

용량성 프로브와 광전송회로를 이용한 광대역 전압측정장치

길경석[†] · 송재용 · 박대원

A Study on the Development of a Lightning Warning System by the Measurement of Electric Field at the Ground

Gyung-Suk Kil[†], Jae-Yong Song, and Dae-Won Park

Abstract

A reliable voltage measurement system is necessary to monitor status of power facilities in substations, which is easy to set up and is not influenced by electromagnetic interference in and around substation. In this paper, we described a voltage measurement system (VMS) which is composed of a capacitive voltage probe, an impedance converter, and an optical linker. To get a wide-band characteristic of the VMS, a high speed impedance converter was used, and the output impedance of the VMS was set at 50 Ω to match any types of observing instruments. The frequency bandwidth of the VMS, which was estimated by a step pulse, was ranges from 11.42 Hz to 13.65 MHz, and the VMS showed a good response characteristic in a high frequency domain such as impulse voltages as well as a commercial frequency voltage.

Key Words : voltage measurement system (VMS), capacitive voltage probe, impedance converter, electromagnetic interference, optical linker, impulse voltages

1. 서 론

국내 전력 수요는 5000만 kW에 접근하고 있으며, 21세기 첨단 정보설비, 자동화 설비 등의 사회적 요구로 전력공급의 높은 안정성과 신뢰성이 요구되고 있다.

전력의 발생과 수송, 사용에는 현대 사회에 존재하는 대부분의 기술이 복합적으로 이루어지며, 세부적으로 전력설비의 운영과 감시에 전압, 전류와 같은 전기 정보의 계측기술은 특히 중요하다. 또한 전력 수요의 급증에 따라 송변전 전압이 격상되면서 전기적 절연에 문제가 없는 비접촉 방식의 소형, 고기능화된 전압측정 기술 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻³⁾.

현재 송변전 전력계통설비의 전압측정에는 대부분 계기용 변압기(Potential Transformer, PT)나 접촉식 용량성 분압기(Capacitive Potential Divider, CPD)가 대부분이며, 상용주파수 측정만을 목적으로 한다. 이들 계기용 변압기나 용량성 분압기는 고전압 도체에 직접

접속되는 것으로 피측정 대상의 전압레벨에 따라 절연이 확보되어야 하므로, 외형이 커지게 되고 장치의 특성상 과도전압이나 충격전압과 같은 고주파 전압의 측정이 불가능한 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 평판형 용량성 전압프로브와 광전송장치를 이용한 새로운 전압측정장치를 제안하였다. 본 전압측정장치는 소형이면서 광대역 특성을 가지므로 상용주파수 전압은 물론 동시에 충격전압과 같은 고주파 과도전압의 측정도 가능한 특징이 있다.

시제작된 전압측정장치는 직각파 입력에 대한 응답 특성 평가로부터 주파수 대역이 확인되었으며, 상용주파수 전압과 여러 가지의 충격전압을 인가하여 적용실험을 수행하였다.

2. 전압측정장치

2.1. 이론

그림 1에 본 연구에서 제안한 평판형 용량성 전압프로브를 이용한 전압측정의 원리를 나타내었다. 고전압 도체와 전압프로브 사이의 표류정전용량 C_b , 전압 검출전극과 접지전극사이의 정전용량 C_s 의 구성으로 분

한국해양대학교 전기전자공학부(Division of Electrical and Electronics Engineering Korea Maritime University)

[†]Corresponding author: kilgs@hhu.ac.kr

(Received : March 31, 2004, Accepted : June 29, 2004)

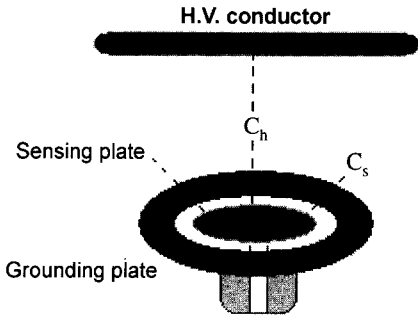


그림 1. 전압측정의 원리
Fig. 1. Principle of voltage measurement.

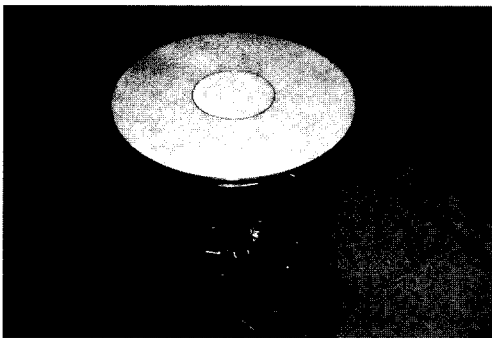


그림 2. 용량성 전압프로브의 사진
Fig. 2. Photograph of the capacitive voltage probe.

압된 전압이 검출된다^[4,5].

정전용량 C_s 는 수 [pF] 정도로 매우 작아 충분한 분압비를 얻을 수 없으므로 C_s 와 병렬로 수 [nF]의 콘덴서 C_p 를 연결하여 분압비에 대한 안정성과 큰 분압비를 얻을 수 있도록 하였다.

제작된 전압프로브는 그림 2와 같으며, 두께가 6 mm, 직경 100 mm의 검출전극과 직경 300 mm의 접지전극인 두 개의 알루미늄 판으로 구성되어 있다.

이와 같은 전압측정원리를 이용하여 고전압 도체의 전압을 측정하기 위한 기본회로를 그림 3에 나타내었다. 전압프로브에서 광전송장치까지의 신호전송에는 특성 임피던스 50 Ω의 동축케이블(RG58A/U)을 사용하였다. 동축케이블의 정전용량으로 인해 발생하는 신호왜곡을 제거하기 위하여 연결된 동축케이블의 특성 임피던스와 같은 정합저항 R_m 과 보상저항 R_t 를 연결하였다^[6,7].

또한 본 전압측정장치는 용량성 분압의 원리이며, 전압프로브를 포함한 신호전송회로에 용량성분이 존재하므로 전압측정장치의 분압비는 입력신호의 주파수에 따라 달라질 수 있다.

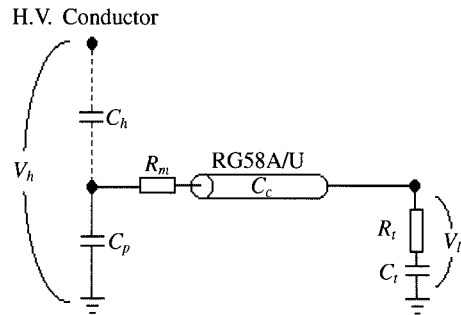


그림 3. 전압측정의 기본회로
Fig. 3. Basic circuit of voltage measurement.

그림 3에서 상용주파수 전압과 같은 저주파 영역에서의 분압비 U_L 은 다음 식 (1)과 같이 표현된다^[6].

$$U_L = \frac{(C_h + C_p + C_c + C_t)}{C_h} \quad (1)$$

또한, 고주파 영역에서의 분압비 U_h 는 식 (2)와 같다.

$$U_h = \frac{(C_h + C_p) \cdot (R_m + R_t)}{(C_h \times R_t)} \quad (2)$$

실제 사용에 있어서 C_p 는 5~10 nF로 $C_h \ll C_p$ 이며, 분압비는 입력신호의 주파수와 관계없이 $U_h = U_L$ 이 되어야 하므로 $C_p \cdot R_m = R_t \cdot (C_c + C_t)$ 의 관계가 성립한다.

또한 전압측정장치의 주파수 응답은 그림 3의 $R_t C_t$ 양단에 접속되는 관측계기의 입력 임피던스에 의해 변화하기 때문에 전압측정장치와 관측계기 사이에 적합한 신호전송방법 즉, 임피던스 변환회로가 삽입되어야 한다.

이러한 목적으로 제작된 전압검출회로와 임피던스 변환회로의 구성을 그림 4에 나타내었다.

평판형 용량성 전압프로브에서 전송된 신호는 입력 임피던스가 50 MΩ으로 일정하고, 출력 임피던스가 50 Ω인 전압버퍼(FBW : 100 MHz, $Z_i = 10 \text{ T}\Omega$, $Z_o = 7 \Omega$)을 통해 전송되므로 측정장치의 입력 임피던스에 관계없이 일정한 주파수 대역내에서 동일한 분압비로 전압

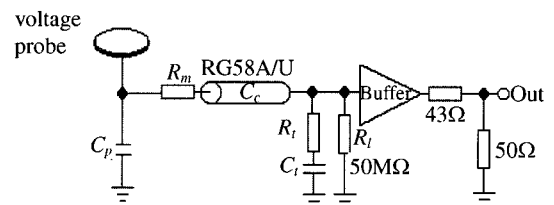


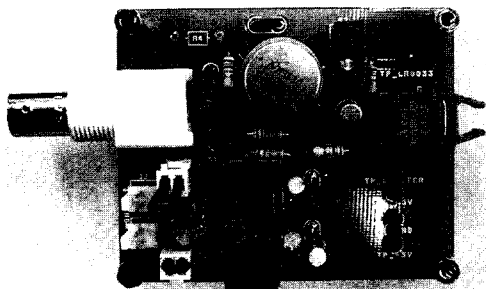
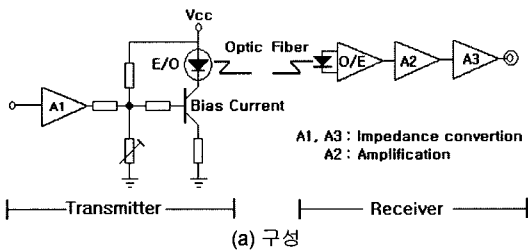
그림 4. 전압 측정회로의 구성
Fig. 4. Configuration of the voltage measurement circuit.

을 측정할 수 있다.

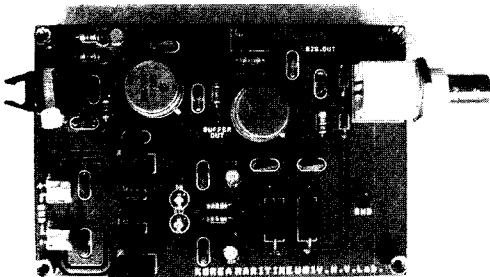
2.2. 광전송장치

측정된 전압신호의 원격지 신호전송에는 전압측정장치의 주파수 대역을 포함하여 저주파 대역의 상용주파수 전압에서 고주파 대역의 충격전압까지는 주위의 전자기 간섭에 의한 왜곡이 없이 관측계기로 전송되어야 한다.

그림 5에 본 논문에서 제작한 광전송장치의 구성과 사진을 나타내었다. 전기-광신호 변환장치(E/O)인 송신부는 응답특성이 빠르고 선형성이 우수한 GaAsP계의 발광다이오드(HFBR1527, t_r : 12 ns)를 사용하였으며, 광-전기신호 변환장치(O/E)인 수신부는 포토 다이오드(HFBR2526, t_r : 3.3 ns)를 내장하여 고속응답특성을 가



(b) 송신부



(c) 수신부

그림 5. 광전송장치의 구성과 사진
Fig. 5. Configuration of the optical linker and its photographs.

지며 아나로그 신호를 출력한다.

한편, 광송신회로의 발광다이오드는 pn 접합의 단방향 소자이므로 상용주파수 전압이나 정(+) 또는 부(-)극성의 충격전압 신호를 전송하기 위해서는 아나로그-디지털(A/D)변환이나 전압-주파수(V/F)변환, 또는 2개 이상의 광소자를 사용하여야 한다. 그러나 이와 같은 전압측정장치에 요구되는 A/D 변환회로는 수십 MS/s의 고속샘플링과 실시간 신호전송에 대한 문제로 회로가 복잡해지고 경제성이 없어 상용화되지 않고 있는 실정이다. V/F 변환의 경우에는 회로는 비교적 간단하지만 정·부극성의 변환점에서 고속으로 연속변환이 어렵기 때문에 고주파 영역에서는 큰 단점으로 남아있다.

본 연구에서는 검출된 전압신호를 A/D 또는 V/F 변환과정 없이 직접 아나로그 신호를 전송함으로써 샘플링과 실시간 전송에 문제가 없다.

또한 하나의 광소자로 양극성 전압신호를 전송할 수 있도록 하기 위하여 광소자에 바이어스 전류를 정격의 50%를 상시 인가하여 줌으로서 입력신호의 정(+)극성에서는 바이어스에 신호가 가산되어 광출력이 증가하고, 입력신호의 부(-)극성에서는 바이어스에 신호가 감산되어 광출력이 감소되는 방법을 적용하여 다른 방식의 신호전송회로에서 가지는 단점을 모두 해결하였다.

수신부에 사용된 핀 포토다이오드 내장형 증폭회로의 출력 임피던스가 수 백 [kΩ]으로 크므로 신호 출력부에 대역폭이 넓고, 관측계기에 관계없이 임피던스 정합이 될 수 있도록 하기 위하여 임피던스회로를 적용하였다.

3. 실험 및 검토

제작된 전압측정장치의 주파수 응답특성을 평가하기 위하여 그림 6과 같이 실험계를 구성하였다. 원형 평판 전극을 설치하고 함수발생기(TG501, $Z_o = 50 \Omega$, Thandar)로부터의 신호가 전극의 중앙으로 입력되도록 하였으며, 함수발생기의 출력 임피던스와 전송선로

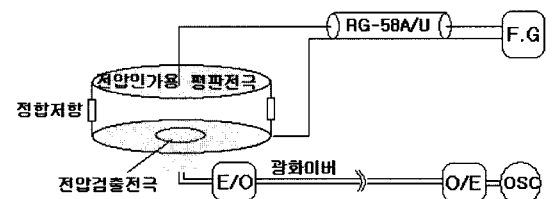
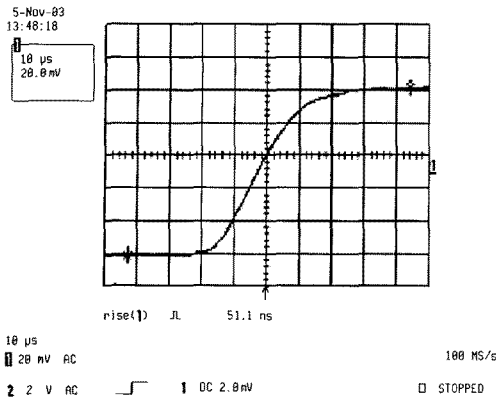
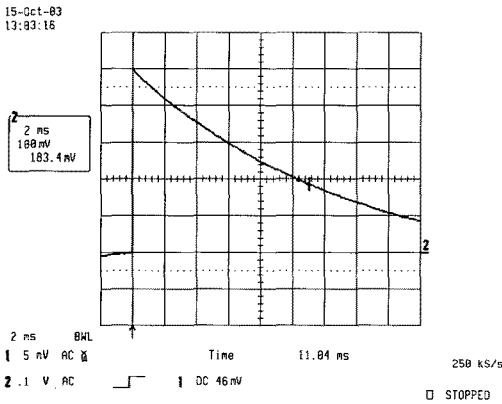


그림 6. 실험계의 구성
Fig. 6. Configuration of the test set-up.



(a) 상승시간



(b) 감쇠시간

그림 7. 직각파 응답파형

Fig. 7. Step response waveforms.

(RG-58AU, $Z_0 = 50 \Omega$), 전압프로브의 임피던스가 정합 되도록 전극 양단에 100Ω 저항 2개를 병렬로 접속하여 50Ω 이 되도록 하였다.

그림 7은 전압측정장치의 수신부 증폭기의 이득이 3 이고, 44.2 ns 의 상승시간을 가지는 함수발생기로 직각파 전압을 인가하였을 때, 광신호 전송장치를 포함한 전압측정장치의 응답파형을 나타낸 것이다. 이때 직각파 입력에 대한 전압측정장치의 순수 상승시간은 다음 식과 같이 계산할 수 있다¹⁸⁾.

$$t_r = \sqrt{t_{ro}^2 - t_n^2} = 25.64 \text{ ns} \quad (3)$$

여기서, t_n 은 입력파형의 상승시간, t_{ro} 는 출력파형의 상승시간이며 t_r 은 전압측정장치의 순수상승시간이다.

또한, 관측장치인 오실로스코프의 응답이 가우시안 분포를 갖는다면 상승시간과 주파수 대역의 관계는 식 (4)와 같이 표현된다¹⁹⁾.

$$B_w \cdot t_r = 350 \quad (4)$$

여기서 B_w 는 주파수 대역폭[MHz], t_r 은 상승시간[ns]으로 고역측 차단주파수 f_h 는 주파수 대역 B_w 와 같음을 알 수 있다.

고주파 대역과 비교하여 -3 dB 의 저역측 차단주파수 f_L 은 회로의 감쇠시간으로 결정되며, 저주파 대역에서 직각파에 대한 감쇠시간과 전압측정장치의 저역측 차단주파수는 식 (5)와 같이 계산된다¹⁰⁾.

$$f_L = \frac{1}{2\pi RC} [\text{Hz}] \quad (5)$$

실험에서 사용된 오실로스코프(Lecroy 9354C)는 고유의 상승시간이 1 ns 이하이고, 직각파 입력으로부터 측정된 상승시간은 그림 7(a)과 같이 약 51.1 ns 이므로 식 (3)으로 부터 계산되어진 전압측정장치의 실제 상승시간은 25.64 ns 이다.

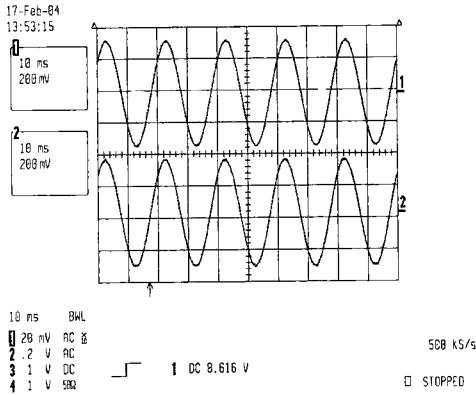
주파수 대역폭은 식 (4)에 의해 결정되며, 주파수 대역의 고역측 차단주파수는 13.65 MHz 가 됨을 알 수 있다. 직각파 입력에 대한 전압측정장치의 하강시간은 그림 7(b)에서와 같이 13.3 ms 이므로 식 (5)로 부터 저역측 차단주파수는 11.42 Hz 이다.

실험적 평가로부터 제작된 전압측정장치의 주파수 대역은 11.42 Hz 에서 13.65 MHz 이었으며, 상용주파수 전압은 물론 전력계통에서 발생하는 고주파 영역의 충격전압도 동일한 분압비로 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

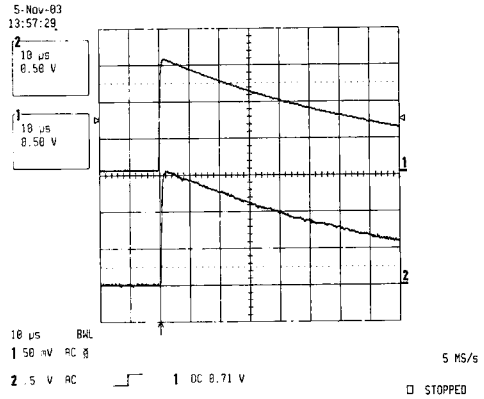
그림 8은 상용주파수 고전압 발생설비와 충격전압 발생장치(SG481, Haefely)를 이용하여 본 전압측정장치로 측정된 파형의 예를 나타낸 것이다. 인가전압에 대한 측정신호의 크기는 전압프로브의 설치조건, 광케이블의 길이에 따라 달라지므로, 본 연구에서는 실험실 내에서 동일한 설치조건과 50 m 의 광케이블 그리고 수신부에 내장된 증폭기의 이득을 3으로 하였을 때의 결과이다.

동일한 전압파형과 크기에 대해 전압측정장치의 분압비 오차는 상용주파수 전압에서 0.4% 이내, 충격전압에서는 1.7% 이내이었으며, 저주파 영역과 고주파 영역 즉, 상용주파수 전압과 충격전압 상호간의 평균 분압비 오차는 2.6% 로 평가되었다.

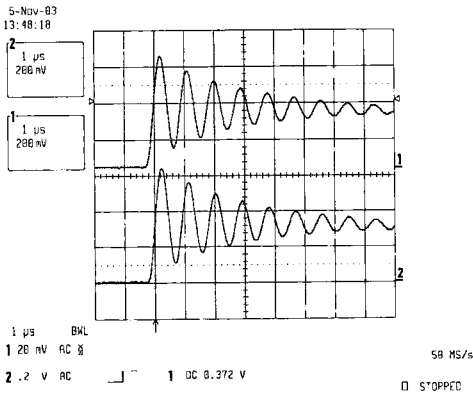
충격전압에서 상용주파수 전압에서 보다 더 큰 분압비 오차를 나타내는 것은 전압의 주파수 성분이 높고, 충격전압 발생장치에서 발생하는 파고값의 크기가 사양서 근거 0.5% 의 오차를 가지며, 또한 실험계 주변의 설치 환경에 따른 표류정전용량에 의한 오차가 복잡적



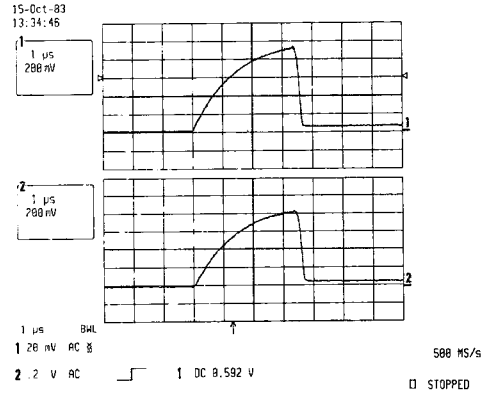
상 : 인가전압파형 하 : VMS 측정파형
(a) 상용주파수 전압



상 : 인가전압파형 하 : VMS 측정파형
(b) 비진동성 충격전압



상 : 인가전압파형 하 : 응답파형
(c) 진동성 충격전압



상 : 인가전압파형 하 : VMS 측정파형
(d) 차단파(chopped wave) 전압

그림 8. 전압측정장치에 의해 측정된 파형 예

Fig. 8. Typical response waveforms measured by the VMS.

으로 나타난 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 상용주파수 전압과 충격전압을 동일한 분압비로 측정이 가능하고, 신호전송에 주변 전자계의 영향을 받지 않는 광대역의 전압측정장치를 제안하였다. 본 전압측정장치는 변전소에서 고전압 도체와 비접촉방식으로 운전전압의 측정이 가능하므로 측정장치 자체의 절연 문제와 피측정 대상의 구조변경 등의 문제가 없어 소형화가 가능하다.

전압프로브에서 측정된 전압의 광신호 전송에 있어서는 전기-광신호 변환소자에 바이어스 전류를 상시 인가함으로써 단일의 광소자로 양극성 전압의 신호전

송이 가능한 특징을 가지고 있다.

실험결과로부터 광신호 전송회로를 포함한 본 전압 측정장치의 주파수 대역은 11.42 Hz에서 13.65 MHz로 상용주파수 전압은 물론 전력계통에 발생하는 각종의 과도전압을 동일한 분압비로 측정 가능함을 알 수 있다. 또한 본 전압측정장치의 출력 임피던스를 50 Ω로 설계함으로써 전압측정장치의 출력단에 연결되는 관측기기의 입력 임피던스에 영향을 받지 않고 전압의 측정이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 영국 카디프대학 방문중 수행한 연구결과에 일부임.

참고 문헌

- [1] Zhi Fang, Yuchang Qiu, and E. Kuffel, "Development of an opto-electrical system for application to high voltage measurement", *Proceedings of the 13th ISH*, Paper No. 527 2003.
- [2] E. Gockenbach, *et al.*, "Some applications on an electrical field sensor in the high voltage technique", *Proceedings of the 6th ISH*, Paper No. 40.06, 1989.
- [3] E-P Suomalainen, *et al.*, "Capacitive divider as a field sensor for voltage linearity measurement of AC dividers", *Proceedings of the 13th ISH*, Paper No. 544, 2003.
- [4] A. Schwab and J. Pagel, "Precision capacitive voltage divider for impulse voltage measurements", *IEEE Trans.*, PES vol. 91, pp. 2376-2382, 1972.
- [5] V. Fister and H. J. Koster, "Condenser bushings as capacitive high voltage divider for measuring of overvoltages in 420 kV substations", *Proceeding of the 4th ISH*, Paper No. 61.01, 1983.
- [6] R. Liao, *et al.*, "Development of a transient voltage measuring system", *Proceeding of the 8th ISH*, Paper No. 54.16, 1993.
- [7] J. Meppelink and P. Hoper, "Design and calibration of a high voltage divider for measurement of very fast transients in gas insulated switchgear", *Proceeding of the 5th ISH*, Paper No. 71.08, 1987.
- [8] J. Lalot, "Generation and measurement of fast transient overvoltages with special reference to disconnector operation in GIS", *Proceeding of CIGRE*, pp. 33-86, 1986.
- [9] Edmund K. Miller, "Time-domain measurements in electro-magnetics", Van Norstand, Reinhold Co., pp. 175-290, 1986.
- [10] S. A. Boggs and N. Fujimoto, "Techniques and instrumentation for measurement of transients in gas-insulated switchgear", *IEEE Trans.*, vol. EI-19, no. 2, pp. 87-92, 1984.



길 경 석

- 1984년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업 (공학사)
- 1987년 8월 인하대학교 전기공학과 졸업 (공학석사)
- 1996년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업 (공학박사)
- 2003년 3월 ~ 2004년 2월 영국 카디프대학 방문교수
- 1996년 4월 ~ 현재 한국해양대학교 전기전자공학부 부교수
- 주관심분야 : 고전압 발생 및 측정기술, 전력설비 진단기술, 센서시스템



송 재 용

- 1997년 2월 한국해양대학교 전기공학과 졸업(공학사)
- 1999년 2월 한국해양대학교 전기공학과 졸업(공학석사)
- 1999년 ~ 현재 한국해양대학교 전기공학과 박사과정
- 주관심분야 : 고전압 발생 및 측정기술, 전력설비 진단기술, 센서시스템



박 대 원

- 2003년 8월 한국해양대학교 전기공학과 졸업(공학사)
- 2003년 ~ 현재 한국해양대학교 전기공학과 석사과정
- 주관심분야 : 고전압 발생 및 측정기술, 전력선모뎀, 신호전송