

# Capacitive Coupling을 이용한 VFTO 측정계에 대한 고찰

김진기, 김민규, 김영배, 문인욱, 김익수, 이형호, 김종연, 정상진  
한국전기연구소, 한전기술연구원

## On the Considerations of VFTO Measuring Systems using by Capacitive Coupling

Jin-gi Kim, Min-Kyu Kim, Yung-bae Kim, In-Wook Moon, Ik-Soo Kim, Hyeong-ho Lee,  
Jong-yeon Kim, Sang-jin Chung  
Korea Electrotechnology Research Institute, KEPCO

### ABSTRACT

The clarification of insulation capability of GIS(Gas Insulated Substation) under very fast transient overvoltages such as disconnector/circuit-breaker induced surge is very important for establishing not only a rational insulation testing method, but also insulation design intending to make GIS more reliable and more minimized.

One of the absolute prerequisites for this is that more accurate measurements of VFTO.

This describes capacitive voltage measuring methods for high voltage steep-fronted oscillating waves using capacitive coupling principle and their systems including source and load impedances. Time domain response of unit step and its frequency characteristics are also investigated.

### 1. 서론

산업의 고도화, 사회의 정보화에 따라 급증하는 전력수요에 대처하기 위해서 발전소의 증설, 전력계통 송전 전압의 격상, 가스절연변전소의 증설이 확대되고 있다.

가스절연변전소는 SF<sub>6</sub> 가스의 높은 절연 내력에 의한 초소형화, 고신뢰도화, 보수성의 생략화, 환경조화성등의 장점을 가지고 있어서 오늘날 전 세계적으로 널리 사용되고 있으나, 최근에 단로기나 차단기의 개폐동작에 의해서 GIS 내부에 발생하는 급준파 서어지에 의한 사고가 빈발하고 있어 문제가 되고 있다.

현재로서는 GIS의 절연성능에 단로기 서어지와 같은 고속과도전압이 미치는 영향에 관해서 명확한 결론은 없으며, 급준파 영역의 V-t 특성의 정량화와 초고속 과도전압을 고려한 절연시험법등이 중요한 과제로 되고 있다.

초고속 과도전압에 의한 GIS 절연성능의 평가를 위해서는 실측에 의한 검토가 불가피하므로 최우선적으로 초고속 과도전압(Very Fast Transient Overvoltage)을 정확하게 측정할 수 있는 고전압 급준파 측정방법의 확립이 필요하다.

본 논문에서는 전계결합 원리를 이용한 고전압 분압회로로써 전계센서를 제작하여 초고속 과도전압 측정 시스템을 구성하였다. 또한 급준파 서어지의 파형으로부터 주파수 특성을 간단히 분석할 수 있는 기본적인 펄스기술을 확립하고 이를 근거로하여 초고속 과도전압 측정시스템의 성능을 평가하였다.

### 2. VFTO 측정시스템에서의 요건

#### (1) VFTO의 특성

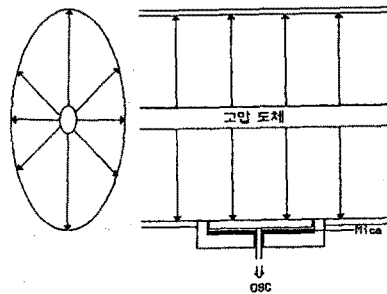
VFTO는 전압의 상승 시간이 수ns - 수십ns로 아주 급준하고, 포함하고 있는 주파수성분이 수백kHz에서부터 수백 MHz이상까지의 아주 복잡한 진동파형이라는 점, 또한 단로기의 개폐조작속도가 비교적 느려 재점호를 반복하므로 서어지의 발생빈도가 매우 높다는 특징을 갖고 있다. 그 원인으로서 단로기의 전극구조가 준평면전계로 설계되어 있고 SF<sub>6</sub>의

가스가 고기압이므로 방전의 형성시간이 지극히 짧으며, 발생한 급준파 서어지가 GIS내를 전파할 때에는 모선의 분기나 GIS 구성기기의 접속부분에 있어서 진행파 이론에 의거한 투과와 반사를 반복하여 특정지점에서 파의 중첩에 의한 과전압이 발생할 수 있다는 결론을 들 수 있다.

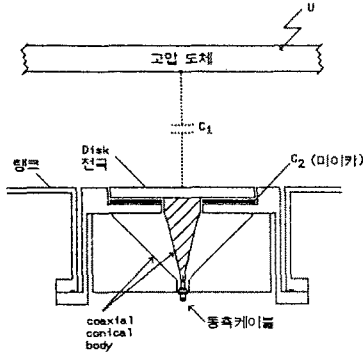
#### (2) 전계결합형 분압기

오실로스코프에 의한 서어지의 측정은 전압의 파고치뿐만 아니라 파형도 정확하게 알 수 있다는 잇점이 있으나 오실로스코프에 인가시킬 수 있을 정도의 전압으로 직렬연결된 두 개의 임피던스 즉, 고압부와 저압부로 분압하여야만 하는 단점이 있다. 일반적인 기존의 접촉형 분압기의 경우 임피던스 소자의 비순수성과 주파수(특히 초고주파에 대하여)의존성, 전압 및 온도에 대한 비선형의 종속성을 가지므로 정확한 전압의 측정이 곤란하기 때문에 급준파의 측정에는 적합하지 않다. 특히 GIS에서 발생하는 VFTO는 GIS의 형상에 따라 분압기의 설치위치를 항상 측정하려는 지점과 일치하지 않으므로 전압분압기의 설치위치와 측정하려는 위치간에 서어지 임피던스가 돌발적으로 변화한다면 측정된 VFTO는 측정이 요구되는 지점에서 발생하는 VFTO와는 크게 다를 수도 있다.

따라서 VFTO 측정용 분압기는 전압·온도·주파수등에 독립적이어야 하므로 비접촉형이 좋으며 수 ns대의 상승시간을 갖는 급준파를 측정하기 위해서는 수백 MHz이상의 대역폭을 가져야한다. 또한 실 GIS에 적용하기 위해서는 피시합장치(GIS)의 절연성능 또는 서어지 임피던스에 영향을 주지않도록 소형으로 설계되어야 한다. 물리적으로 전계결합형 용량 분압기의 고전압부는 모선 외피의 접지부에 설치되어 있는 검출전극과 고전압도체와의 정전요소이다. 저압부는 검출전극과 접지부간의 절연물의 임피던스로 형성된다.



(a) 전계결합



(b) 용량성분압기의 구조

그림 1. 전계결합원리에 의한 용량성분압기

### 3. 직각파응답 펄스파형과 주파수특성

시간영역 현상과 주파수영역 현상의 상관관계로부터 시간영역 개념을 주파수영역의 양으로 환산하는 관계식은 구성된 측정계의 성능을 직각파 응답시험으로 얻은 오실로그래프로부터 평가하는데 매우 효과적이다.

측정계가 각 주파수대역, 즉 저역, 중간대역, 고역에서 어떻게 응답하는가 또한, 측정계의 회로요소가 측정계의 성능을 결정하는 변수들 즉, 중간대역이득, A; 하한차단주파수,  $f_L$ ; 상한차단주파수,  $f_H$ 에 어떻게 작용하는가 가 측정계의 특성을 결정하게 된다. 주파수영역의 값들이 이러한 양들을 주파수영역 측정으로 직접 구하는 것은 실제적으로 대단히 어려우므로 시간영역 측정의 결과로부터 이들을 평가할 수 있다면 이는 매우 간단하면서도 유용한 방법이 될 것이다. 측정시스템의 시간영역 응답특성은 측정계의 입력단에 직각파진압을 여기서 출력단에서 측정된 응답파형으로부터 평가되며, 출력파형의 시간적인 특성으로부터 식 (1)과 (2)를 이용하여 주파수영역의 값들을 평가할 수 있다.

$$f_H - f_L = 0.35 / \tau_h \quad (1)$$

$$\text{Sag slope} = -2\pi A f_L \quad (2)$$

시간영역응답으로부터 주파수특성을 결정하는 다른 또 하나의 장점은 기록기기(오실로스코프)가 파형분산에 미치는 효과를 명확히 할 수 있다는 점이다. 오실로스코프에서 측정된 파형의 즉, 전체 신호경로의 상승시간은 (3)식과 같이 제곱법칙으로 주어진다.

$$\tau_4^2 = \tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2 \quad (3)$$

- $\tau_1$ : 오실로스코프의 상승시간
- $\tau_2$  ( $\tau_h$ ): 용량성분압기, 측정케이블, 케이블 보상회로의 결합상승시간
- $\tau_3$ : 직각파발생기의 상승시간
- $\tau_4$ : 신호경로의 전체 상승시간

따라서 각각의 전이시간에 대응하는 대역폭들의 상호관계는 (4)식으로 주어진다.

$$BW_4^{-2} = BW_1^{-2} + BW_2^{-2} + BW_3^{-2} \quad (4)$$

### 4. 실험장치 및 실험결과

#### (1) 실험장치

균준한 과도전압을 발생시키기 위한 동축선로의 직각파

발생장치와 GIS의 모선부를 모의한 동축시험선로를 제작하였다. 시험선로의 단말은 전압파의 분배반사를 피하도록 모선의 서지임피던스로정합하였다. 용량성분압기는 시험장치 자체에 의한 반사가 펄스의 지속시간동안(특히 파의 초기상승부분에 영향을 주지않도록 모선의 중앙에 위치하도록 하였다. 실험장치의 전체 구성도를 그림 2에 나타내었다.

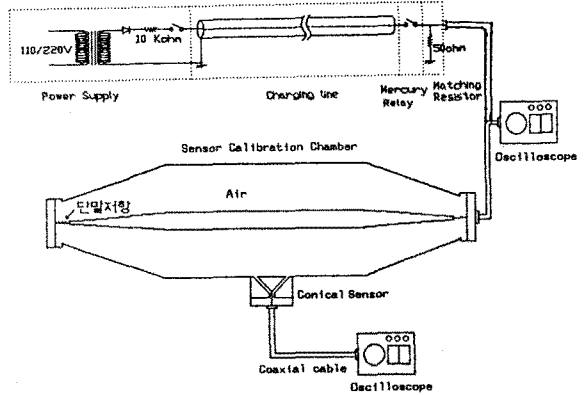


그림 2. 실험장치의 구성

실험장치의 전기적인 등가회로는 그림 3과 같다.

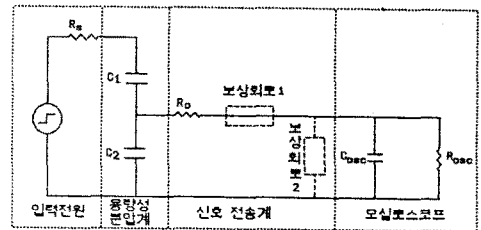


그림 3. 실험장치의 등가전기회로

용량성 분압기는 원리상 측정케이블의 단말을 저항으로 정합시킬 수 없다는 단점이 있어 측정케이블의 시점과 종점에서 신호의 무과반사로 인한 고주파진동의 발생은 불가피하다. 이 영향을 경감시키기위해서 측정케이블의 시단에 서지임피던스와 같은 값의 저항  $R_0$ 를 접속한다. 측정케이블은 높은 주파수에서는 서지임피던스  $Z_0$ 로 작용하고 낮은 주파수에서는 정전용량  $C_k$ 로 작용한다. 즉 고주파의 경우  $X_{C2} < (R_0 + Z_0)$ 가 만족하는 조건하에서는 측정시스템의 분압비는 식 (5)와 같다.

$$\rho = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (5)$$

낮은 주파수에 대해서  $R_0 = Z_0$  ( $1 / \omega C_k$ 의 조건이 성립된다면 분압비  $\rho$ 는

$$\rho = \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_k} \quad (6)$$

로 된다. 이와같이 용량성 분압기에서는 주파수에 따라서 분압비가 변화하므로 이를 보상하기위한 회로요소가 필요하다. 보상회로 1은 R-C 병렬회로로서 오실로스코프의 임피던스가 부하작용을 하므로서 발생하는 주파수에 따른 응답의 크기와

위상의 왜곡을 보상하고, 필요한 경우 제 2의 분압을 위한 회로이다. 보상회로 2는 측정케이블이 분압비에 미치는 영향을 보상하기 위해 어떤 주파수 이상에서 2차의 정전용량으로 작용할 수 있도록 하여 저주파영역의 응답을 개선하기 위한 회로요소이다.

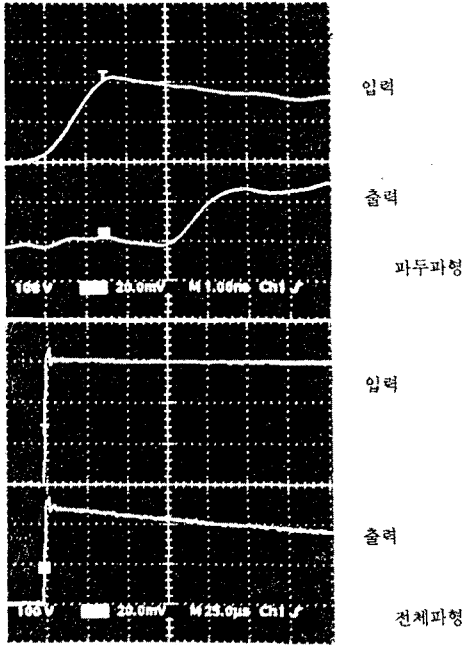


그림 4. 보상전의 측정계의 응답

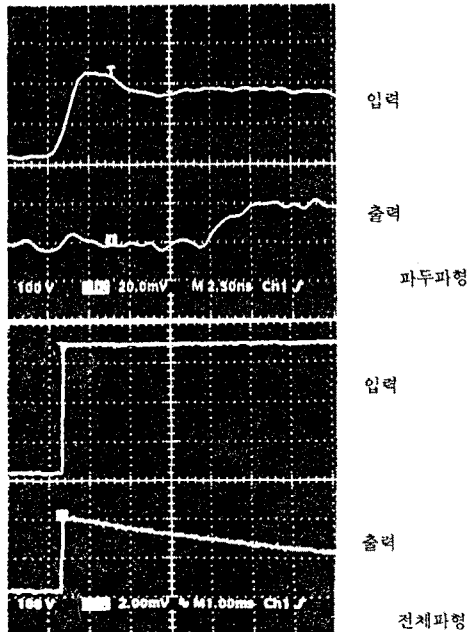


그림 5. 보상회로를 포함한 측정계의 응답

그림 4는 전계결합형 분압계에서 3m 길이의 케이블로 오실로스코프에 접속한 회로의 출력으로서 상한차단주파수는 수백 MHz 이상이나  $\mu$ s 시간대역에서는 뚜렷한 감쇠를 보이고 있다. (하한차단주파수 1 kHz 이상) 그림 5는 보상회로를 포함한 회로에 의한 응답으로 하한차단주파수는 상용주파수 이하까지 확장된 것으로 평가되어 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

## 5.결론

100ns 이하의 상승시간을 가지고 수ms 이상의 긴 DC성분을 포함하고 있는 단로기 서어지와 같은 급준한 초고속과도전압의 측정은 기존의 측정기술로는 불가능하였으나 전계결합형 분압계를 적용함으로써 수백Hz에서 수백MHz에 이르는 광역의 대역폭을 갖는 고전압 측정계의 구성이 가능하여졌다. 분압기로서 전계결합형 분압계를 이용하고 측정계에 대한 보상회로를 적절하게 구성한다면 전력주파수이하에서부터 1 GHz에 이르는 대역폭을 갖는 측정계의 구성이 가능하리라 사료되며 초고속과도전압(VFTO)에 관련된 연구에 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- [1] IEC Pub 60 High Voltage Test Technique
- [2] Y. Kawaguchi, H. Murase, S. Nishiwaki & Okubo  
"Measurement of Transient Voltages in GIS,"  
CIGRE SC 33 TYO-COL 06.02(1987)
- [3] S.A. Bogg & Fujimoto.  
"Techniques and Instrumentation for Measurement of Transients in Gas-insulated Switchgear"  
IEEE Trans. on Electrical Insulation.  
Vol EI-19, No. 2. PP 87-92(1984)
- [4] W. Boeck, W. Taschner, J. Gorablenkov, G. F.Luxa & L.Menten  
"Insulation in case of Fast Transients"  
CIGRE Paper No. 15-07(1986)
- [5] Millman J. 1979.  
Microelectronics: digital and analog circuits and systems.  
New York: McGraw-Hill.