 론

접지의 목적은 접지시스템에 발생한 이상전압, 전류를 대지로 방류하여 전위상승을 억제하는 것과 전위의 균등화를 도모하는 것이다. 낙뢰가 발생한 대

지의 어느 지점에 뇌격전류가 유입될 때 그 지점 근방의 전위가 상승하고 전위경도를 가지게 된다.

접지시스템의 임펄스접지임피던스는 낙뢰에 대한 전기설비의 보호에 있어서 중요한 요소이며, 접지시스템의 성능을 임펄스접지임피던스로 분석하는 연구가 이루어지고 있다. 뇌격전류에 주안점을 둔 접지시스템에서의 임펄스접지임피던스 특성은 대지저항률, 접지전극의 형상과 치수 및 뇌격전류의 파형에 따라 매우 다양하다. 접지시스템의 임펄스접지임피던스

* 주저자 : 인하대학교 전자전기공학부
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2005년 9월 23일
1차심사 : 2005년 9월 28일
심사완료 : 2005년 10월 13일

접지전극의 형상에 따른 과도접지임피던스

특성에 관한 연구는 아직 부족하며, 특히 실제 접지 시스템의 경우에 대한 과도적 특성은 아직 밝혀지지 않은 점이 많다. 그러므로 접지시스템의 과도접지임피던스 특성에 대한 면밀한 검토가 요구되며, 실효임펄스접지임피던스로 평가할 필요가 있다[1-3].

따라서 본 논문에서는 도심과 같은 협소한 장소나 지표층의 대지저항률이 높은 곳에서 주로 사용되는 심매설 봉상 접지전극과 건물 바닥의 접지나 등전위화 접지에 주로 사용되는 그리드 접지전극에 뇌임펄스전류를 인가한 경우 접지전극에 나타나는 전위상승과 실효임펄스접지임피던스의 과도적 특성을 측정하고 분석하였다. 인가된 임펄스전류의 상승시간 변동에 따라 나타나는 전위상승과 접지임피던스의 결과를 실험적으로 검토하고, 그리드 접지전극과 심매설 봉상 접지전극이 병렬로 접속된 경우 임펄스전류에 대한 효과를 검토하였다.

2. 실험

2.1 실험계 구성

피측정 접지전극-전위보조전극-전류보조전극이 일직선상에 배치되는 전형적인 전위강하법은 대형 접지시스템의 접지임피던스를 측정하는 기본적인 방법이지만 임펄스전류와 같이 고주파수를 포함하는 전류를 측정전류로 하는 경우에는 전자유도작용에 의한 오차가 크므로 적절하지 않다. 즉 측정대상의 접지전극으로부터 전류보조전극을 연결하는 도선과 전위보조전극 사이에 발생하는 전자유도결합에 의해서 커다란 오차가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 IEEE 81.2-1991에서 권고하고 있는 그림 1과 같이 전류보조전극을 전위보조전극과 90° 각도를 이루게 배치하는 수정된 전위강하법을 적용하였다[4].

접지해석 프로그램(CDEGS: Current Distribution, Electromagnetic Interference, Grounding and Soil Structure)의 저항률 측정 분석(RESAP: Resistivity Measurement Analysis)모듈을 이용하여 대지저항률을 분석하였다. 측정장소는 표토층의 대지저항률이 94.53[Ω·m]이고, 7.3[Ω·m]의 대지저항률을 가지는 중간층이 존재하며 하부층의 대지저항

률이 약 50.3[Ω·m]로 그림 2와 같은 3층 대지구조로 평가되었다.

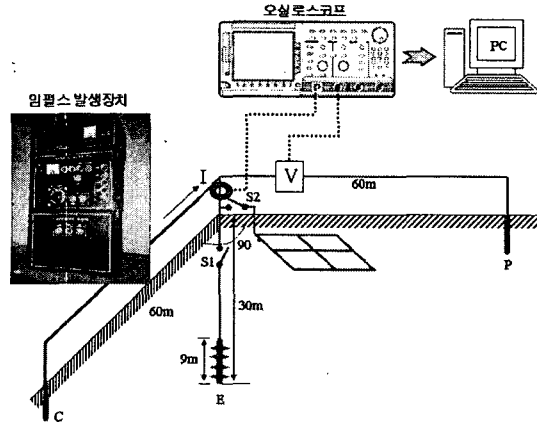


그림 1. 접지임피던스의 측정회로
Fig. 1. Test circuit of ground impedance

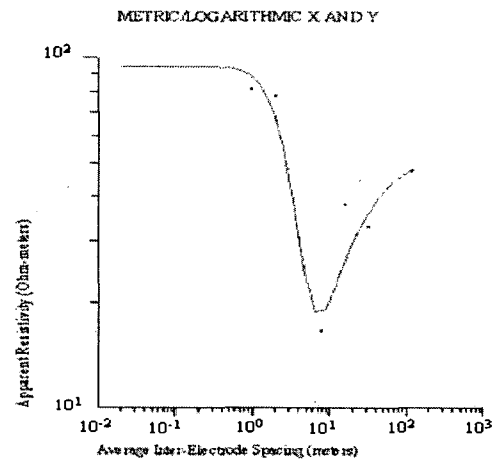


그림 2. 측정장소의 대지구조
Fig. 2. Soil structure in test site

보링공법을 이용하여 9[m] 봉상 접지전극을 지표면으로부터 30[m]의 깊이에 수직으로 설치하고, 100[mm] 나동선 2가닥으로 인출하였다. 또한 그리드 접지전극의 경우 20[m]×20[m]와 52[m]×37[m] 크기의 100[mm] 나동선으로 구성된 주 그리드를 지표면으로부터 0.75[m] 깊이에 매설하였다. 측정대상의 접지전극 E와 전류보조전극 C 또는 전위보조전극 P 사이의 거리는 각각 60[m]로 하였다. 전류보조전극은 1.2[m] 봉상 접지전극 8개를 병렬로 설치하여 합

성접지저항이 약 42[Ω]이 되도록 설치하였으며, 전위보조전극으로는 1.2[m] 봉상 접지전극을 설치하였다. 또한 임펄스전류를 인가시키는 전류보조선으로 38[mm] GV전선을 사용하였다.

2.2 측정방법

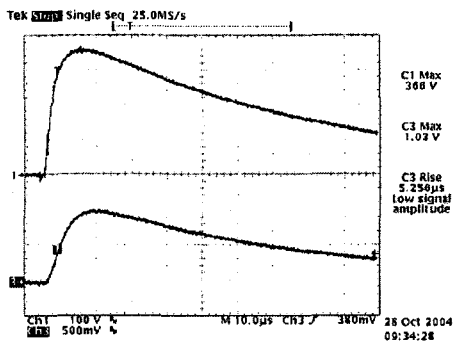
임펄스전류를 실험용 접지전극에 인가하기 위해 조합형 임펄스 전압·전류 발생장치를 사용하였다. 충전용 커패시턴스의 용량과 최대 충전전압은 각각 30[μF]과 10[kV]이다. 20[Hz]~100[kHz]의 주파수 대역을 갖는 변류기를 이용하여 전류를 측정하였으며, 접지전극의 전위는 75[MHz]의 주파수 대역을 갖는 능동성 차동프로브로 측정하였다. 인가전류와 접지전극의 전위 파형은 500[MHz], 2.5[GS/s] 분해능의 오실

로스코프로 관측하였다. 오실로스코프의 연산기능을 이용하여 접지전극의 전위 파형을 인가전류의 파형으로 나누어 임펄스접지임피던스 파형을 산출하였다.

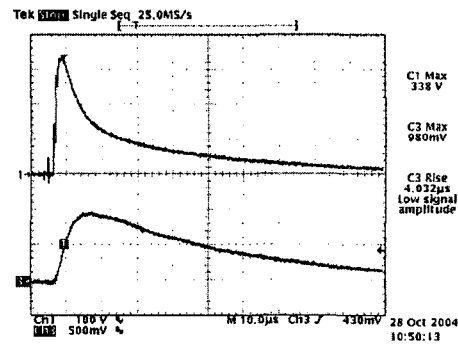
3. 결과 및 검토

3.1 과도접지임피던스

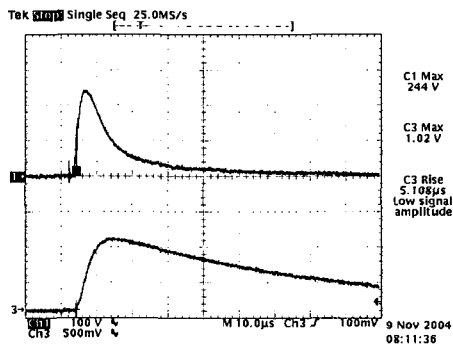
길이 30[m]인 심매설 봉상 접지전극, 20[m]×20[m], 52[m]×37[m] 그리드 접지전극, 봉상 접지전극과 20[m]×20[m] 그리드 접지전극이 병렬로 연결된 경우의 정상상태 접지저항의 측정값은 각각 3.8, 1.6, 0.57, 1.3[Ω]이다. 정상상태 접지저항은 길이 30[m]인 심매설 봉상 접지전극이 가장 크게 나타났고,



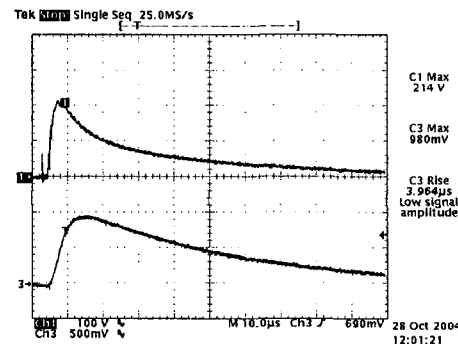
(a) 30(m) 심매설 봉상 접지전극



(b) 20(m)×20(m) 그리드 접지전극



(c) 52(m)×37(m) 그리드 접지전극



(d) 30(m) 심매설 봉상 접지전극과 20(m)×20(m) 그리드 접지전극의 병렬연결

1 : 전위상승(100(V/div), 10(μs/div)) 3 : 인가전류(50(A/div), 10(μs/div))

그림 3. 접지전극의 형상별 인가전류와 전위 파형

Fig. 3. Typical waveforms of the incident impulse current and potential rise of various grounding electrodes

접지전극의 형상에 따른 과도접지임피던스

52[m]×37[m] 그리드 접지전극의 경우가 가장 낮게 나타났다. 접지전극에 인가한 임펄스전류와 전위 상승의 전형적인 파형을 그림 3에 나타내었다.

인가된 임펄스전류의 피크값은 약 100[A]이며, 상승시간은 측정대상 접지전극의 임피던스에 따라 약간 다르게 나타났다. 접지전극에 유도된 천위 파형의 상승시간은 인가전류의 상승시간보다 약간 짧게 나타났다. 이러한 인가전류와 전위의 상승시간의 차이는 시험용 접지전극의 회로요소가 저항과 인덕턴스로 이루어졌기 때문이며, 인덕턴스의 영향이 크게 작용하게 되면 위상차는 더욱 커지게 된다. 특히 전위 파형은 실험용 접지전극의 접지저항과 인덕턴스에 강하게 의존한다. 길이 30[m]의 심매설 봉상 접지전극에서 전위 파형의 상승시간은 20[m]×20[m]와 52[m]×37[m] 그리드 접지전극에 비해 다소 빠르게 나타났다. 이는 길이 30[m]인 심매설 봉상 접지전극의 높은 접지저항이 원인이며, 20[m]×20[m]와 52[m]×37[m] 그리드 접지전극의 경우 전위 파형에 영향을 미친 요인은 대부분 접지전극 자체의 인덕턴스 성분이 지배적인 것으로 나타났다.

과도접지임피던스는 실험용 접지전극의 전위를 인가전류로 나누어 산출하였다. 접지전극의 형상에 따른 과도접지임피던스 파형($Z-t$ 곡선)을 그림 4에 나타내었다. 일반적으로 과도접지임피던스는 접지전극의 형상과 크기, 접지도체의 인덕턴스, 대지저항률, 인가전류의 크기와 형태 등 여러 가지 요인의 복합적 효과에 의존한다. 과도접지임피던스는 인가된 임펄스전류 피크값까지는 지수 함수적으로 감소하였다. 임펄스전류 피크값에서의 접지임피던스는 접지저항과 거의 같았으며, 인덕턴스의 영향이 없는 것으로 볼 수 있다. 임펄스전류의 피크 이후 과도접지임피던스는 지속적으로 감소하지만 이는 측정회로 자체의 회로적 특성이며, 접지전극 자체의 과도접지임피던스의 특성을 나타내지는 않는다. 즉 임펄스전류에 의한 접지전극의 과도적 특성은 인가전류인 임펄스전류의 파두부에서 나타나게 된다. 길이 30[m]인 심매설 봉상 접지전극의 과도접지임피던스는 20[m]×20[m] 그리드 접지전극에 비해 다소 높게 나타났으며, 봉상 접지전극과 그리드 접지전극을 병렬 연결하였을 때 빠른 상승시간에서의 과도임피던

스가 가장 낮게 나타났다.

임펄스전류 피크 이전의 시간 범위에서 과도접지임피던스는 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 과도접지임피던스의 인덕턴스 성분이 우세하게 작용한 것이며, 전류 피크값에서 접지임피던스는 접지저항과 거의 같아진다. 특히 봉상 접지전극과 그리드 접지전극이 6[μ s]를 전후로 서로 교차하는 것을 볼 수 있다. 이는 20[m]×20[m]와 52[m]×37[m] 그리드 접지전극의 경우 빠른 상승시간에서 인덕턴스의 영향이 뚜렷이 나타나며, 길이 30[m]인 심매설 봉상 접지전극의 경우 주로 인덕턴스의 영향보다는 저항 성분의 영향이 지배적으로 나타났기 때문이다.

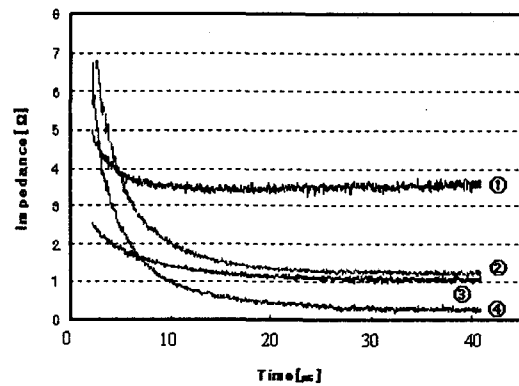


그림 4. 접지전극의 형상별 $Z-t$ 곡선(①: 심매설 봉상 접지전극, ②: 20[m]×20[m] 그리드 접지전극, ③: 심매설 봉상 접지전극 + 20[m]×20[m] 그리드 접지전극, ④: 52[m]×37[m] 그리드 접지전극)

Fig. 4. $Z-t$ curves of various grounding electrodes(①: Ground rod, ②: 20[m]×20[m] Ground grid, ③: Ground rod + 20[m]×20[m] Ground grid, ④: 52[m]×37[m] Ground grid)

3.2 실효임펄스접지임피던스

실효임펄스접지임피던스는 인가전류와 접지전극의 전위로부터 얻을 수 있으며, 임펄스전류의 인가에 대한 과도접지임피던스의 개략도를 그림 5에 나타내었다. 접지시스템의 근본 목적이 계통의 고장전류 및 뇌격전류에 의해 나타나는 전위의 크기를 제한하는 것이므로 접지전극의 전위가 최대한인 상태

에서의 접지임피던스는 중요한 의미를 가진다. 그러므로 실효임펄스접지임피던스 Z_{eff} 는 전위가 최대인 점에서의 임피던스로 정의하였으며, 다음의 수식으로 계산된다[5-7].

$$Z_{eff} = \frac{V_{max}}{I} \quad (1)$$

그림 5에서 V_{max} 는 접지전극의 전위 파형의 최대값이며, I 는 전위가 최대인 순간의 전류이다.

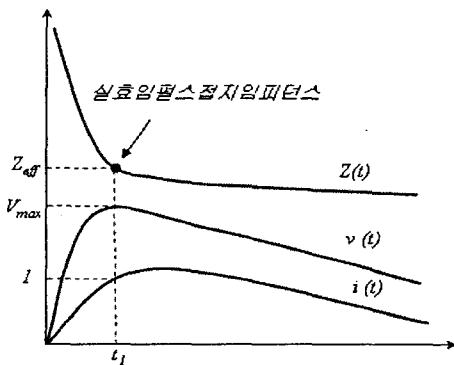


그림 5. 실효임펄스접지임피던스의 정의
Fig. 5. Definition of the effective impulse ground impedance

접지시스템의 과도접지임피던스를 결정하는 중요한 요소들은 접지저항, 접지전극 자체의 저항 및 인덕턴스 그리고 토양의 정전용량 등이다[8]. 특히 과도접지임피던스는 접지전극의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스의 영향을 받으므로 동봉을 접지전극으로 사용한 경우 저항과 인덕턴스의 조합으로 전기적 등가회로를 구성할 수 있다. 특히 낮은 대지저항률을 가지는 토양에 접지전극을 시설하는 경우 대지의 커패시턴스성분은 무시되기도 한다. 임펄스전류에 대한 접지전극의 전위는 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

R 은 접지저항과 접지전극 자체의 저항의 합이고, L 은 접지전극의 인덕턴스이다. 접지전극의 길이가 길어지면 접지저항 R 은 감소하고 인덕턴스 L 은 증

가한다. 즉 심매설 봉상 접지전극의 경우 접지전극의 전위 파형에서 리액티브성분이 지배적이며, 저항 성분은 비교적 미소하다. 접지저항은 기본적으로 대지저항률과 접지전극의 치수에 의해 결정된다. 접지전극의 길이가 길어지면 접지저항은 감소하고, 과도 접지임피던스는 접지전극의 인덕턴스의 영향으로 증가한다. 또한 인가하는 임펄스전류의 파형에 의존하게 된다. 즉, 임펄스전류의 변화율에 의한 전위강하 때문에 접지임피던스는 증가한다.

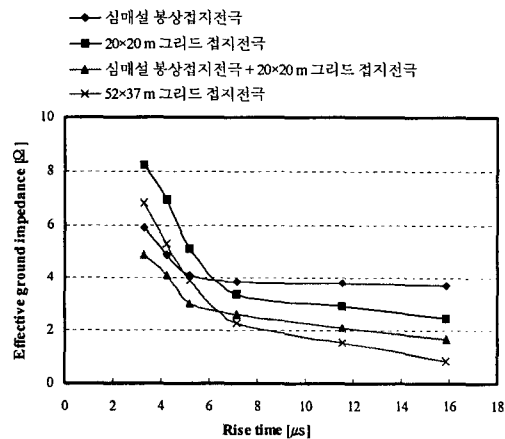


그림 6. 접지전극의 네 가지 형태에서 인가전류의 상승시간에 따른 실효임펄스접지임피던스
Fig. 6. Effective impulse ground impedance against the rise time of the injected impulse current for four grounding electrodes

임펄스전류의 상승시간에 따른 접지전극의 실효임펄스접지임피던스를 측정하여 접지전극의 형상별도 도시한 결과를 그림 6에 나타내었다. 실효임펄스접지임피던스는 인가전류의 상승시간과 접지전극의 형상에 크게 의존하는 것으로 나타났다. 심매설 봉상 접지전극의 실효임펄스접지임피던스는 $6[\mu s]$ 이전의 빠른 상승시간에서 그리드 접지전극에 비해 작게 나타났지만, $6[\mu s]$ 이후에는 반전된 특성을 나타내고 있다. 이것은 빠른 상승시간에서 실효임펄스접지임피던스는 주로 그리드 접지전극의 낮은 접지저항과 상대적으로 인덕턴스 성분의 영향이 지배적으로 작용한 결과이며, 느린 상승시간에서는 심매설 봉상 접지전극의 높은 접지저항값의 영향이 지배적으로 나

접지전극의 영상에 따른 과도접지임피던스

타났기 때문이다. 본 실험에서 길이 30[m]인 심매설 봉상 접지전극의 경우가 인가전류의 상승시간에 따른 영상이 20[m]×20[m] 그리드 접지전극에 비해 상대적으로 적으며, 심매설 봉상 접지전극과 그리드 접지전극을 병렬로 연결하였을 때 실효임펄스접지임피던스 특성의 변동이 적은 것으로 나타났다. 뇌보호용 접지시스템으로는 정상상태 접지저항이 0.57[Ω]으로 가장 작은 52[m]×37[m] 그리드 접지전극보다 접지저항이 약 2배인 20[m]×20[m] 그리드와 30[m] 봉상접지전극의 병렬 접속한 형태가 보다 효과적임을 알 수 있다. 결국 접지저항과 접지도체의 인덕턴스 성분의 저감이 접지시스템의 실효임펄스접지임피던스를 줄이는 핵심적 요소임을 알 수 있다.

4. 결 론

과도접지임피던스는 인가전류의 상승시간과 접지전극의 크기 및 형태에 크게 의존하며, 실효임펄스 접지임피던스는 접지전극의 인덕턴스와 접지저항에 상당히 의존적이다. 정상상태 접지저항이 낮은 접지시스템이 반드시 과도접지임피던스가 낮은 것은 아니며, 과도접지임피던스에 영향을 미치는 요소를 고려한 심층적 평가가 합리적이다. 특히 심매설 봉상 접지전극과 그리드 접지전극을 병설하는 것이 매우 짧은 영역의 과도접지임피던스의 저감에 매우 효과적이며, 접지시스템의 적절한 과도접지임피던스를 얻기 위한 효과적인 방법은 접지저항과 인덕턴스를 동시에 감소시키는 것이 유효한 것으로 밝혀졌다.

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] T. Takahashi, "A Part of Grounding for Lightning Protection Technique", J. IEE of Japan, Vol.9, pp.671~676, 1989.
- [2] Bok-Hee Lee, Dong-Cheol Jeong, Su-Bong Lee and Keun-Chul Chang, "Effective Impulse Impedances of Deeply Driven Grounding Electrodes", KIEE International Trans on EA, vol. 4-C, no. 5, pp. 207~214, 2004.
- [3] S. Karaki, et al, "Transient Impedance of GIS Grounding Grid", IEEE Trans., Vol. PD-10, No.2, pp.723~738, 1995.
- [4] IEEE Std 81.2-1991, "IEEE guide for Measurement of

Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Inter connected Grounding System", IEEE Inc., pp. 17~31, Dec. 1991.

- [5] Z. Stojkovic, M.S. Savic, J.M. Nahman, D. Salamon and B. Bukorovic, "Sensitivity Analysis of Experimentally Determined Grounding Grid Impulse Characteristics", IEEE Trans., Vol. PD-13, No. 4, pp.1136~1141, 1998.
- [6] B. H. Lee, J. S. Park and S. C. Lee, "Experimental Investigations of Transient Impedances of Some Grounding Systems", 1997 Japan-Korea Joint Syms. ED & HVE, pp.237~240, 1997.
- [7] B. R. Gupta and B. Thapar, "Impulse Impedance of Grounding Grids", IEEE Trans. Vol. PAS-99, No.6, pp.214~218, 1980.
- [8] M. Ramamoorthy, M. M. Babu Narayanan, S. Parameswaran and D. Mukhedkar, "Transient Performance of Grounding Grids", IEEE Trans. Vol. PD-4, pp.2053~2058, No.4, 1989.

◇ 저자소개 ◇

이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기 컴퓨터공학부 교수.

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

이수봉 (李守俸)

1979년 4월 13일생. 2002년 2월 경남대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel: (032)860-8847, Fax. (032)863-5822,
E-mail: lsbong1@naver.com

이태영 (李泰炯)

1978년 6월 21일생. 2004년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel: (032)860-8847, Fax. (032)863-5822,
E-mail: tanghi@empal.com

정현욱 (鄭鉉郁)

1978년 5월 26일생. 2004년 8월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel: (032)860-8847, Fax. (032)863-5822,
E-mail: uka55577@hotmail.com

정동철 (鄭東喆)

1964년 9월 18일생. 1989년 2월 영남대 전기공학과 졸업. 2002년 2월 고려대학교 산업대학원 졸업(석사). 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel: (032)860-7398, Fax. (032)863-5822,
E-mail: dcjeong2000@korea.com