



고전압 측정기술

김 경 석*, 이 복 희**, 하 성 철***

(*한국해양대 전기공학과 전임강사, **인하대 공대 전기공학과 부교수,

***동국대 공대 전기공학과 교수)

1. 서 론

21세기 정보화 구축에 따른 정보처리의 고속, 대용량화로 전력수요가 급증하면서 전력공급규모는 점차 고전압, 대용량화되고, 전력계통과 전력설비가 복잡해지고 있는 추세이다. 특히, 대도시에서의 전력사용의 집중으로 인한 부하의 고밀도, 수변전설비용 부지의 요구, 전력계통운용의 고신뢰성, 송전효율의 극대화를 위한 극초고압(Ultra-High Voltage) 송전에 대한 연구가 진행되고 있다.

이들 전력설비의 고신뢰성, 고안정성 확보를 위하여 전력기기에 대한 고전압·대전류시험의 중요성이 점차 부각되고 있으며, 표준충격과 전압시험 뿐만 아니라 급준성 과도전압시험, 재단파 전압시험에 있어서 시험전압 및 특성치의 고정도 측정이 요구되고 아울러 운전중 진류, 전압 등 각종 계측정보를 신속, 정확하게 전송할 필요가 있다. 고전압 계측기기는 반도체 기술의 진보와 전자회로의 콤팩트화로 진공관을 사용하던 오실로스코프에서 고성능 음극선 오실로스코프나 디지털 메모리장치 등 정밀전자기와 전자회로를 사용한 계측·제어장치에 이르기까지 첨단 계측기기가 출현되어 고전압·대전류의 측정에 이용되고 있다. 그러나 반도체소자와 고밀도 집적회로를 사용하는 계측장치는 진공관 방식에 비하여 감지 및 신호 처리전압이 낮으며, 전력계통의 고장이나 전력기기의 운전조작시 발생하는 개폐서지 또는 과도적 고전압·대전류에 의하여 발생하는 전자계의 영향을 받기 쉬워 측정오차가 발생할 수 있고, 제어장치나 측정기기에 오동작을 유발시키는 문제점이 있다.

고전압·대전류의 측정시 전자계 영향에 대한 잡음대책, 이른바 전자환경공학(Electromagnetic Compatibility)에 대한 연구도 최근 활발히 진행되고 있으며, 측정회로나 계측장치에 미치는 전자계 장애를 제거하여 측정의 정확도를 향상시키기 위해서는 계측설비 주변에 발생하는 전자계의 특성을 정확히 파악하고 최적의 방지대책을 강구하는 것이 대단히 중요하다.

이에 대한 대책으로 전기광학효과와 자기광학효과를 이용한 전압, 전류, 전계와 자계를 측정하는 광학기술도 병행

하여 발전되고 있다. 광센서의 경우 센서부에 전원이 필요하지 않으므로 급속재료를 사용하는 센서에 비하여 피측정 공간의 전계왜곡이 없으며, 소형화가 가능하고 전자유도작용에 의한 영향을 거의 받지 않는 등 여러 가지 장점을 가지고 있다.

최근 가스절연변전소와 같은 콤팩트화된 전력설비의 사용으로 과도전압 및 충격전류의 측정시 오차를 유발시키고 장애를 가져오는 요인 중에서 가장 현저한 것은 전자계 현상이며, 이에 대한 대책과 장애의 제거방법이 검토되어야만 한다. 또한 전력기기의 사용 중에 발생하는 과도전압과 충격전류는 진행과로서 작용하여 발생지점과 측정위치에 따라 달라지므로 종래의 저항분압기, 용량성분압기로는 정확한 측정이 불가능하기 때문에 전기적 신호의 과도적 현상을 직접 감지할 수 있는 측정장치가 필요하다. 다음의 3가지 고전압 측정기술은 피측정대상에 따라 가장 적합하게 제안된 것으로 측정응답을 개선하고 전자계의 영향을 최소화함으로써 정확한 측정이 가능하다.

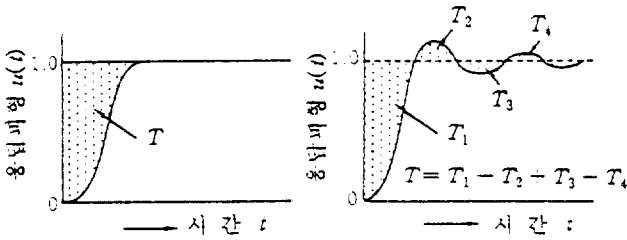
2. 광학식 저항분압기

고전압 측정방법에는 지금까지 여러가지 방법이 제안되어 있지만 가장 널리 이용되는 것은 분압기에 의한 것이다. 특히 급준성 과도과전압을 측정하기 위하여는 분압기를 포함한 측정회로에 충분한 주의를 기울여야 하며 측정의 정확도가 소정치 이내로 되는지 확인 할 필요가 있다.

분압기의 응답시간 T 는 그림 1에 나타낸 마와 같이 크기가 1인 직각파와의 사이에 있는 면적의 대수함으로 나타내며 응답파형을 $u(t)$ 라 하면 다음 식으로 표현된다.

$$T = \int_0^{\infty} \{1 - u(t)\} dt$$

분압기의 직각파 응답을 대별하면 그림 1과 같이 비진동성과 진동성 과도전압으로 되고, 비진동성의 경우 응답시간은(T)이지만, 진동성의 경우 응답시간은 다소 빨라질 수도 있다.



(a) 비진동성 (b) 진동성
그림 1 분압기의 직각과 응답

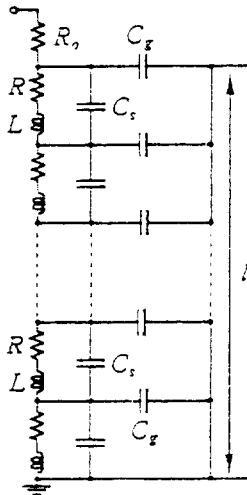


그림 2 저항분압기의 등가회로

또한 저항분압기의 등가회로는 그림 2와 같으며, 응답특성은 기하학적 치수에 크게 의존하므로 측정전압이 높게 되면 일반적으로 분압기의 응답시간이 길어진다. 초고압 또는 그 이상의 중전기기 시험에 있어 1 [μs]이하의 시간영역에서 V-t특성 등을 명확하게 할 필요가 있다. 이러한 관점에서 광학식 저항분압기는 최신 광학기술을 응용한 새로운 원리를 근거한 것으로 계측장치와의 임피던스정합에 문제가 없으며 고압부와 완전한 분리가 가능하여 전문적 요구에의 부합이 가능하다. 광학식 저항분압기의 원리는 고전압측에 보상회로와 발광다이오드를 설치하여 저항분압기를 흐르는 전류에 비례한 광을 절연성 광과이버를 통해 대지측에 전달하고 광전자증배관 또는 핀포토 다이오드를 이용하여 광을 전기신호로 변화시켜 오실로스코프로 관찰한다.

저항분압기의 길이를 1로 하고, 접지전위로부터 정규화된 거리 x에서의 전류로 나타내면,

$$i(x, t) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(n\pi)^2 t} \cos n\pi(1-x)$$

이 된다. 위식에 대한 전류파형 $i(x, t)$ 를 그림 3에 나타내었는데, 저항분압기의 고압부 즉, $x = 1$ 에서 가장 빠른 응답이 나타나며 접지면($x = 0$)에 가까워질수록 오우버 슈트의 감소와 함께 응답시간이 늦어짐을 알 수 있다. 저항

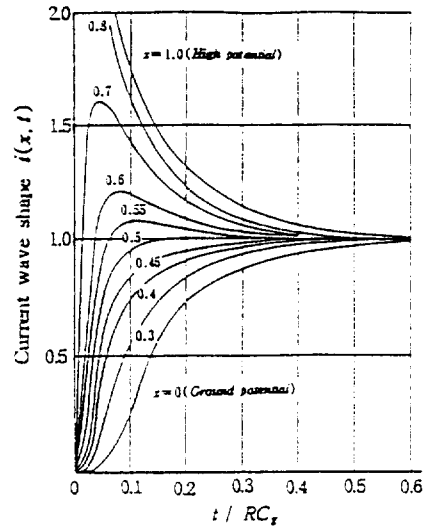


그림 3 저항분압기의 직각과 응답파형

분압기로 충격전압을 측정할 경우, 측정의 가장 좋은 위치는 그림에서 알 수 있는 바와 같이 $x = 0.5$ 이다.

저항분압기의 등가회로에서 저항을 무유도권으로 하면 인덕턴스 L과 표류정전용량 C_g 는 극히 적은 값으로 줄일 수 있으며 실제적으로 $C_s \ll C_g$ ($C_s/C_g < 0.01$ 이하)이다. 그러나 직접 시간함수의 해석적 해를 구하기는 어려우므로 L과 C_s 를 무시한 경우 다음 식으로 표현되는 보상회로가 필요하다.

$$T = \int_0^{\infty} \{1 - v_0(t)\} dt = -2 \int_0^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{(n\pi)^2}{C_g R} t} dt$$

$$= -\frac{2C_g R}{\pi^2} \left(1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{9} + \frac{1}{16} + \dots\right) \approx -\frac{C_g R}{4}$$

위식에서 응답시간이 부(-)의 값은 오우버 슈트를 의미하며, 이것을 보상하여야만 정확한 측정계가 구성된다. 따라서 분압기의 최상단부 검출저항에 적당한 보상회로의 적용이 필요하다.

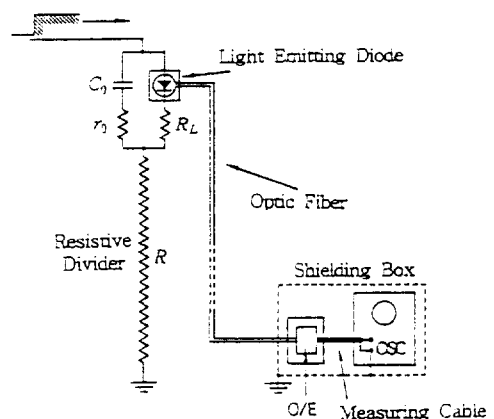


그림 4 광학식 저항분압기의 구성

그림 4에 보상회로를 가진 광학식 저항분압기의 구성을 나타내었다. 측정범위의 확대는 분압기를 흐르는 전류가 전기-광신호 변환기의 발광다이오드의 최대정격전류이하가 되도록 필요한 분류회로를 보상회로와 광검출회로에 삽입하여야 한다. 분류회로는 무유도성의 저저항에 의하여 구성되어 보상회로와 광검출회로에는 영향을 주지 않으므로 분압기 전체의 특성을 변화시키지 않고 측정범위를 확대할 수 있다.

3. 전계센서를 이용한 고전압 측정

3.1 전계센서의 동작원리

용량성 전계센서의 동작원리는 감지전극과 피측정대상인 고전압 도체사이의 표류전용량과 접지전극사이의 정전용량에 의한 분압으로 고전압을 측정하는 것이다. 이는 일종의 광대역 필터에 해당하며, 주파수응답은 판측용 계기의 입력임피던스와 센서의 정전용량에 의하여 결정된다. 용량성 전계센서를 이용한 고전압측정의 개략도를 그림 5에 나타내었다.

용량성 전계센서의 동작원리는 전자계에 대한 맥스웰의 전자방정식을 기초로 하며, 감지면이 대지면에 대하여 평행으로 놓일 수 있는 평판형 전계센서의 개략도와 등가회로를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(b)의 등가회로에서 전계센서의 출력전압 V [V]와 인가전계의 세기 E [V/m]사이의 관계는 센서의 감지전극과 대지사이의 정전용량을 C [F], 센서의 유효 감지면적을 A [m²], 증폭기의 입력임피던스를 R_i [Ω]이라고 하면

$$V = \epsilon A \frac{j\omega R_i}{1 + j\omega CR_i} E$$

로 되며, $f \gg 1/2\pi CR_i$ 인 주파수에 대하여 출력전압은

$$V = \frac{\epsilon A}{C} E \quad [V]$$

로 표현되므로 비접촉에 의해서도 고전압을 측정할 수 있다.

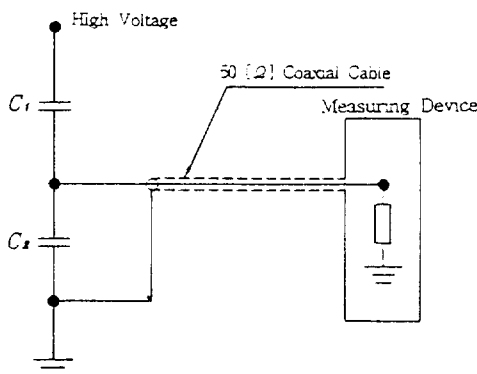
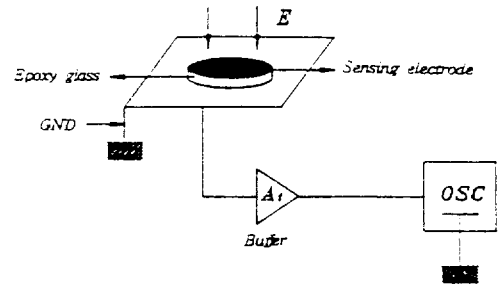
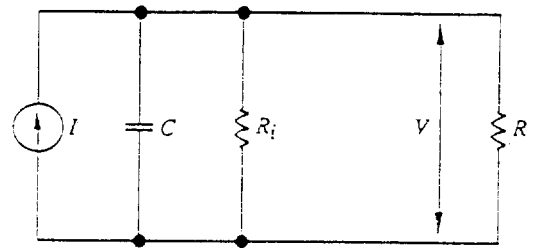


그림 5 용량성 분압기의 측정계



(a) 개략도



(b) 등가회로

그림 6 평판형 전계센서의 개략도와 등가회로

3.2 고전압 측정계

평판형 전계센서를 이용한 고전압 측정계의 예를 그림 7에 나타내었다. 피측정 고전압에 대하여 전계를 형성하는 원형의 평판전극계와 평판형 전계센서를 포함한 측정계 및 기록장치로 되어 있다. 전계센서는 하부평판전극의 중앙에 설치하며, 센서의 검출부 이외의 모든 신호처리회로는 차폐함내에 넣어 주변의 전자계로부터 영향을 받지 않도록 한다. 최종적으로 미지전압신호의 관측은 오실로스코프로 측정되어 개인용 컴퓨터에 저장되는 구조이다.

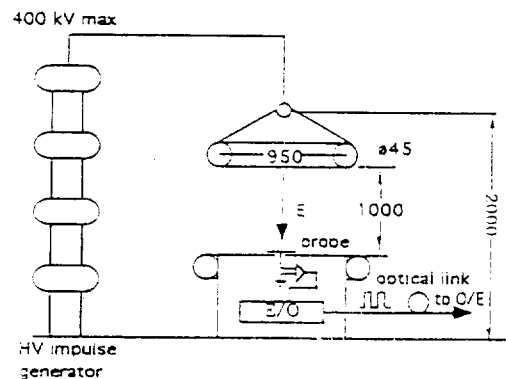


그림 7 고전압 측정계의 개략도

4. 스페이스 분압기

4.1 동작원리

가스절연개폐장치(Gas Insulated Switchgear : GIS)에 내

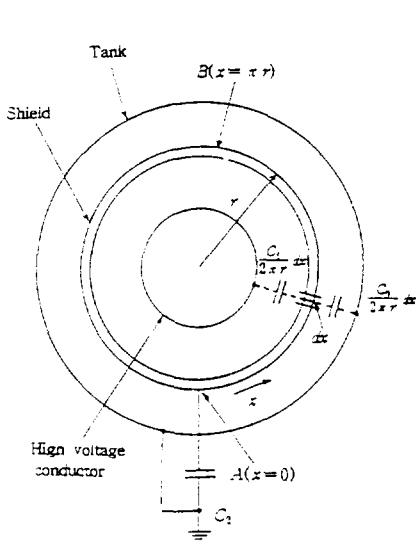


그림 8 스페이서 분압기의 원리

장된 단로기의 개폐조작이나 지락고장시에 발생하는 급준성 과도과전압을 GIS용 스페이서를 이용하여 계측하는 측정계의 개략도를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 C_2 의 접속점을 원점으로 하여 검출전극으로부터의 거리를 x 라고 하자. 만약 주파수 f 인 전압 V 를 고전압도체에 인가하였다고 하면 검출전극상에서의 전압분포 v_x 와 전류분포 i_x 는 다음의 방정식을 만족시켜야 한다.

$$dv_x + j\omega \frac{L_0}{2\pi r} dx i_x = 0$$

$$j\omega \frac{C_1}{2\pi r} dx (V - v_x) - j\omega \frac{C_0}{2\pi r} dx v_x + di_x = 0$$

여기서 $\omega = 2\pi f$

j = 복소수의 허수단위

L_0 = 검출전극의 주변방향의 자체인덕턴스이다.

경계조건으로

$$x = 0 \text{ 에서 } v_x = -\frac{1}{j\omega C_2} i_x$$

$$x = \pi r \text{ 에서 } i_x = 0$$

이라고 가정하고, 이들 경계조건을 적용하면, $x=0$ 에서 v_x 의 값 즉, C_2 의 단자전압 V_0 는 다음과 같이 된다.

$$V_0 = \frac{C_1}{C_0 + C_1} \frac{1}{\frac{C_2}{C_0 + C_1} \frac{g}{2} \frac{e^g + 1}{e^g - 1} + 1} V$$

여기서 $g = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0}$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0(C_0 + C_1)}}$$

이다.

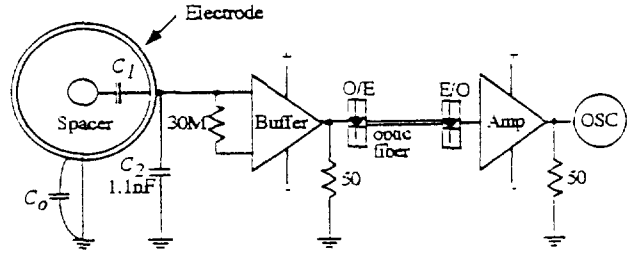


그림 9 고전압 측정계의 구성

이와 같이 측정계의 응답전압이 인가전압의 주파수에 따라 변화하므로 주파수에 따른 응답특성의 변화가 없는 주파수대역의 결정이 필요하게 된다.

4.2 스페이서를 이용한 고전압 측정

GIS설비의 운전조작중에 발생하는 과도과전압은 고전압도체와 스페이서의 외부에 부착된 검출전극사이의 정전용량 및 검출전극과 GIS외함 사이의 표류정전용량이 존재하게 되어 분압이 이루어진다. 그러나 표류정전용량은 분포정수로 검출부의 형상에 따라 다르며 용량이 대단히 작고 불안정하다. 또한 측정대상회로가 초고압이므로 외부에 병렬로 캐패시터를 연결하여 회로특성의 안정과 송변전설비의 전압에 따라 분압이 이루어질 수 있도록 한다. 그림 9에 스페이서에 부착된 전극에 의해 검출된 신호를 이용하여 고전압을 측정하는 회로의 예를 나타내었다. 또한 GIS의 설치장소가 고전자계 환경임을 고려하여 신호전송시 주변의 고전자계에 의한 왜곡을 줄일 수 있도록 광신호전송용 E/O, O/E변환기를 사용하고, 다중모드 광화이버를 통하여 감지신호를 전송시킨 후 오실로스코프로 관측하는 구조이다.

측정계의 교정에 있어서는 현장에 설치되어 운전되고 있는 기설의 GIS에 교정용 전원을 인가하여 분압비를 결정하는 것이 현실적으로 불가능하므로 60 [Hz] 상용주파수전압을 이용하여 분압비를 결정하는 방법이 이용된다. 그러나 주파수가 낮은 전압을 이용하여 분압비를 결정하게 되면 측정계의 감쇠시정수에 의하여 오차를 가져오므로 보정이 필요하다.

본 측정계에 대한 등가회로는 그림 10과 같으며, 정현파 인가전압의 주파수 (f), 측정계의 저역측 차단주파수 (f_c)와 분압비 사이에는 다음의 관계가 성립된다.

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{1 + \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \frac{C_1 + C_0}{C_1}$$

그림 10과 같이 분압비(v_1/v_2)를 C_1 , $(C_1 + C_0)$ 만으로 결정하게 되면 교정용 전원주파수와 측정계의 저역측 차단주파수에 의하여 상당한 오차가 포함될 수 있다. 60 [Hz]의 상용주파수전압을 교정용전원으로 사용하는 경우, 분압

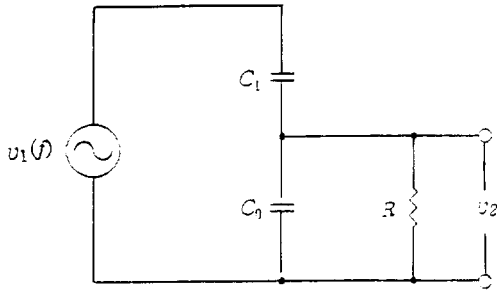


그림 10 고전압 측정계의 등가회로

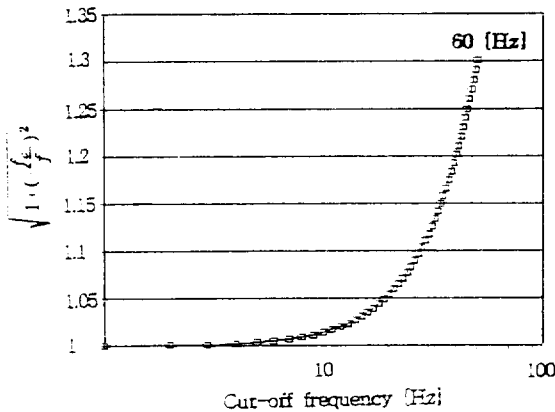


그림 11 저역측 차단주파수 (f_c)와 분압비 오차의 관계

비 오차를 2 [%]이내로 유지하기 위해서는 그림 11에서 보는 바와 같이 고전압 측정계의 저역측 차단주파수가 12 [Hz]이하이어야 한다.

결과적으로 현장에 설치되어 있는 기존의 GIS에서 발생하는 급준성 과도과전압의 정확한 관측을 위해서는 고전압 측정계를 구성하고, 측정계의 기본특성과악에 대한 기법과 분압비의 결정시 고려하여야 될 요소에 대하여 검토하여야 한다.

5. 결론

전력용 변압기, 가스절연개폐장치 등 전력설비의 시험과 운용에 필요한 고전압 측정장치로 전력설비의 특성에 부합하는 광학식 저항분압기, 평판형 전계센서를 이용한 고전압 측정계, 스페이스 분압기에 관하여 살펴 보았다.

광학식 저항분압기는 저항분압기에 시일드전극을 설치하여 분압기의 특성이 안정하며, 시험전압의 입사점 가장 가까운 곳에서 전기-광신호 변환기에 의하여 신호를 검출함으로써 종래의 저항분압기 또는 시일드 저항분압기보다 고 응답의 고전압 측정계이다.

평판형 전계센서를 이용한 고전압 측정계는 광학식 저항분압기와는 달리 피측정전압에 의한 전계를 직접 감지할 수 있는 평판형 전계센서와 고입력임피던스의 전압버퍼를

적용하여, 측정계의 입력임피던스가 대단히 높기 때문에 피 측정계에 영향을 주지 않고, 상용주파수전압에서 급준성 과도과전압에 이르기까지 측정이 가능하다. 비접촉방식에 의한 고전압 계측장치이므로 위험성이 없고, 피측정회로의 부하효과를 가지지 않기 때문에 고전도 계측은 물론이고 실용기에 직접 적용이 가능하다.

마지막 스페이스를 이용한 고전압 측정계는 GIS내에 설치된 단로기의 조작시에 발생하는 급준성 과도과전압의 측정이 가능하며, 스페이스 전극과 신호전송계의 접속에 고입력임피던스의 전압버퍼를 사용하여 저역측 차단주파수를 낮게 할 수 있다. 스페이스 분압기는 실제의 송변전설비에 구조의 변경없이 직접 적용이 가능하고 상용주파수전압을 이용한 분압비 결정이 가능하다.

참고 문헌

- [1] Bok-Hee Lee and Gyung-Suk Kil, "Measurements and Characterization of the Time Varying Electric and Magnetic Fields at the High Voltage Laboratory", Proceedings of the 5th IEE of Japan, pp.191-196, July 27-29, 1994.
- [2] 李福熙, "高電壓大電流工学", 清文閣, 1993, pp. 1~3.
- [3] L. Thione and G. Villa, "Application of fiber optics to impulse voltage measurements", Proc. of the 3rd ISH, No. 4221, Aug. 1979.
- [4] 이복희, "방전고전압현상의 연구에서 광기술의 응용", 대한전기학회지, Vol. 40, No. 6, pp. 19~29, 1991.
- [5] R. H. Mcknigt and H. K. Schoenwetter, "Evaluation of Transient Measurement methods in Gas-Insulated Transmission Lines", CIGRE WG-33 03, 1983.
- [6] K. Feser and E. Gockenbach, "Distortion Free Measurement of High Impulse Voltages", CIGRE 33-86, WG-03, 1986.
- [7] B. H. Lee, T. Kawamura, T. Nishimura and M. Ishii, "Breakdown Characteristics of SF₆ Gap Disturbed by a Metallic Protrusion under Oscillating Transient Overvoltages", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.33 pp. 2043~2049, 1994.
- [8] B. H. Lee, T. Kawamura, M. Ishii, "V-t Characteristics of SF₆ Gap Disturbed Protrusion under Oscillating Transient Overvoltages", T. IEE Japan, Vol. 114 B, No. 6, pp.664-669, 1994.
- [9] 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.
- [10] H. Murase, I. Ohshima, H. Aoyagi, I. Miwa, "Measurement of Transient Voltages Induced by Disconnect Switch Operation", IEEE Trans., Vol. PAS 104, No. 1, pp. 157~165, Jan. 1985.
- [11] R. Liao, et al., "Development of a Transient Voltage Measuring System", Proc. of the 8th ISH, No. 54.16, pp. 141~144, Aug. 1993.
- [12] 이복희, 김경석, "시변전장 측정용 평판형센서", 센서학회지, Vol.4, No.1, pp.15-20, 1995, 2.
- [13] T. Harada, et al., "A high quality voltage divider using optoelectronics for Impulse voltage measurements", IEEE Trans., Vol. PAS 91, No.2, pp. 494~500, 1972.
- [14] T. Harada, T. Itami and Y.Aoshima, "Resister divider with

dividing element on high voltage side for impulse voltage measurement", IEEE 70 Trans. 576-PWR, 1970.

[15] J. Lalot, "Generation and Measurement of Fast Transient Overvoltages with Special Reference to Disconnecter Operation in GIS", GIGRE, No. 33-86, 1986.

[16] 이복희, 백용현, 안창환, "전계 측정용 센서의 개발", 전기학회 논문지 Vol. 40, No. 6, pp. 630-637, 1991. 6.

[17] A. Schwab, and J. Pagel, "Precision Capacitive Voltage Divider for Impulse Voltage Measurements", IEEE Trans., PES Vol. 91, pp. 2376~2382, 1972

[18] 이복희, 김경석 외, "가스절연개폐설비에서 급증성과도과전압의 측정장치", 전기학회 논문지 Vol. 43, No. 10, pp. 1721~1728, Oct. 1994.

[19] J. Meppelink, P. Hoffer, "Design and Calibration of High Voltage Divider for Measurement of Very Fast Transients in Gas Insulated Switchgear", Proc. of the 5th ISH, No. 71.08, 1987.

[20] 이복희, 백용현, 전덕규, "광대역 고전압 및 전계측정용 센서", 전기전자재료학회지, Vol.5, No.1, pp.89-98, 1992.3.

[21] 이복희, 김경석, 주문노, 이성현, "용량성 전장센서를 이용한 과도전압측정계", 센서학회지, Vol.5, No.3, pp.9~16, 1996.5.

[22] 전덕규, 김경석, 이복희, "광기법을 이용한 고정도 과도전압측정장치", 전기학회 논문지, Vol.45, No.8, pp.1192~1198, 1996.8.

[23] 이복희, 안창환, 이경옥, 김경석, 주문노, 박봉화, 광희로, "새로운 측정시스템을 이용한 고전압 설비 주변에서의 과도전계 해석", 전기학회 논문지, Vol.46, No.1, pp.133~141, 1997.1.

[24] 이복희, 이경옥, 안창환, "고전압 실험실에서 시변성 전자계의 특성", 한국전자과학회논문지, Vol.8, No.1, pp.83~93, 1997.2.

[25] Bok-Hee Lee, Chang-Hwan Ahn and Mun-No Ju, "Transient Electric Field Analysis with a New Measuring System around High Voltage Apparatus", '96 K-J Symp, on ED & HVE, No.3-6, pp.71~76, 1996.5.

[26] Bok-Hee Lee, Sug-Hun Chang, Gyung-Suk Kil, Duk-Kyu Jeon, "Precise Impulse Transient Voltage Measuring Device Using Optical Technique", Proc. of the 8th ACED, pp.713-1~4, October 15-17, 1996.

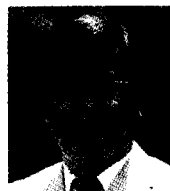
[27] Bok-Hee Lee, Kyoung-Ok Lee, Chang-Hwan Ahn, Sung-Chul Ha and Seung-Kwon Paek, "Analysis of Transient Electric Fields Caused by the Operation of Impulse Voltage Generator", Proc. of the 5th ICPADM, Vol.1, pp.511~514, 1997.5.

저 자 소 개



김경석(吉暉碩)

1962년 6월 30일생. 1984년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 인하대 공대 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국해양대 이공대 전기공학과 전임강사.



이복희(李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1988년~89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전기공학과 부교수.



하성철(河聖哲)

1940년 12월 15일생. 1966년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년~95년 일본 Keio대학교 방문교수. 현재 동국대 공대 전기공학과 교수.