

廣帶域 高電壓 및 電界 測定用 센서

A Wide Bandwidth Sensor for Measurement of High-voltage and Electric Field

백 용 현* · 이 복 희* · 전 덕 규**

(Yong-Hyun Paek · Bok-Hee Lee · Duk-Kyou Jeon)

요 약

가스절연개폐장치에서 단로기의 조작시에 발생하는 過渡過電壓의 측정은 最適絶緣設計, 신뢰성 향상, 故障探知 등에 있어 대단히 중요하다. 본 논문은 過渡過電壓과 時變電界의 정확한 측정이 가능한 容量性 電界센서에 관한 것으로 측정이론, 설계, 교정기술과 실규모 GIS실험 장치에서의 과도과전압의 측정에 관한 모의실험에 대하여 기술하였다. 시제작된 센서의 變換特性은 應答媒介變數에 의하여 지배되어지며, 센서와 측정계의 周波數帶域幅은 수 Hz~약 200MHz 정도이었다. 실규모 GIS실험장치에 적용하여 과도과전압을 측정한 결과 센서의 우수한 응답특성이 확인되었다.

ABSTRACT

The measurement of very fast transients generated by disconnecting switches in Gas-Insulated Switchgear(GIS) have to deal with the problems such as reliability, interference pick-up, and optimal insulation design of high-voltage equipments. This paper presents a new capacitive electric field sensor to perform the accurate and practical measurements of very fast transients and temporal electric fields, the basic theory and design of the sensor, the calibration technique and the modeling tests are described. The transfer characteristics of the sensor are governed by the intrinsic response parameters, a total bandwidth of the measuring system is the range from several Hz to 200 MHz. a check performed in an actual size arrangement for measurements in GIS components, has confirmed the excellent measuring properties of the sensor.

* 인하대 공대 전기공학과 교수 · 공학박사

** 인하대 공대 전기공학과 대학원 · 박사과정

1. 서 론

전력수요의 급증과 양질의 전력에 대한 요구에 따라 전력설비는 고전압·대용량화 되어 졌으며, 계통운용의 신뢰성과 안전성의 확보 및 기기의 소형 경량화가 가능한 개폐장치로서 SF₆가스를 사용하는 가스絶緣開閉裝置(Gas Insulated Switchgear:GIS)가 많이 보급되고 있다. 그러나 GIS에 설치되어 있는 단로기의 조작에 의한 충전전류의 차단이나 지락사고 발생시에는 急峻性的의 過渡過電壓(Very Fast Transient Overvoltages:VFTO)이 유기된다. VFTO는 전력설비의 규모에 따라 다르나 상승시간이 수 ns~수백 ns, 사용전압의 0.9~3.2[p.u] 정도의 크기를 가지며, GIS 뿐만 아니라 변압기, 부싱 등 주변기기의 절연에도 영향을 미치게 된다. 金屬性 異物에 의한 불평등전계중에서 급준성 과도전압에 대한 SF₆가스 絶緣耐力의 저하가 현저하며, 최근 세계적으로 이에 대한 연구가 관심대상으로 대두되었다.^{1~4)}

VFTO에 의하여 발생하는 電磁界 環境도 매우 가혹한 상태이며, 이 때 발생하는 시변성 전계가 보호 및 제어장치의 전자회로에 電磁誘導障害를 일으켜 오동작을 유발시키는 등 운용의 신뢰성을 저하시키고 있다. 따라서 VFTO에 의한 SF₆가스의 절연특성과악이나 전자계 장애에 대한 연구에 있어 時變性 電界와 VFTO의 정확한 측정은 필수적이다.

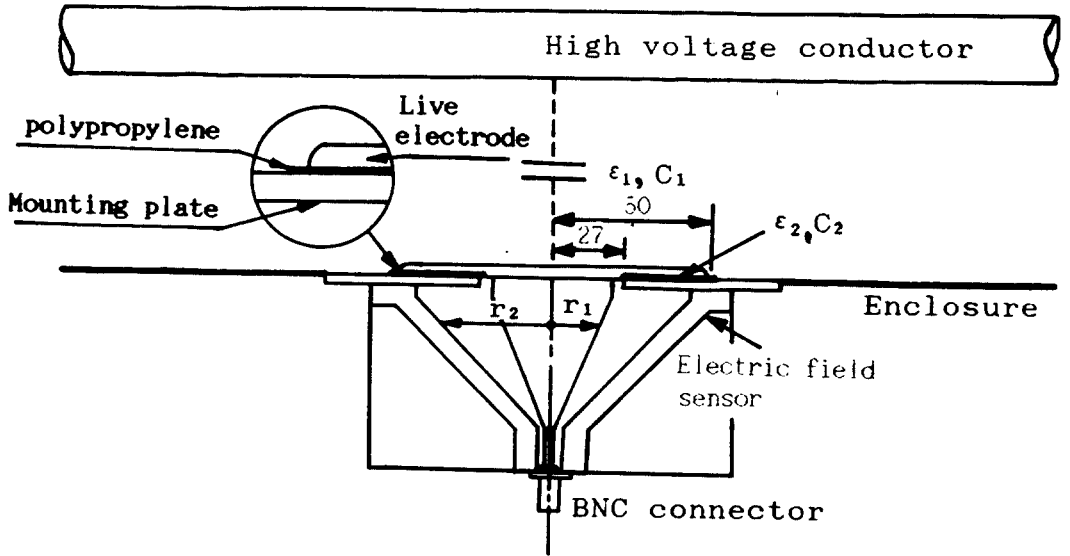
GIS내부에서 발생한 VFTO는 종래의 저항 또는 용량분압기의 高精度 측정이 불가능하므로 수백 MHz의 周波數帶域을 가지는 측정장치가 필요하다.⁵⁾ 최근 광기술의 발달로 電氣光學效果를 이용하는 전압, 전

계의 계측장치가 개발되었으나 機械的 共振 때문에 주파수대역의 上限이 수 MHz 정도에 지나지 않으므로 GIS내부에서 발생하는 VFTO의 측정장치로는 적합하지 않다.

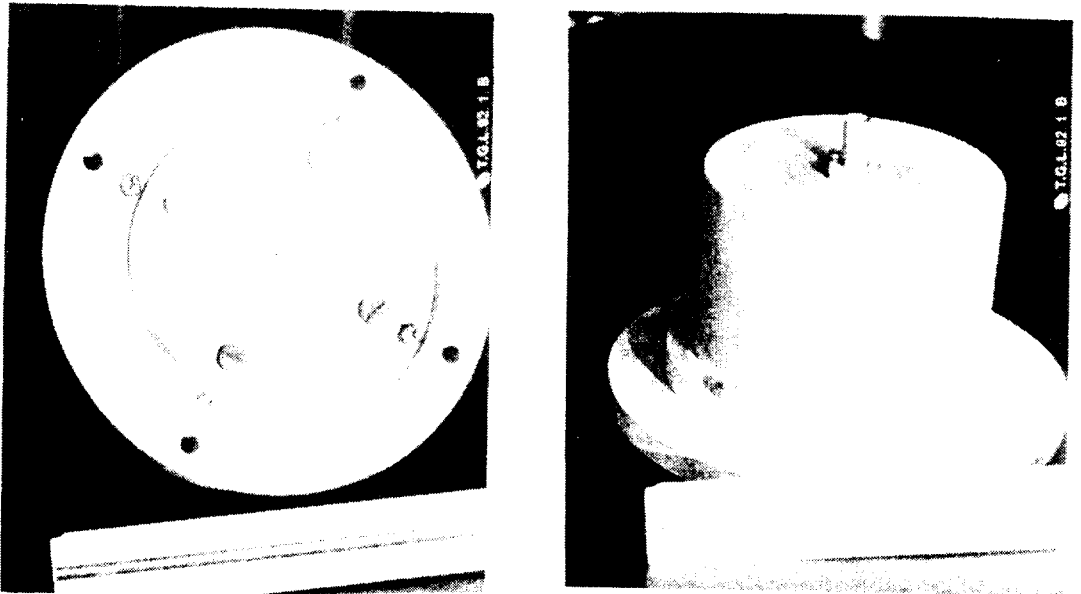
따라서 본 연구에서는 電磁界 現象을 이용하여 수백 MHz의 고주파 성분을 포함하는 급준성 과도과전압 및 시변성 전계 측정이 가능한 용량성 전압·전계센서와 계측기술의 실현을 목적으로 센서의 시제작, 교정실험, 적용실험에 대한 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 容量性 電壓 및 電界 센서의 동작원리에 대한 이론, 설계, 교정 실험계인 傳送線路의 구성에 대하여 기술하였으며, 시제작된 센서의 단위계단응답 특성을 측정하여 주파수대역과 분압비 등 센서의 기본성능과 특성을 조사하였다. 아울러 실규모 GIS실험장치에 적용하여 절연 파괴시 발생하는 과도과전압을 측정하고 이의 특성을 검토하였다.

2. 측정이론 및 설계

과도과전압의 정확한 측정은 전계센서에 의하여 가능하며, 용량성 전계센서의 동작원리는 電磁界 法則을 기초로 한다. 본 연구에서 과전압 및 전계측정에 사용한 용량성 전계센서의 구조에 대한 개략도와 센서의 사진을 그림 1에 나타내었다. 이 센서는 감지전극과 고전압도체사이의 漂遊靜電容量(C₁), 감지전극과 접지전극사이의 정전용량(C₂)에 의한 분압으로 과도고전압 및 전계를 측정하는 것으로 일종의 광대역 필터에 상당한다.



(a) 전계센서의 개략도



(b) 사진

그림.1. 전계센서의 개략도와 사진

Fig.1. Schematic diagram and the photo. of the electric field sensor

이 센서의 동작원리는 맥스웰의 第 1 電
磁方程式의 적분형⁶⁾

$$\int_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \int_A \mathbf{g} \cdot d\mathbf{A} + \int_A \frac{d\mathbf{E}}{dt} \cdot d\mathbf{A} \quad (1)$$

으로부터 설명된다.

본 연구에서는 식(1)에서 傳導電流 $\int_A g \cdot dA = 0$ 즉, 센서의 감지전극과 고전압도체 사이에 공간전하가 존재하지 않는 경우의 전계 측정을 대상으로 한다. $\int_L H \cdot dL = i_0(t)$ 인 電流源으로 나타내고, 센서와 오실로스코프의 입력임피던스(R)로 이루어지는 측정계의 전기적 등가회로를 그림 2에 나타내었다. 이 등가회로에 대한 전류방정식은

$$\epsilon \int_A \frac{dE}{dt} \cdot dA = i_0(t) = C_2 \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R} = i_c + i_r \dots \dots \dots (2)$$

로 되며, 주어진 전계(E)로부터 전압(U)의 측정은 2가지 방법이 있음을 알 수 있다.

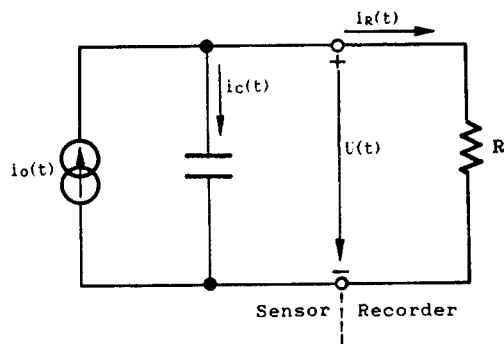


그림.2. 전계센서에 대한 노오턴의 등가회로

Fig.2. Norton equivalent circuit for the electric field sensor

첫째로는 오실로스코프의 입력임피던스가 케이블의 特性임피던스와 같아 (e. g $R = 50 \Omega$) $i_c \ll i_r$ 인 경우로서 식(2)는

$$U = R \epsilon A_{eff} \cdot \frac{dE}{dt} \dots \dots \dots (3)$$

으로 표현되며, 여기서 A_{eff} 는 센서의 實效 感知面積이다. 이 경우 센서의 출력전압은 주어진 전계의 時導函數에 비례하므로 전계 또는 전압을 알아내기 위해서 적분기가 필요하다.

둘째로는 오실로스코프의 입력임피던스가 큰 (e.g $R = 1M \Omega$) 경우, $i_c \gg i_r$ 이 되므로 식(2)는

$$U = \epsilon \frac{A_{eff}}{C_2} \cdot E \dots \dots \dots (4)$$

로 되어 센서의 출력전압은 전계에 비례하게 된다. 즉, 橫電磁波(transverse electromagnetic wave:TEM) 모드에서 센서의 접지전극의 전계는 고전압도체의 전압에 비례하며, 오실로스코프의 입력임피던스가 수동성 적분기로서 동작하게 된다.

센서의 감지전극과 접지전극사이의 정전용량이 균일하지 않을 때 진행파인 미지전계가 입사되면 감지전극의 電位分布가 불균일하게 되어 감지전극에 漂遊電流가 흐르게 되어 측정의 정확도가 낮아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 감지전극을 同心圓帶形으로 하여 얇은 절연물을 전극사이에 끼우는 구조로 하였으며, 감지된 신호를 반사 또는 굴절에 의한 왜곡없이 오실로스코프까지 전송시키기 위하여 同軸圓錐形 構造로 설계하였다.

동축선로의 특성임피던스 Z_0 는

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_s}} \log_{10} \frac{r_2}{r_1} \dots \dots \dots (5)$$

로 주어지며, 기체중에서 ϵ_s 는 약 1이므로 원추부분에서의 특성임피던스를 케이블의 특성임피던스와 동일한 $50[\Omega]$ 으로 정합시키기 위하여 $r_2/r_1=2.3$ 이 되도록 하였다.⁷⁾

절연물로는 절연내력, 기계적, 열적 특성이 우수하며, 비유전율이 커 작은 구조로 충분한 정전용량을 얻을 수 있는 폴리비닐리덴(PVDF:두께 $22[\mu\text{m}]$, 비유전률7.1) 필름을 사용하였다. 감지전극의 반경을 $50[\text{mm}]$, 실효감지면적을 $55.4[\text{cm}^2]$ 로 하여 정전용량이 $11.4[\text{nF}]$ 가 되도록 하였다.

3. 측정계의 구성

제작한 센서를 계측기로 사용하기 위하여는 교정실험이 필요하다. 따라서 센서의 기본성능의 파악이 가능한 直角波 應答特性을 측정하기 위하여 평행평판형 전송선로를 입력전원장치의 출력임피던스와 정합되도록 설계·제작하였으며, 傳送線路의 전개도와 교정실험의 측정회로를 그림 3에 나타내었다.

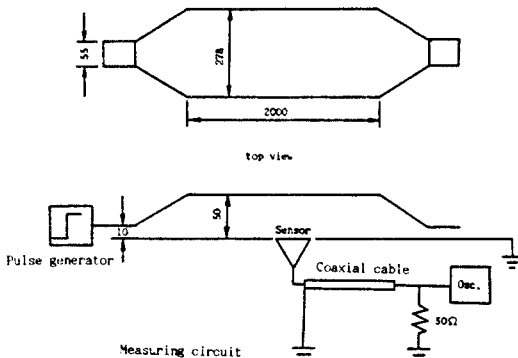


그림.3. 평행평판형 전송선로의 전개도와 계단응답측정계

Fig.3. Expansion diagram of the parallel

planar transmission line and step response measuring system

공기중의 평행평판형 전송선로에서 端部 効果를 고려하여 폭(W)를 높이(h)보다 크게 했을 때의 특성임피던스 $Z_0[\Omega]$ 은 다음 식과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.⁶⁾

$$Z_0 = \frac{377}{(W/h) + 2} \dots\dots\dots(6)$$

전송선로의 높이(h)를 $50[\text{mm}]$, 폭(W)를 $278[\text{mm}]$ 로 하고, 경사부분에서는 폭과 높이의 비를 일정하게 하여 특성임피던스 Z_0 가 $50[\Omega]$ 이 되도록 하였다. 따라서 직각과 전압을 전송선로에 인가하면 TEM파로 작용하여 센서에 입력되게 된다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 센서의 성능 측정

센서의 기본성능 파악을 위한 직각과 응답특성은 그림 3의 회로를 이용하여 측정



그림.4. 센서의 계단응답파형

Fig.4. Step response waveform of the sen

하였다. 입력전원으로는 상승시간이 5.4 [ns]인 펄스발생기(WaveTek, Model 801), 출력과형의 측정은 상승시간이 4.5[ns]인 오실로스코우프(Tek. 2232)를 사용하였다. 센서의 직각과 응답특성과 진행과의 반사작용을 동시에 측정하기 위하여 전송선로의 종단부에 길이 3.34[m]인 50[Ω]동축 케이블을 연결하고 개방시켰을 때의 응답과형을 그림 4에 나타내었다.

응답과형의 상승부에서 오우버 슈우트(overshoot)가 거의 없으므로 전송선로 및 측정계의 임피던스 整合이 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 센서의 상승시간 즉, 그림 4의 A부분에서 10%에서 90%까지의 시간은 약 7.2[ns]이다. 측정장치의 周波數域帶幅과 응답의 상승시간사이에는 상관관계가 있으며, 측정에 사용된 오실로스코우프용 증폭기의 응답특성이 正規分布를 가진다면 다음의 관계가 성립한다.^{8,9)}

$$B_w \cdot t_r = 350 \dots\dots\dots(7)$$

$$t_r = \sqrt{t_{r3}^2 - t_{r2}^2 - t_{r1}^2} \dots\dots\dots(8)$$

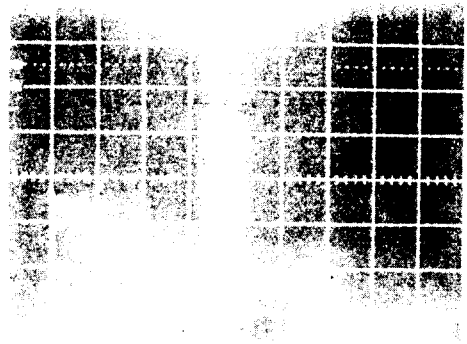
여기서 B_w 는 帶域幅[MHz]이고, t_r 는 센서응답의 순수상승시간[ns], t_{r1} 은 입력전원 상승시간[ns], t_{r2} 는 오실로스코우프의 상승시간[ns], t_{r3} 은 센서응답의 상승시간 측정치[ns]이다.

주파수대역의 低域側 遮斷周波數 f_L 은 측정용 계측기의 입력임피던스 R과 병렬 정전용량 C사이의 관계로부터 다음 식으로 결정된다.^{10,11)}

$$f_L = \frac{1}{2\pi RC} \dots\dots\dots(9)$$

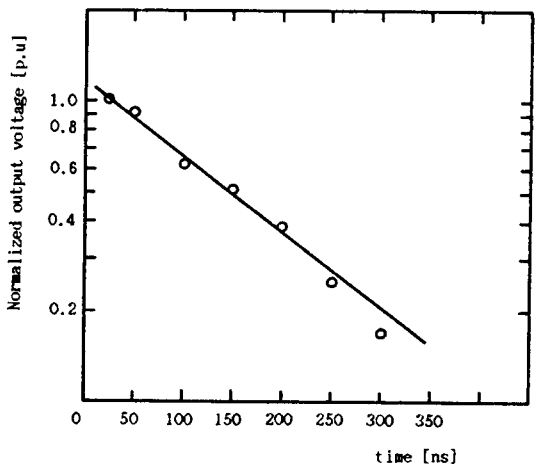
센서응답의 상승시간의 측정치를 식(8)에 대입하여 순수상승시간을 산출하면 약 1.56[ns]이다. 따라서 식(7)을 적용하면 주파수대역폭 B_w 는 약 200[MHz]가 된다. 주파수대역의 高域側 遮斷周波數는 거의 대역폭과 같으므로 200[MHz]정도의 고주파성분의 감지도 가능함을 알 수 있다.

그림 4의 B부분은 전송선로의 종단부가 개방되어 있으므로 전압의 반사파이며, A와 B사이의 시간지연과 케이블의 길이로부터 입력전압의 傳播速度를 구할 수 있으며, 약 0.227[m/ns]임을 알 수 있다.



[2mV/div, 100 ns/div]

(a) Full waveform



(b) Output voltage vs. time

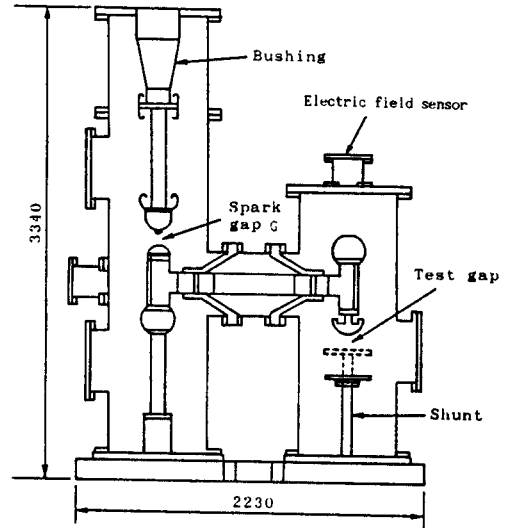
그림.5. 단위계단입력에 대한 센서의 응답
 Figl.5.Response of the sensor to unit step function

센서의 정전용량을 측정하기 위하여 전송선의 종단부를 $50[\Omega]$ 의 저항으로 단말처리하여 측정된 응답파형을 그림 5(a)에 나타내었다. 이 응답파형의 최대치근방의 不整 때문에 정확한 減衰時定數의 결정이 어려우므로 응답을 규격화시켜 半對數(semilog)그래프로 하여 그림(b)에 나타내었다. 그림 (b)의 기울기를 最小自乘法으로 구하였으며, 감쇠시정수는 약 $174[ns]$ 이다. 따라서 오실로스코우프의 입력임피던스가 $50[\Omega]$ 이므로 센서의 정전용량은 약 $3.48[nF]$ 임을 알 수 있다. 센서의 정전용량의 측정치는 이론치의 약 1/3정도로 적으며, 이러한 차이는 전극과 절연필름사이 에 밀착되지 않은 부분이 있기 때문인 것으로 여겨진다. 또한 센서의 정전용량을 구하였으므로 오실로스코우프의 입력임피던스를 $1[M\Omega]$ 또는 $10[M\Omega]$ (10배 배율기 사용)으로 하면 식(9)로부터 저역측 차단주파수는 50 또는 $5[Hz]$ 가 되므로 상용주파교류전압 및 전계의 직접측정도 가능하다.

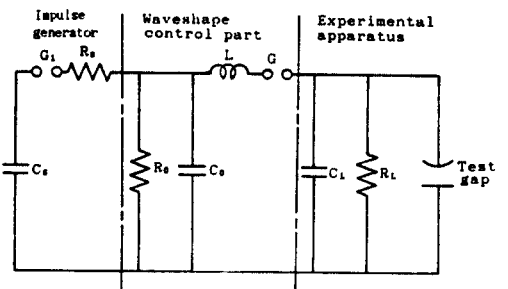
4-2. 실규모 GIS실험장치에서의 VFTO측정

800[kV]급 실규모 GIS실험장치를 제작하고 단로기조작을 모의하여 발생하는 과도과전압을 본 연구에서 제작한 센서를 이용하여 측정하고 분석하였다. 그림 6(a)에는 실험장치의 개략도를, 그림(b)에는 실

험회로를 전기적 등가회로를 나타내었다.



(a) Simplified view of the apparatus (unit: mm)



(b) Equivalent circuit of the test arrangement

그림.6. 실험장치

Fig.6. Experimental setup

전원으로는 2重充電式 12段Marx형 임펄스발생장치(2.1MV, 86kJ)를 사용하였으며, 이의 출력단에는 파형조정용 콘덴서 C_0 ($1nF$)와 R_0 ($3.1k\Omega$)이 접속되어 있다. 실험장치는 약 3m인 접속선으로 연결되며, 실험장치의 고전압도체는 충전되어 남는

殘留電荷의 영향을 없애기 위하여 $R_L(45k\Omega)$ 의 저항을 통하여 접지시켰다. 이 때 실험회로의 인덕턴스는 약 $34[\mu H]$ 이었다.

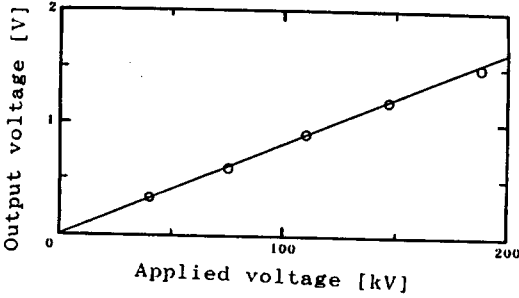


그림.7. 고전압에 대한 전기센서의 응답특성
Fig.7. Response characteristics of the electric field sensor to high-voltage

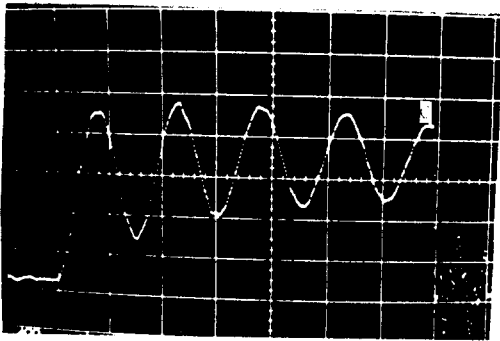


그림.8. 대표적인 진동성 과도전압의 파형
Fig.8. Typical waveform of the oscillating transient overvoltages

본 실험장치에서의 응답특성을 그림 7에 나타내었으며, $200[kV]$ 의 전압까지 직선성이 우수하고, 전압변동에 따른 분압비의 변화가 거의 없으며 약 6290이다. 단로기의 조작을 모사한 갭 G가 섬락될 때 GIS의 기하학적 구조와 실험회로정수에 의하

여 특징지어지는 과도전압이 발생한다. 이때의 발생전압의 대표적인 예를 그림 8에 나타내었으며, 파형의 차단부(C)는 테스트 갭의 섬락에 의한 것이다. 발생된 진동성 과도전압의 주파수는 약 $1.8[MHz]$ 이며, 波尾長은 약 $40[\mu s]$ 이었다. 진동주파수는¹²⁾

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0C_L/(C_0+C_L)}} \dots\dots\dots(10)$$

으로 표현되므로 식(10)으로부터 실험장치의 표류정전용량은 약 $300[pF]$ 가 된다. 진동성 최대전압의 過渡增倍率은 다음의 식

$$\eta = \frac{2C_0}{C_0+C_L} \dots\dots\dots(11)$$

로부터 약 $1.54[p.u]$ 이다. 즉, 인가전압 최대치의 1.54배인 과도과전압이 발생되며, 이 정도에 지나지 않은 이유는 주로 부싱과 GIS실험장치의 스페이스에 흡수되었기 때문일 것이다.

따라서 본 실험을 통하여 GIS실험장치와 試驗回路의 회로정수의 결정 및 과전압률, 진동주파수 등을 분석하였으며, 실제 전력설비의 운용을 위한 설비진단과 특성 검토에 대한 試驗方法으로 적용될 수 있으므로 유용한 수단으로 이용될 것이다. 또한 본 전기센서로 코로나, 부분방전 등을 감지하는 전력설비의 예방진단기술로의 적용이 가능할 것으로 판단되며, 앞으로 이 분야에 대한 연구가 기대되고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 용량성 전계센서를 제작하고 응답특성과 교정실험을 수행하였으며, 실규모 GIS실험장치에서 발생하는 과도전압을 측정 한 모의실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전계센서는 고주파응답특성이 우수하고 고역측 차단주파수는 약 200MHz이며, 저역측 차단주파수는 오실로스코프의 입력임피던스에 따라 다르지만 수 Hz까지의 측정도 가능하였다.
- (2) 소형이므로 GIS에의 내장이 가능하고 모의실험결과 200kV까지도 분압비가 거의 일정하였으며, 실규모 전력설비에서 발생하는 과도과전압의 측정이 가능하였다.
- (3) 본 연구에서 실현한 용량성 전계센서에 의한 과도과전압의 측정은 공간점유와 부하효과가 없으며, 가격이 저렴하고 다루기가 편리함이 확인되었다.

본 연구는 1990년도 한국과학재단 일반기초연구과제(901-0704-009-2)연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비를 지원해 준 한국과학재단에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 河村達雄, 李福熙 : “가스絶緣開閉裝置에 있어서 急峻波 過渡過電壓의 발생과 절연특성”, 大韓電氣學會誌, Vol. 38, pp. 21~30, 1989. 1.
- 2) G. Luxa, et al : “Recent Research Activity on the Dielectric Performance of SF₆ with Special Reference to Very Fast Transients”, GIGRE, No. 15~06, 1988.
- 3) Bok-Hee Lee, et al : “Particle-Initiated Breakdown Behaviors of SF₆ Gas under the Very Fast Transient overvoltages”, The 2nd Asian Conference on Electrical Discharge, pp. 67~72, 1989. 8.
- 4) 李福熙, 外 : GISにおける 急峻波サージ 試験裝置 測定システム” 平成元年 電氣學會全國大會論文集, No. 1288, 1989. 3.
- 5) J. Meppelik, et al : “Very Fast Transients in GIS”, GIGRE, WM 114-1, 1988.
- 6) John D. Kraus : *Electromagnetics*, McGraw Hill Book Co. 1988, pp. 365-452
- 7) 백용현, 이복희, 외 : “GIS에 있어서 과도과전압 측정용 센서”, 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp. 297~300, 1990.
- 8) 백용현, 이복희, 안창환 : “전계측정용 센서의 개발”, 대한전기학회논문지, Vol. 40, No. 6, pp. 630~637, 1991.
- 9) Edmund K. Miller : *Time-Domain Measurements in Electromagnetics*, Van Nostrand Reinhold Co., 1986, pp. 157-290.
- 10) J. Lalot : “Generation and Measurement of Fast Transient Overvoltages with Special Reference to Disconnecter Operation in GIS”, CIGRE, 33~96, 1986.
- 11) W. Zaengl : “Ein Beitrag zur Schrittantwort kapazitiver Spannungsteiler mit langen Meßkabeln”, ETZ-A, BD. 98 (1977) H. 12, S. 792~795
- 12) P. N. Nikolopoulos : “On the Generation of Steep Front High-Voltage Impulse”, 4th International Symposium on High Voltage Engineering, No. 51~07, Sep. 1983.
(1991년 1월 20일 접수)



백용현
1927년5월5일생. 1952년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1973-76년 일본 게이오대학대학원 졸업 (공학박사). 1986년-87년 대한전기학회 회장. 현재 인하대 공대 전기공학과 교수, 당학회 회장.



이복희
1954년6월29일생. 1980년 인하대 공대전기공학과 졸업. 1987년 동대학원전기공학과 졸업 (공학박사) 1988-89년 일본 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 현재 인하대학교 공대 전기공학과 조교수, 당학회 학술이사.



전덕규
1962년2월9일생. 1985년2월 인하대학 전기 공학과 졸업. 1990년2월 인하대학 전기공 학과 석사. 1992년 현재 인하대학 전기공학과 박사과정.