Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 20, No.4, pp. 72~77 May 2006

논문 20-4-11

인하도선의 길이가 과도접지임피던스에 미치는 영향

(Effects of the Length of Down Conductors on Transient Ground Impedances)

이복희* · 이수봉 · 정동철

(Bok-Hee Lee · Su-Bong Lee · Dong-Cheol Jeong)

요 약

본 논문은 인하도선의 설치에 따른 접지시스템의 임펄스전류에 대한 과도임피던스 특성을 다루었다. 임펄스전류를 심매설 봉상 접지전극과 그리드 접지전극에 인가하였을 때 임펄스전류의 상승시간과 인하도선의 길이에 따른 전위상승과 실효임펄스접지임피던스를 측정하고 분석하였다. 과도접지임피던스는 접지전극의 형상과 크기 및 임펄스전류의 파형과 인하도선의 길이에 강하게 의존하며, 인덕턴스가 최소화되도록 인하도선을 설치하는 기법이 과도접지임피던스의 저감을 위한 중요한 요소이다.

Abstract

This paper presents the transient impedance behaviors according to the length of down conductors of grounding systems to lightning impulse currents. The potential rise and effective impulse ground impedance of the deeply-driven ground rod and grounding grid subjected to the impulse currents were measured and analyzed as a function of the rise time of impulse currents and lengths of down conductor. The transient ground impedances strongly depend on the configuration and size of grounding electrodes, the waveform of impulse currents and the length of down conductors, and the installation methods reducing the inductance of down conductors are an important factor to decrease the transient ground impedances.

Key Words : Down conductor, Impulse ground impedance, Impulse current, Ground rod, Grounding grid

1. 서 론

접지란 대지에 전기적 단자를 접속하는 것이며, 접지의 목적은 피보호시스템에 유입되는 이상전압을 저감시키고, 고장전류를 대지에 효과적으로 방류시켜 전위상승을 억제함으로써 기기의 파손방지와 인체를 안전하게 보호하는데 있다. 또한 접지시스템 전위를 균등하게 하며, 안정된 기준점 전위를 제공하여 전기설비의 기능의 향상을 도모하는 것이다[1-2].

접지시스템에 고장전류가 흐르면 접지전극의 전위 및 주위 대지전위가 상승하며, 대지전위상승은 건전한 전기회로나 전자기기에 영향을 주어 2차적인 피해를 유발한다. 접지전류에 의하여 접지전극의 전위상승이 발생할 때 전위상승을 일정한 범위 이하로 억

* 주저자 : 인하대학교 전자전기공학부
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2006년 1월 13일
1차심사 : 2006년 1월 18일
심사완료 : 2005년 1월 31일

제하기 위해서 접지저항이 적당한지를 평가하는 것이 대부분이다. 하지만 뇌격전류에 대한 보호는 단순히 접지저항의 저감만으로는 효과적이지 못하다.

특히 뇌격전류로부터 전원계통과 전자기기를 보호하기 위해서는 과도접지임피던스를 고려하여야 접지전극의 대지전위상승을 효과적으로 억제함으로써 가능하다. 일반적으로 뇌격전류에 주안점을 둔 접지시스템에서의 임펄스임피던스 특성은 대지저항률, 접지전극의 형상과 치수 및 뇌격전류의 특성, 인하도선의 길이에 따라 매우 다양하다. 현재까지는 주로 접지전극 자체의 접지저항의 저감에 치중하여 연구되어 왔으며, 인하도선을 포함하는 뇌보호설비의 임펄스특성에 대한 검토는 비교적 미흡한 실정이다. 그러므로 접지시스템의 과도임피던스 특성에 대한 면밀한 검토가 요구되며, 실효임펄스접지임피던스로 평가할 필요가 있다[3-5].

따라서 본 논문에서는 뇌보호설비 구성에 상응하는 심매설 봉상 접지전극과 그리드 접지전극에 인하도선을 설치하고 임펄스전류를 인가한 경우 접지전극에 나타나는 전위상승과 실효임펄스접지임피던스의 특성을 측정하고 분석하였다. 인가된 임펄스전류의 상승시간 변동에 따라 나타나는 전위상승과 접지임피던스의 결과를 실험적으로 검토하고, 그리드 접지전극과 심매설 봉상 접지전극이 병렬로 접속된 경우 임펄스전류에 의한 인하도선이 과도접지임피던스에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실 험

2.1 실험계의 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. 따라서 본 논문에서는 IEEE 81.2-1991에서 권고하고 있는 그림 1과 같이 전류보조전극을 전위보조극과 90[°] 각도를 이루게 배치하는 수정된 전위강하법을 적용하였다[6].

봉상 접지전극의 경우 보링공법을 이용하여 9[m] 봉상 접지전극을 지표면으로부터 30[m]의 깊이에 수직으로 설치하고, 100[㎟] 나동선 2가닥으로 인출하였다. 또한 그리드 접지전극의 경우 20×20[m], 52×37[m] 크기의 100[㎟] 나동선으로 구성된 주 그리드를 지표면으로부터 0.75[m] 깊이에 매설하였다. 측정대상 접지전극(E)으로부터 전위보조전극(P)과 전류보조전극(C)은 각각 60[m] 떨어진 지점에 설치하였으며, 전류보조전극은 낮은 접지저항을 얻기 위해 1[m] 봉상 접지전극 8개를 병렬로 연결하였다. 또한 임펄스전류를 인가시키는 전류보조선으로 38[㎟] GV전선을 사용하였고, 인하도선의 영향을 평가하기 위하여 50[m], 30[m] 길이의 38[㎟] GV전선을 인하도선으로 설치하였다.

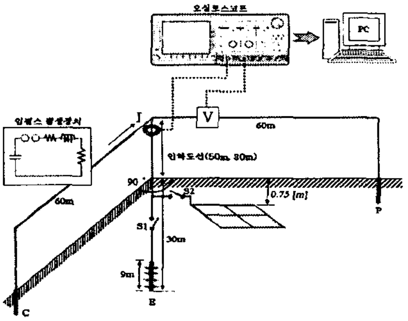


그림 1. 접지임피던스의 측정회로
Fig. 1. Test circuit of ground impedance

2.2 측정방법

임펄스전류를 시험용 접지전극에 인가하기 위해 조합형 임펄스 전압 · 전류 발생장치를 사용하였다. 충전용 커패시터의 정전용량과 최대 충전전압은 각각 30[㎌]과 10[kV]이다. 20[Hz]~100[㎒]의 주파수 대역을 갖는 변류기를 이용하여 전류를 측정하였으며, 접지전극의 전위는 75[㎒]의 주파수 대역을 가지는 능동성 차동프로브로 측정하였다. 인가전류와 접지전극의 전위 파형은 500[㎒], 2.5[GS/s] 분해능의 오실로스코프로 관측하였다. 오실로스코프의 연산기능을 이용하여 접지전극의 전위 파형을 인가전류의 파형으로 나누어 임펄스임피던스 파형을 산출하였다.

3. 결과 및 검토

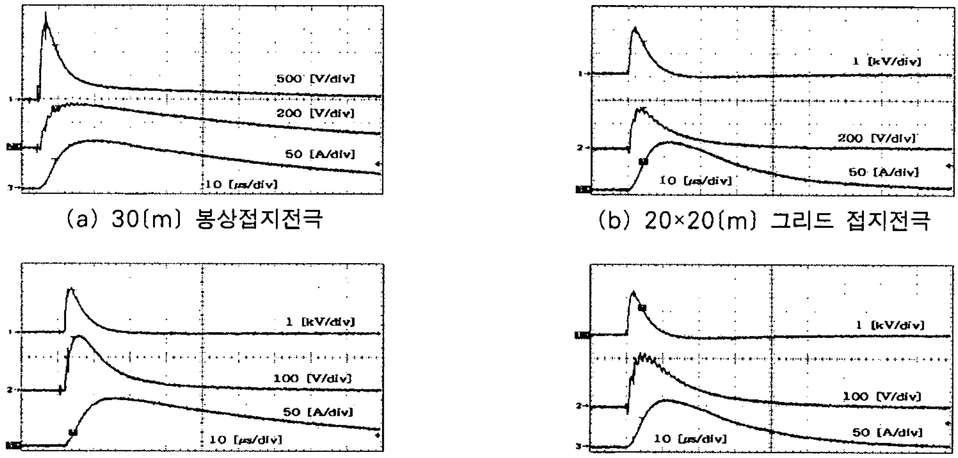
3.1 과도접지임피던스

길이 30[m]인 심매설 봉상 접지전극, 20×20[m], 52×37[m] 그리드 접지전극, 봉상 접지전극과 20×20[m] 그리드 접지전극이 병렬로 연결된 경우의 정상상태 접지저항은 각각 3.8, 1.6, 0.57, 1.3[Ω]이다. 정상상태 접지저항은 길이 30[m]인 심매설 봉상 접지전극이 가장 크게 나타났고, 30[m] 심매설 봉상 접지전극과 20×20[m] 그리드 접지전극을 병렬로 연결한 경우, 52×37[m] 그리드 접지전극 순으로 낮게 나타났다. 50[m] 길이의 인하도선이 설치된 접지전극에 인가한 임펄스 전류와 전위상승의 전형적인 파형의 예를 그림 2에 나타내었다.

인가된 임펄스전류의 피크값은 약 100[A]이며, 상승시간은 측정대상 접지전극의 임피던스에 따라 약간 다르게 나타났다. 인하도선의 길이가 길어질수록 인하도선의 인덕턴스가 증가하며, 접지전극에 유도된 전위 파형의 상승시간은 인덕턴스에 의한 유도전압 즉, 인가전류의 시도함수에 비례하므로 인가전류의 상승시간보다 짧게 나타났다.

이러한 인가전류와 전위의 상승시간 차이는 시험용 접지전극의 회로요소가 주로 저항과 인덕턴스로 이루어졌기 때문이며, 인하도선의 길이가 길어질수록 인덕턴스의 영향이 크게 작용하게 되며 위상차는 더욱 커지게 된다. 특히 전위 파형은 시험용 접지전극의 접지저항과 인덕턴스에 강하게 의존한다. 인하도선이 0[m]인 접지전극 자체인 경우에 비해 인하도선의 길이가 50[m]인 경우 전위 파형은 접지저항 성분에 의한 영향은 거의 나타나지 않고 대부분 인하도선에 의한 인덕턴스 영향이 지배적인 것으로 나타났다. 또한 인하도선이 0[m]인 지점에서 30[m]인 심매설 봉상 접지전극의 전위파형은 다른 시험용 접지전극에 비해 높은 접지저항에 의한 영향이 크게 나타났으며, 20×20[m]와 52×37[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 형상별 인하도선의 길이에 따른 과도접지임피던스 파형($Z-t$ 곡선)을 그림 3에 나타내었다. 일반적으로 과도접지임피던스는 접지전극의 형상과 크기, 접지도체의 인덕턴스, 대지저항률, 인가전류의 파형, 인하



(a) 30[m] 봉상접지전극

(b) 20×20[m] 그리드 접지전극

(c) 52×37[m] 그리드 접지전극

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

1 : 인하도선 50[m] 지점의 전위상승, 2 : 인하도선 0[m] 지점의 전위상승, 3 : 인가전류

그림 2. 시험용 접지전극의 형상별 인가전류와 전위 파형
Fig. 2. Typical waveforms of the incident impulse current and potential rise by shapes of grounding electrodes

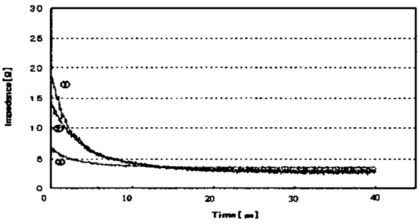
도선의 길이 등 여러 가지 요인의 복합적 효과에 의존한다. 과도접지임피던스는 인가된 임펄스전류 피크값까지는 지수 함수적으로 감소하였다. 임펄스전류 피크값에서의 접지임피던스는 $\frac{di}{dt}=0$이므로 접지저항과 거의 같았으며, 인덕턴스의 영향이 없는 것으로 볼 수 있다.

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. 과도접지임피던스는 10[㎲] 이전에는 지수 함수적으로 감소하여 정상상태 접지저항 값으로 수렴하였다. 이러한 현상은 과도접지임피던스의 인덕턴스 성분이 우세하게 작용한 것이며, 시간이 흐름에 따라 저항성분에 의하여 임피던스는 일정한 값으로 수렴한다.

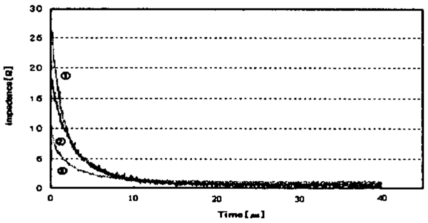
그림 3에서 20×20[m]와 52×37[m] 그리드 접지전극의 경우 빠른 상승시간에서 인하도선의 인덕턴스의 영향이 뚜렷하게 나타나며, 30[m]인 심매설 봉상 접지전극의 경우 주로 인덕턴스의 영향보다는 저항 성분의 영향이 지배적으로 나타났다. 또한 여러 가지 접지전극의 형상과 낮은 접지저항에도 불구하고 인하도선의 길이가 길어짐으로 인해 인하도선의 인덕턴스 영향으로 대부분의 시험용 접지전극은 빠른 상승시간에서 과도접지임피던스가 크게 나타났다. 따라서 낮은 접지저항값을 가지더라도 인하도선을 설치할 때 인하도선 자체의 인덕턴스 영향을 고려한 접지설계가 이루어져야 뇌임펄스전류와 같은 서지전류에 대한 낮은 과도접지임피던스 특성을 얻을 수 있을 것이다.

3.2 실효임펄스접지임피던스

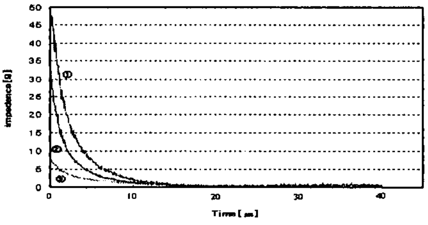
실효임펄스접지임피던스는 인가전류와 접지전극의 전위로부터 얻을 수 있으며, 임펄스전류의 인가에 대한 과도접지임피던스의 개략도를 그림 4에 나타내었다. 접지시스템의 근본 목적이 계통의 고장전류 및 뇌격전류에 의해 나타나는 전위의 크기를 제한하는 것이므로 접지전극의 전위가 최대값인 상태에서의 접지임피던스는 중요한 의미를 가진다. 그러



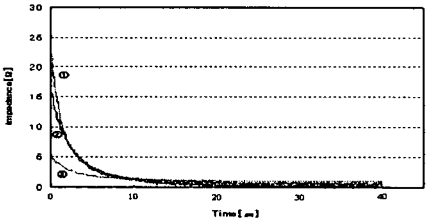
(a) 30[m] 봉상 접지전극



(b) 20×20[m] 그리드 접지전극



(c) 52×37[m] 그리드 접지전극



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

그림 3. 시험용 접지전극의 형상별 $Z-t$ 곡선(인하도선의 길이 : ① 50[m], ② 30[m], ③ 0[m])

Fig. 3. $Z-t$ curves according to shapes of grounding electrodes(length of down conductor : ① 50[m], ② 30[m], ③ 0[m])

므로 실효임펄스접지임피던스 Z_{eff}는 전위가 최대인 점에서의 임피던스로 정의하였으며, 다음의 수식으로 계산된다[7-9].

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

여기서 V_{max}는 접지전극의 전위 파형의 최대값이며, I는 전위가 최대인 순간의 전류이다.

심매설 봉상 접지전극의 경우 접지전극의 전위 파형에서 리액턴스성분이 지배적이며, 저항성분은 비교적 미소하다. 접지저항은 기본적으로 대지저항률과 접지전극의 치수에 의해 결정된다. 접지전극의 길이가 길어지면 접지저항은 감소하지만 과도접지임피던스는 접지전극의 인덕턴스의 영향으로 감소하는 것은 아니며 인가하는 임펄스전류의 파형에 의존하게 된다. 즉 임펄스전류의 변화율에 의한 전위강하 때문에 접지임피던스는 접지저항보다 크게 된다. 임펄스전류의 상승시간과 인하도선의 길이에 따른 접지전극의 실효임펄스접지임피던스를 측정하여 접지전극의 형상별로 도시한 결과를 그림 5에 나타내었다.

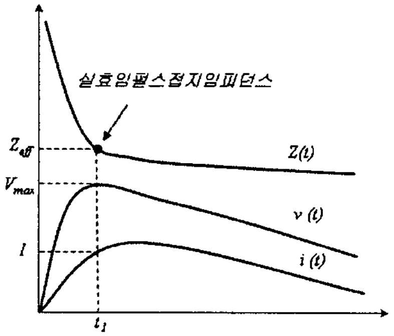
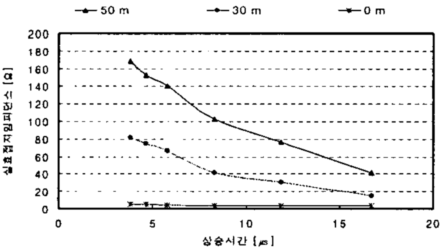
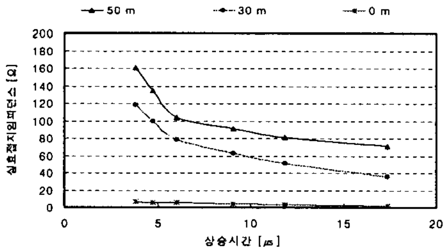


그림 4. 실효임펄스접지임피던스의 정의
Fig. 4. Definition of the effective impulse ground impedance

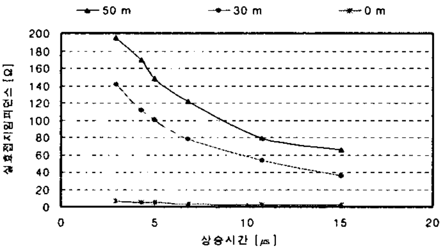
빠른 상승시간에서 실효임펄스접지임피던스는 주로 그리드 접지전극의 낮은 접지저항과 상대적으로 인덕턴스 성분의 영향이 지배적으로 작용한 결과이



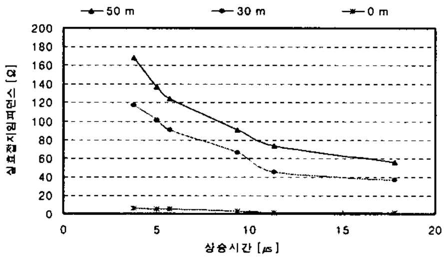
(a) 30(m) 봉상접지전극



(b) 20×20(m) 접지그리드



(c) 52×37(m) 접지그리드



(d) 30(m) 심매설 봉상 접지전극과 20×20(m) 접지그리드의 병렬접속

그림 5. 시험용 접지전극의 네 가지 형태에서 인가전류의 상승시간과 인하도선의 길이에 따른 실효임펄스접지임피던스
Fig. 5. Effective impulse ground impedance as functions of the rise time of the injected impulse current and the length of down conductor for four test grounding electrodes

며, 느린 상승시간에서는 심매설 봉상 접지전극의 높은 접지저항값의 영향이 지배적으로 나타났다. 실효임펄스접지임피던스는 인하도선의 길이가 길수록 큰 값으로 나타났고, 상승시간의 증가와 함께 감소하는 것으로 나타났다. 그림 5의 (a), (b), (c), (d)의 경우가 모두 비슷한 기울기의 값으로 수렴하는 것은 인하도선의 길이에 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

즉 접지의 형상에 관계없이 실효임펄스접지임피던스는 인덕턴스 성분에 크게 영향을 받고 있으며, 인하도선의 인덕턴스 성분의 저감이 접지시스템의 실효임펄스접지임피던스를 줄이는 핵심적 요소임을 알 수 있다. 따라서 뇌보호용 접지시스템에서는 인하도선의 수를 늘리거나 인덕턴스를 줄일 수 있는 배치 등의 시설방법이 중요하다.

4. 결　　론

봉상 접지전극과 그리드 접지전극 등 다양한 형태의 접지전극에서 임펄스 전류의 상승시간과 인하도선의 길이에 따라 나타나는 전위상승과 실효임펄스접지임피던스의 특성을 실험적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

과도접지임피던스는 인가전류의 상승시간과 접지전극의 크기 및 형태에 크게 의존하며, 실효임펄스접지임피던스는 접지전극과 인하도선의 인덕턴스에 크게 영향을 받는다. 특히 실효임펄스접지임피던스는 인하도선의 길이에 크게 의존한다. 따라서 건축물의 뇌보호용 접지시스템을 설계할 때 인하도선의 길이를 최소화하고 부득이 건축물의 높이가 높을 경우 인하도선의 인덕턴스를 줄이는 방법을 적용하는 설계기법을 심도있게 검토해야 할 것이다.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성 · 지원 사업에 의해 작성되었습니다.

References

[1] C. W. Barnett, B. L. Laird, J. L. Blackburn, W. C. Kotheimer, J. R. Linders, D. R. Volxka, J. A. Zulaski, and J. W. Walton, "Summery of the Gride for the Grounding of Instrument Transformer Secondary Circuits and Case", IEEE Trans. on PD, Vol.3, No. 4, pp.1459~1465, 1988.

[2] IEEE Std 1100-1999, IEEE Recimmended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment, IEEE Inc., pp.38~44, pp.128~129, 1999.

[3] T. Takahashi, "A Part of Grounding for Lightning Protection Technique", J. IEE of Japan, Vol.9, pp.671~676, 1989.

[4] 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. 207214, 2004.

[5] S. Karaki, et al, "Transient Impedance of GIS Grounding Grid", IEEE Trans., Vol.PD-10, No.2, pp.723~738, 1995.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] B. R. Gupta and B. Thapar, "Impulse Impedance of Grounding Grids", IEEE Trans. Vol.PAS-99, No.6, pp.214~218, 1980.

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

이수봉 (李守倖)
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

정동철 (鄭東喆)
1964년 9월 18일생. 1989년 2월 영남대 전기공학과 졸업. 2002년 2월 고려대학교 산업대학원 졸업(석사). 현재 (주)한진중공업 근무 및 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : (032)860-7398, Fax : (032)863-5822
E-mail : dcjeong2000@korea.com