

# 고전압 전기용량 브리지를 이용한 전압변성기의 비오차와 위상각 오차의 측정과 불확도 분석

論 文
55C-3-6

## Measurement of Ratio Error/Phase Angle Error of Potential Transformer using High Voltage Capacitance Bridge and Uncertainty Analysis

鄭在甲<sup>†</sup> · 權聖遠<sup>\*</sup> · 李相和<sup>\*\*</sup> · 金明壽<sup>\*\*\*</sup>  
 (Jae Kap Jung · Sung Won Kwon · Sang Hwa Lee · Myungsoo Kim)

**Abstract** - A potential transformer(PT) has ratio error and phase angle error. Precise measurement of the errors of PT can be achieved using high voltage capacitance bridge, high voltage capacitor and low voltage capacitor. The uncertainty for this method is evaluated and found to be  $20 \times 10^{-6}$  in both ratio error and phase angle error. The values measured for PT using the method are well consistent with the those measured for same PT in NMIA(National Measurement Institute of Australia) within the corresponding uncertainty.

**Key Words** : Potential Transformer, Ratio Error, Phase Angle Error, High Voltage Capacitance Bridge, High Voltage Capacitor, Low Voltage Capacitor, Ratio Correction Factor

### 1. 서 론

최근 세계적으로 송전전압 및 전력용량이 증대되고 있고, 관련 중전기기의 성능인증시험에서 높은 수준의 신뢰성 있는 정확도를 요구하고 있다. 그러나 중전기기 산업체에서는 고전압 및 대전류 시험결과에 대해 국가측정 표준으로부터 소급성(traceability) 연계가 되어있지 않아 국제공인을 받지 못하고 있는 실정이다. 따라서 국내에서 생산되는 중전기기 제품 품질의 국제적 신뢰성 확보 및 수출 활성화를 위해 고전압 국가측정표준을 확립하여 산업체에 국가표준의 소급이 시급하다.

국가측정표준의 확립을 위해서는 고전압 분야의 핵심기기인 계기용 전압 변성기(instrument voltage transformer)의 비오차(ratio error)와 위상각 오차(phase angle error)의 정밀측정과 자체소급성이 요구된다. 이는 일반적으로 전압변성기 비교 측정장치(오차 측정 장치)를 사용하여 피측정 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 측정한다. 이 방법은 피측정 전압 변성기와 비교하여 비오차와 위상각 오차를 무시할 수 있는 표준 전압 변성기를 기준으로 피측정 전압 변성기의 비오차와 위상각 오차를 측정한다. 그러나 실제로 표준 전압 변성기는 아주 작은 오차를 가지고 있으므로 정확한 피측정 전압 변성기의 비오차와 위상각 오차를 얻기 위해서는 표준 전압 변성기가 가지고 있는 자체 오차값을 알고, 그 값을 보정해 주어야 한다. 따라서 고전압 국가측정

표준의 확립을 위해서는 상위핵심 기기인 표준 전압 변성기의 비 오차와 위상각 오차를 자체평가 하여야 자체 소급성을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 고전압 전기용량 브리지(high voltage capacitance bridge), 고전압 표준용량기(high voltage standard capacitor) 및 저전압 표준용량기(low voltage standard capacitor)를 이용하여 표준 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 절대 측정할 수 있는 방법을 개발하였고, 측정결과에 대한 불확도 평가도 같이 수행하였다. 이는 외국선진 표준기관인 미국 (National Institute of Standards and Technology, NIST)[1], 영국 (National Physical Laboratory, NPL)[2], 캐나다 (National Research Council, NRC)[3-5], 독일 Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB)[5] 에서 많이 활용하고 있는 방법으로서 고전압 표준용량기와 저전압 표준용량기의 전기용량비와 손실계수를 이용하여 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 정밀 측정하는 capacitance method 이다[6]. 본 측정방법에 대한 유효성을 검증하기 위해 본 연구원에서 측정한 동일한 피측정기기에 대해 동일한 측정조건에서 호주 국가표준기관(NMIA)에서 측정한 결과와 상호비교를 하였는데 서로의 불확도 이내에서 측정값들이 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

### 2. 고전압 전기용량 브리지를 이용한 전압변성기의 비오차와 위상각 오차 측정

#### 2-1. 전압변성기의 측정인자들의 정의

전압 변성기의 중요한 측정량은 비오차와 위상각 오차 및 비보정인자이다. 전압 변성기의 비오차(ratio error, RE)는 아래와 같이 정의된다.[7]

$$RE \equiv \left[ \frac{(NV_s - V_b)}{V_b} \right] \quad (1)$$

† 교신저자, 正會員 : 한국표준과학연구원 선임연구원  
 E-mail : jkjung@kriss.re.kr

\* 正會員 : 한국표준과학연구원 책임연구원

\*\* 正會員 : 한국표준과학연구원 선임연구원

\*\*\* 正會員 : 한국표준과학연구원 표준보급 부부장

接受日字 : 2006年 1月 3日

最終完了 : 2006年 2月 1日

$V_p$  : 실제의 1차측 전압(actual primary voltage)  
 $V_s$  : 실제의 2차측 전압(actual secondary voltage)  
 $N$  : 정격 변환비(rated transformation ratio)

위상각 오차(phase angle error,  $\Gamma$ )는 2 차측 전압 벡터의 위상( $\Gamma_s$ )에 대한 1 차측 전압 벡터의 위상( $\Gamma_p$ ) 차이로 정의한다.[7]

$$\Gamma \equiv \Gamma_s - \Gamma_p \quad (2)$$

2차측 전압의 위상이 1차측 전압의 위상보다 빠를 때 정(+: lead)이고 반대일 때는 부(-: lag)이다. 위상각 오차의 단위는 min 이나 crad 을 사용하는데 그 관계는 아래와 같다.

$$1 \text{ crad} = 34.38 \text{ min} \quad (3)$$

반면 비보정인자(Ratio Correction Factor, RCF)는 정격변환비(rated transformation ratio)에 대한 실제 측정된 변환비(actual measured transformation ratio)로 정의되고, 비오차와의 관계는 아래와 같다[6].

$$RCF \equiv \frac{\text{actual measured transformation ratio}}{\text{rated transformation ratio}} = 1 - RE \quad (4)$$

전압변성기의 전압 복소비와 비보정인자 및 위상각 오차와의 관계는 아래와 같다.[7]

$$\frac{V_p}{V_s} \cong N \cdot RCF(1 - jI) \quad (5)$$

### 2-2. 전압변성기의 비오차와 위상각 오차의 측정원리 및 방법

고전압 전기용량 브리지는 그림 1과 같이 두 전기용량기 양단에 흐르는 전류를 비교하여 미지의 전기용량기의 전기용량값과 손실계수를 측정하는 기기이므로, 이를 전류비교기 방식 전기용량브리지(current comparator-based capacitance bridge)라고 한다. 그림 1은 전류 비교기 방식의 전기용량 브리지의 회로도이다. 전기용량값  $C_s$ 값과 손실계수(dissipation factor)를 알고 있는 표준용량기를 기준으로 하여 미지의 용량기에 대한 전기용량값  $C_x$ 와 손실계수를 측정한다.

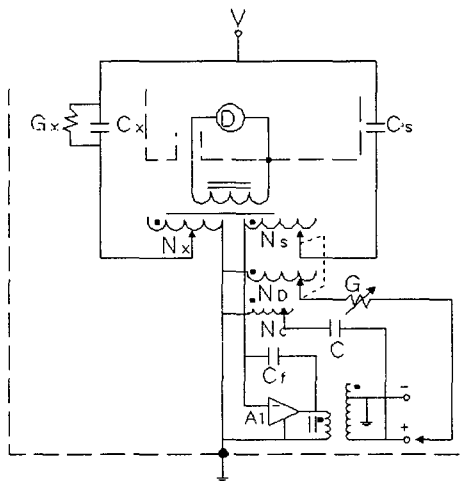


그림 1. 고전압 전류비교기 방식 전기용량브리지  
 Fig. 1. High voltage current comparator-based capacitance bridge

전류비교기 방식 전기용량 브리지의 양단  $C_x$  와  $C_s$  에 흐르는 전류가 같을때의 평형조건은 다음과 같다.[6]

$$V(G_x + j\omega C_x)N_x = Vj\omega C_s N_s + V \frac{C_s}{C_f} (j\omega C N_c + G N_D) \quad (6)$$

$N_D = N_s$  이고 식 (6)을 정리하여 다시 쓰면

$$C_x(1 + \frac{G_x}{j\omega C_x}) = C_s \frac{N_s}{N_x} (1 + \frac{C}{C_f} \frac{N_c}{N_s} + \frac{G}{j\omega C_f}) \quad (7)$$

이다. 식 (7)에서 평형을 잡기위한 추가적인  $\frac{C}{C_f} \frac{N_c}{N_s}$  항은 매우작아 무시 가능하다. 식 (7)로부터 미지의 용량값  $C_x$  와 손실계수  $\frac{G_x}{\omega C_x}$  는 아래와 같다.

$$C_x = C_s \frac{N_s}{N_x} \quad (8)$$

$$C_x \text{의 손실계수}(D_x) = \frac{G_x}{\omega C_x} = \frac{G}{\omega C_f} \quad (9)$$

식 (8)에서 미지의 용량기의 용량값  $C_x$ 는 표준용량기의 용량값  $C_s$ 에 전기용량 브리지의 용량비 다이얼의 세팅값  $\frac{N_s}{N_x}$ 의 곱이다. 미지의 용량기의 손실계수는 전기용량 브리지의 손실계수 다이얼의 세팅값으로서 표준용량기에 대한 미지의 용량기의 손실계수의 차이이다. 따라서 고전압 전기용량 브리지를 이용하여 미지의 용량기의 전기용량값과 손실계수를 측정할 수 있다.

고전압 전기용량 브리지(high voltage capacitance bridge)와 두 개의 전기용량기(low voltage capacitor, CL & high voltage capacitor, CH)를 사용한 전압 변성기를 측정원리와 방법에 대해 설명하고자 한다. 여기에 사용된 장비들의 사양은 다음과 같다.

- 1) 고전압 전기용량 브리지
  - 제작사 및 모델 : Guildline 사 9910 A
  - 전기 용량비 정확도 :  $10 \times 10^{-6}$
  - 손실계수 정확도 :  $10 \times 10^{-6}$
- 2) 고전압 용량기
  - 제작사 및 모델 : Tettex 사 3370 NK/1000/30
  - 전기용량값 : 1000 pF
  - 정격전압 : 30 kV
  - 전압계수 :  $30 \times 10^{-6}$  이내
  - 손실계수 :  $10 \times 10^{-6}$  이내
- 3) 저전압 용량기
  - 제작사 및 모델 : Gen Rad 사 1404 type
  - 전기용량값 : 1000 pF
  - 정격전압 : 750 V
  - 정확도 :  $5 \times 10^{-6}$
  - 손실계수 :  $10 \times 10^{-6}$  이내

고전압 전기용량 브리지를 이용한 전압 변성기의 비오차 및 위상각 오차의 측정절차는 두 단계로 이루어지는데 단계 별로 나누어 측정방법 및 원리를 설명한다.

2-2-1. 저전압에서 용량비(CL/CH)와 손실계수의 측정

- 1) 그림 2와 같이 전압 변성기의 2차측 전압단자(Vs)를 저전압 용량기(CL)의 H 단자와 고전압 용량기(CH)의 H 단자에 연결하고, 저전압 전기용량기의 L 단자는 전기용량 브리지 Nx 다이얼에, 고전압 용량기의 L 단자는 전기용량 브리지 NS 다이얼에 연결한다.
- 2) 그림 2에서 전압변성기 2 차측 전압 110 V를 저전압 용량기와 고전압 용량기에 동일하게 가한다. 이는 전압변성기 2 차측 전압 110 V 가 유도되도록 1 차측에 고전압을 가하면 된다. 이때 전기용량 브리지의 용량비와 손실계수 다이얼을 돌려 고전압 용량기와 저전압 용량기쪽에 흐르는 전류가 같을때를 Lock-In Amplifier 를 이용하여 찾는다. 이때가 평형조건인데, 그림 2는 그림 1에서 Cx 와 Cs 대신 CL 와 CH 대체하여 나타내었으므로 식 (8)과 (9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{C_L}{C_H} = \frac{N_s}{N_x} \tag{10}$$

$$C_L \text{의 손실계수}(D_L) = \frac{G_L}{\omega C_L} = \frac{G}{\omega C_f} \tag{11}$$

여기서 두 전기용량기의 비  $\frac{C_L}{C_H}$ 와 저전압 용량기의 손실계수  $C_L$ 은 평형조건에서 얻은 전기용량 브리지 다이얼의 값이다. 측정값의 예를 들면 용량비는  $\frac{C_L}{C_H} = \frac{N_s}{N_x} = 1 \times 0.999\ 950$  이고, 손실계수는  $D_L = +3\ \mu\text{rad}$  로 측정되었다. 여기서 용량기  $C_L$ 의 손실계수  $D_L$ 은 표준용량기에 대한 미지의 용량기의 손실계수의 차이 즉 위상각의 차이이다.

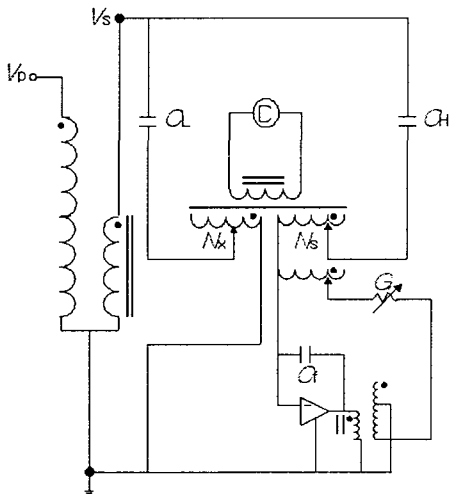


그림 2. 저전압에서 전기용량비와 손실계수 측정회로  
Fig. 2. A circuit for measurement of capacitance ratio and dissipation factor for unknown capacitor(Cx) at low voltage.

2-2-2. 전압변성기의 비오차와 위상각 오차의 측정

- 1) 그림 3과 같이 CL 과 CH의 위치를 서로 바꾸고, 전압 변성기의 1차측에 CH 가 연결되고 전압변성기의 2차측에 CL 이 연결되게 한다.
- 2) 전압변성기의 1차측 고전압(Vp)를 가하면 전압변성기의 2차측에는 저전압(Vs)이 유도된다. 여기서 전압변성기 1차측 고전압은 가변 슬라이더덕스와 승압 트랜스포머를 이용하여 가한다.
- 3) 고전압을 가한 상태에서 전기용량 브리지의 용량비 다이얼과 손실계수 다이얼을 돌려 고전압 용량기와 저전압 용량기쪽에 흐르는 전류가 같을때를 Lock-In Amplifier 를 이용하여 찾는다. 브리지의 평형방정식과 식 (5)로 부터 피측정 전압변성기의 2차측 전압에 대한 1 차측 고전압에 대한 복소비는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{V_p}{V_s} &= \left(\frac{C_L}{C_H}\right)_1 \left(\frac{N_s}{N_x}\right)_2 (1-jD) \\ &= N \cdot RCF(1-j\Gamma) \end{aligned} \tag{12}$$

식 (12)에서  $\left(\frac{C_L}{C_H}\right)_1 \left(\frac{N_s}{N_x}\right)_2$ 는 전압변성기의 측정된 변환비(actual measured transformation ratio)에 해당되고 이는 2-2-1의 측정에서 얻은 용량비  $\left(\frac{C_L}{C_H}\right)_1$ 와, 2-2-2의 측정에서 얻은 비  $\left(\frac{N_s}{N_x}\right)_2$ 의 곱으로 구해진다. 식 (4)와 (12)를 이용하여 전압 변성기의 비오차와 위상각 오차는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$RE = 1 - \frac{1}{N} \left(\frac{C_L}{C_H}\right)_1 \left(\frac{N_s}{N_x}\right)_2 \tag{13}$$

$$\Gamma = D \tag{14}$$

피측정 전압 변성기  $V_p/V_s = 6600\ \text{V}/110\ \text{V}$  단자에서의 측정 및 비오차 계산예를 제시하였다.

(계산예)

$V_p/V_s = 6600\ \text{V}/110\ \text{V}$  단자

$$\left(\frac{C_L}{C_H}\right)_1 = 1 \times 0.999\ 502$$

$$\left(\frac{N_s}{N_x}\right)_2 = 100 \times 0.600\ 216$$

$$D = -50\ \mu\text{rad}$$

actual measured transformation ratio

$$= \left(\frac{C_L}{C_H}\right)_1 \left(\frac{N_s}{N_x}\right)_2$$

$$= (1 \times 0.999\ 502) \times (100 \times 0.600\ 216)$$

$$= 59.991\ 709$$

$$RE = 1 - \frac{1}{N} \left(\frac{C_L}{C_H}\right)_1 \left(\frac{N_s}{N_x}\right)_2$$

$$= 1 - \frac{1}{60} (59.991\ 709) = 0.000\ 138$$

$$\Gamma = D = -50\ \mu\text{rad}$$

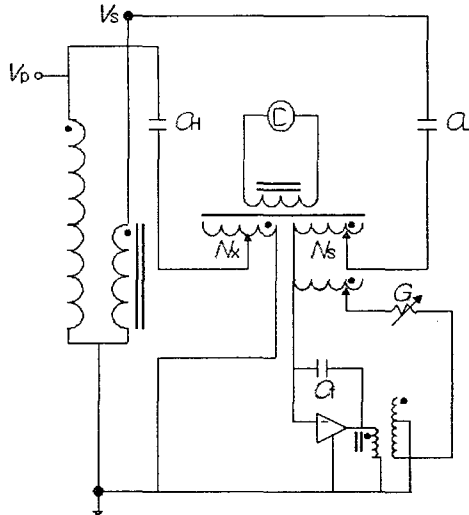


그림 3. 전압변성기의 비오차와 위상각 오차의 측정회로  
 Fig. 3. A circuit for measurement of ratio error and phase angle error for potential transformer

### 3. 불확도 분석

#### 3-1. 불확도 요인

고전압 전기용량 브리지와 두 개의 표준용량기를 이용하여 영부담에서의 전압변성기의 비오차와 위상각 오차의 측정에서 표준불확도는 다음의 요인들을 가지고 있다.

- 3-1-1. 반복측정에 의한 표준불확도( $u_A$ )
- 3-1-2. 고전압 전기용량 브리지 다이얼의 직선성에 의한 표준불확도( $u_{B1}$ )
- 3-1-3. 고전압 전기용량 브리지의 용량비와 손실계수 정확도 사양에 의한 표준 불확도( $u_{B2}$ )
- 3-1-4. 고전압 용량기의 전압계수에 의한 표준불확도( $u_{B3}$ )
- 3-1-5. 고전압 전기용량 브리지의 분해능에 의한 표준불확도( $u_{B4}$ )
- 3-1-6. 피측정 전압변성기 2차측 전압변화에 의한 표준불확도( $u_{B5}$ )
- 3-1-7. 주파수 변화에 의한 표준불확도( $u_{B6}$ )

#### 3-1-1. 반복측정에 의한 표준불확도( $u_A$ )

고전압 전기용량 브리지를 이용하여 2-2-1 및 2-2-2의 절차에 따라 전압 변성기의 비오차와 위상각 오차를 영부담에서 4회 반복측정하였고, 반복측정에 의한 표준 불확도는 식 (15)를 이용하여 구한다.

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_i (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n(n-1)}} \quad (15)$$

여기서  $\delta_i$ 는 각 측정값이고,  $\bar{\delta}$ 는 측정값의 평균값이고,  $n$ 은 측정횟수이다. 영부담(zero burden)에서 측정한 Raw data를 포함하여 비오차와 위상각 오차의 반복측정에 의한 표준불확도를 표 1(a)와 (b)에 각각 나타내었다.

표 1(a). 비오차의 반복측정값과 표준불확도

Table 1(a). Repeated measurement value and standard uncertainty for ratio error (단위 : %)

Primary voltage (V)	Secondary voltage (V)	Number of measurement				Average value	Standard uncertainty (uA)
		1	2	3	4		
1100	30	+0.004	+0.003	+0.002	+0.004	+0.003	0.0005
	110	+0.010	+0.009	+0.008	+0.008	+0.009	0.0005
2200	30	+0.013	+0.013	+0.012	+0.014	+0.013	0.0004
	110	+0.016	+0.017	+0.016	+0.017	+0.017	0.0003
3300	30	+0.013	+0.013	+0.012	+0.014	+0.013	0.0004
	110	+0.018	+0.017	+0.016	+0.017	+0.017	0.0004
6600	30	+0.009	+0.009	+0.010	+0.010	+0.010	0.0003
	110	+0.013	+0.014	+0.014	+0.014	+0.014	0.0003

표 1(b). 위상각 오차의 반복측정값과 표준불확도

Table 1(b). Repeated measurement value and standard uncertainty for phase angle error (단위 : crad)

Primary voltage (V)	Secondary voltage (V)	Number of measurement				Average value	Standard uncertainty (uA)
		1	2	3	4		
1100	30	+0.008	+0.008	+0.008	+0.008	+0.008	0.0000
	110	+0.004	+0.004	+0.004	+0.004	+0.004	0.0000
2200	30	+0.001	+0.001	+0.002	+0.001	+0.001	0.0003
	110	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.0000
3300	30	-0.003	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003	0.0003
	110	-0.004	-0.004	-0.005	-0.004	-0.004	0.0003
6600	30	-0.003	-0.003	-0.004	-0.003	-0.003	0.0003
	110	-0.004	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	0.0003

(+ : lead, - : lag)

#### 3-1-2. 고전압 전기용량 브리지 다이얼의 직선성에 의한 표준불확도( $u_{B1}$ )

피측정 전압변성기의 2차측에 연결하는 외부부담으로서 직-교류 차이가 10<sup>-6</sup> 이하인 저항을 변화시켜가면서 비오차와 위상각 오차를 측정했을 때 비오차와 위상각 오차의 변화가 저항의 역수에 이론적으로 비례한다.[8] 이를 이용하여 고전압 전기용량 브리지의 비오차와 위상각 오차의 직선성을 평가할 수 있다. 또한 넓은 범위의 비오차를 갖는 전압 변성기를 이용하여 비오차의 직선성을 평가할 수 있다.[9] 저항부담을 이용하여 비오차와 위상각 오차의 직선성 평가 결과를 각각 그림 4과 5에 나타내었다. 그림 4에서의 측정은 전압 변성기  $V_p/V_s = 3300\ \text{V}/110\ \text{V}$ 의 2차측 전압  $V_s = 85\ \text{V}$ 에서 측정한 결과이고, 삽입된 그림은  $V_p/V_s = 550\ \text{V}/110\ \text{V}$ 의 2차측 전압  $V_s = 30\ \text{V}$ 에서 측정한 결과이다. 비오차의 직선성 평가결과 비오차가 -0.033 % ~ 0.17 %의

범위에서  $10 \times 10^{-6}$  이내에서 잘 유지되었다.

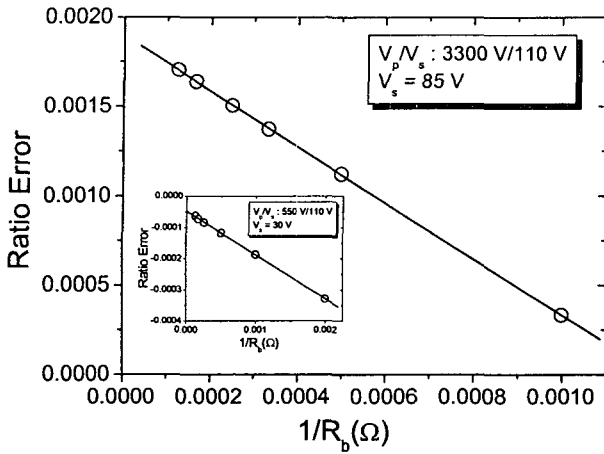


그림 4. 저항부담값에 따른 비오차의 변화  
 Fig. 4. A change of ratio error as a function of standard resistance burden

그림 5에서의 측정은 전압 변성기  $V_p/V_s = 3300 \text{ V}/110 \text{ V}$  의 2차측 전압  $V_s = 85 \text{ V}$ 에서 측정된 결과이고, 위상각 오차의 직선성 평가결과 위상각 오차가  $-280 \mu\text{rad} \sim 130 \mu\text{rad}$  의 범위에서  $10 \times 10^{-6} \text{ rad}$  이내에서 잘 유지되었다.

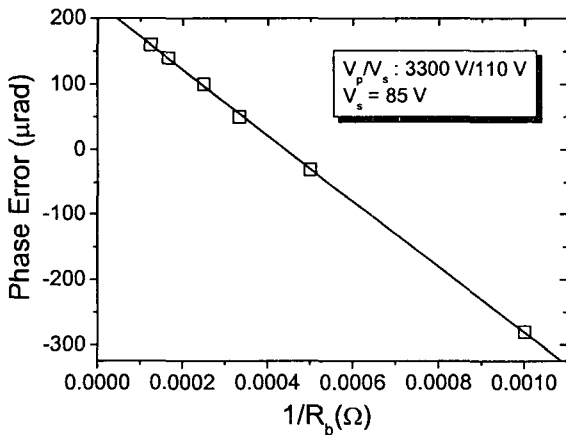


그림 5. 저항부담값에 따른 위상각 오차의 변화  
 Fig. 5. A change of phase angle error as a function of standard resistance burden

따라서 비오차와 위상각 오차의 직선성에 의한 표준 불확도는 각각 아래와 같다.

$$u_{B1, r} = (10 \times 10^{-6}/1.732) = 5.8 \times 10^{-4} \% \quad (16)$$

$$u_{B1, p} = (10 \times 10^{-6} \text{ rad}/1.732) = 5.8 \times 10^{-4} \text{ crad} \quad (17)$$

**3-1-3. 고전압 전기용량 브리지의 용량비와 손실계수 정확도 사양에 의한 표준 불확도( $u_{B2}$ )**

고전압 전기용량 브리지의 제조사의 정확도 사양에 의하면 용량비와 손실계수에 대해 정확도는  $10 \times 10^{-6}$  이내이

다. 따라서 고전압 전기용량 브리지에 의한 비오차와 위상각 오차에 대한 표준불확도는 아래와 같다

$$u_{B2, r} = (10 \times 10^{-6}/1.732) = 5.8 \times 10^{-4} \% \quad (18)$$

$$u_{B2, p} = (10 \times 10^{-6} \text{ rad}/1.732) = 5.8 \times 10^{-4} \text{ crad} \quad (19)$$

**3-1-4. 고전압 용량기의 전압계수에 의한 표준불확도( $u_{B3}$ )**

고전압 전기용량 브리지와 두 대의 전기용량기를 이용한 피 측정 전압변성기의 비오차와 위상각 오차는 식 (12)를 이용하여 구한다. 여기서  $(\frac{C_L}{C_H})_1$  는 첫 번째의 측정 즉 저전압에서 측정된 용량기의 비이고, 이 값과 두 번째 측정에서 얻은 값을 식 (12)에 대입하여 피측정 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 구한다. 그러나 실제로는 두 번째 측정에서 고전압 전기용량기 CH 에는 고전압이 인가되므로 고전압에서의 전기용량값이 저전압에서 측정된 값과 차이가 생긴다. 왜냐하면 고전압 전기용량기가 전압 계수를 가지고 있기 때문이다. 여기에 사용한 고전압 용량기는 정격전압이 30 kV이고, 제조사의 사양에 의하면 고전압 용량기의 전압 계수는 정격전압 30 kV 에서 전압 계수가  $30 \times 10^{-6}$  이내이다. 전압계수는 공급하는 전압의 제곱에 비례하므로, 즉  $(\Delta C_H/C_H) \propto V^2$  이다. 따라서 가하는 전압에 대한 전압계수에 의한 전기용량값의 변화는 아래와 같다.

$$(\Delta C_H/C_H) = 0.033 \times V_p^2 [\text{kV}] \times 10^{-6} \quad (20)$$

예를 들어 1차측 전압  $V_p = 6.6 \text{ kV}$  인 경우에 전기용량값의 변화는

$$(\Delta C_H/C_H) = 0.033 \times 6.62 \times 10^{-6} = 1.4 \times 10^{-4} \quad (21)$$

이다. 식 (13)에 의해 전기용량값의 변화에 의해 전압 변성기의 비오차와 위상각 오차의 불확도를 유발하므로 비오차와 위상각 오차에 대한 표준불확도는

$$u_{B3, r} = (1.4 \times 10^{-6})/1.732 = 8 \times 10^{-5} \% \quad (22)$$

$$u_{B3, p} = (1.4 \times 10^{-6} \text{ rad})/1.732 = 8 \times 10^{-5} \text{ crad} \quad (23)$$

이다.

**3-1-5. 고전압 전기용량 브리지의 분해능에 의한 표준 불확도( $u_{B4}$ )**

고전압 전기용량 브리지의 분해능이  $10^{-6}$  이므로 비오차와 위상각 오차의 불확도는 직사각형 확률 분포로 적용하면 아래와 같다.

$$u_{B4, r} = (0.5 \times 10^{-6}/1.732) = 0.29 \times 10^{-4} \% \quad (24)$$

$$u_{B4, p} = (0.5 \times 10^{-6} \text{ rad}/1.732) = 0.29 \times 10^{-4} \text{ crad} \quad (25)$$

**3-1-6. 피측정 전압변성기 2차측 전압변화에 의한 표준 불확도( $u_{B5}$ )**

피측정 전압변성기의 2차측 전압이 참값과 차이가 날 때 불확도가 유발된다. 즉 2차측 전압의 측정에서 전압이 1% 불확도를 가지고 있고, 전압변화에 의한 비오차와 위상각 오

차의 불확도는 아래와 같다.

$$u_{B5} = \left[ \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{(V_2 - V_1)} \times \frac{V_s}{100} \right] / 1.732 \quad (26)$$

- $\epsilon_1$  : 첫번째 2차측 전압에서 측정된 비오차 혹은 위상각 오차
- $\epsilon_2$  : 두번째 2차측 전압에서 측정된 비오차 혹은 위상각 오차
- $V_1$  : 첫번째 2차측 전압
- $V_2$  : 두번째 2차측 전압
- $V_s$  : 2차측 전압

계산예 :  $V_p/V_s = 6600 \text{ V}/110 \text{ V}$  의 2차측 전압  $V_s = 110 \text{ V}$  인 경우 비오차의 전압계수에 의한 불확도

$$\begin{aligned} u_{B5,r} &= \left[ \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{(V_2 - V_1)} \times \frac{V_{SR}}{100} \right] / 1.732 \\ &= \left[ \frac{0.014\% - 0.010\%}{110 \text{ V} - 30 \text{ V}} \times \frac{110 \text{ V}}{100} \right] / 1.732 \\ &= 0.00003\% \end{aligned}$$

### 3-1-7. 주파수 변화에 의한 표준불확도( $u_{B6}$ )

피측정 전압변성기에 가해지는 주파수가 참값과 차이가 날 때 불확도가 유발된다. 60 Hz의 주파수가 1%의 불확도를 가진다고 가정했을 때 이로 인한 불확도는 아래와 같다.

$$u_{B6} = \left[ \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{(f_2 - f_1)} \times \frac{60 \text{ Hz}}{100} \right] / 1.732 \quad (27)$$

- $\epsilon_1$  : 첫번째 주파수에서 측정된 비오차 혹은 위상각 오차
- $\epsilon_2$  : 두번째 주파수에서 측정된 비오차 혹은 위상각 오차
- $f_1$  : 첫번째 측정 주파수
- $f_2$  : 두번째 측정 주파수

계산예 :  $V_p/V_s = 6600 \text{ V}/110 \text{ V}$  의 전압 변성기 교정시  $V_s = 110 \text{ V}$  에서 비오차의 측정주파수 변화에 의한 불확도

$$\begin{aligned} u_{B6,r} &= \left[ \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{(F_2 - F_1)} \times \frac{60 \text{ Hz}}{100} \right] / 1.732 \\ &= \left[ \frac{0.014\% - 0.013\%}{60 \text{ Hz} - 50 \text{ Hz}} \times \frac{60 \text{ Hz}}{100} \right] / 1.732 \\ &= 0.00004\% \end{aligned}$$

### 3-2. 합성 표준 불확도( $u_c$ ), 유효자유도( $\nu_{eff}$ ), 확장불확도( $U$ )

부담이 없는 경우의 합성표준 불확도는(combined standard uncertainty)는 앞서 기술한 불확도 요인들의 root sum of squares(RSS)로서 구한다.

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots + u_{B6}^2} \quad (28)$$

식 (28)을 이용하여 계산한 비오차와 위상각 오차의 합성 표준 불확도를 각각 표 2 (a) 와 (b)에 나타내었다.

신뢰수준에 대한 포함인자  $k$ 를 구하기 위해서 사용되는 유효자유도(effective degree of freedom,  $\nu_{eff}$ )는 아래의 식으로 계산된다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_i \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (29)$$

비오차와 위상각 오차의 반복측정에 의한 표준불확도를 제외한 모든 표준불확도의 자유도는 무한대로서 가정하였다. 따라서 유효자유도( $\nu_{eff}$ )는 4회 반복측정한 불확도  $u_A$ 에 의해 결정된다.  $V_p = 6600 \text{ V}/110 \text{ V}$  의 2차측 전압  $V_s = 110 \text{ V}$  인 경우 비오차와 위상각 오차에 대한 유효자유도의 계산 결과의 예를 들면 아래와 같다.

$$\nu_{eff,r} = \frac{u_c^4}{(u_A^4/3)} = 218 \quad (30)$$

$$\nu_{eff,p} = \frac{u_c^4}{(u_A^4/3)} = 217 \quad (31)$$

비오차와 위상각 오차에 대해 위에서 얻은 유효 자유도의 값은 각각 218 과 217 이다. 이는 신뢰수준 95.45% 에서 포함인자  $k = 2$  에 해당된다. 따라서 확장불확도(expanded uncertainty)는  $U = 2u_c$  이다. 전압 변성기의 6600 V/110 V 단자에서의 비오차와 위상각 오차의 불확도 요인과 불확도 총괄표를 정리하여 각각 표 2 (a) 와 (b)에 나타내었다. 다른 전압범위에서도 불확도 요인 및 분석은 동일한 방법으로 적용하면 된다.

표 2 (a). 전압 변성기의  $V_p/V_s : 6600 \text{ V}/110 \text{ V}$  단자의 영 부담에서의 비오차의 불확도 총괄표

Table 2 (a). Uncertainty budget of ratio error at zero burden in the  $V_p/V_s : 6600 \text{ V}/110 \text{ V}$  tap of potential transformer.

불확도 성분	불확도 (%)	확률분포	포함 인자	표준 불확도(%)	자유도
반복측정 ( $u_{VA}$ )	$6.0 \times 10^{-4}$	정규	$\sqrt{4}$	$3.0 \times 10^{-4}$	4
브리지 직선성에 의한 불확도 ( $u_{B1}$ )	$10.0 \times 10^{-4}$	직사각형	$\sqrt{3}$	$5.8 \times 10^{-4}$	$\infty$
브리지 정확도 사양에 의한 불확도 ( $u_{B2}$ )	$10.0 \times 10^{-4}$	직사각형	$\sqrt{3}$	$5.8 \times 10^{-4}$	$\infty$
용량기 전압계수에 의한 불확도 ( $u_{B3}$ )	$1.4 \times 10^{-4}$	직사각형	$\sqrt{3}$	$0.8 \times 10^{-4}$	$\infty$
브리지 분해능에 의한 불확도 ( $u_{B4}$ )	$0.5 \times 10^{-4}$	직사각형	$\sqrt{3}$	$0.3 \times 10^{-4}$	$\infty$
2차전압 변화에 의한 불확도 ( $u_{B5}$ )	$0.5 \times 10^{-4}$	직사각형	$\sqrt{3}$	$0.3 \times 10^{-4}$	$\infty$
주파수 변화에 의한 불확도 ( $u_{B6}$ )	$0.7 \times 10^{-4}$	직사각형	$\sqrt{3}$	$0.4 \times 10^{-4}$	$\infty$
합성표준 불확도 ( $u_c$ )				0.001	
유효자유도( $\nu_{eff}$ )					218
확장 불확도 ( $U=2u_c$ )				0.002	

표 2 (b). 전압 변성기의  $V_p/V_s$ : 6600 V/110 V 단자의 영 부담에서 위상각 오차의 불확도 총괄표

Table 2 (b). Uncertainty budget of phase angle error error at zero burden in the  $V_p/V_s$ : 6600 V/110 V tap of potential transformer.

불확도 성분	불확도 (crad)	확률분포	포함 인자	표준불확도 (crad)	자유도
반복측정 ( $u_{VA}$ )	$6.0 \times 10^{-4}$	정규	$\sqrt{4}$	$3.0 \times 10^{-4}$	4
브리지 직선성에 의한 불확도 ( $u_{B1}$ )	$10.0 \times 10^{-4}$	직사각형	$\sqrt{3}$	$5.8 \times 10^{-4}$	$\infty$
브리지 정확도 사양에 의한 불확도 ( $u_{B2}$ )	$10.0 \times 10^{-4}$	직사각형	$\sqrt{3}$	$5.8 \times 10^{-4}$	$\infty$
용량기 전압계수에 의한 불확도 ( $u_{B3}$ )	$1.4 \times 10^{-4}$	직사각형	$\sqrt{3}$	$0.8 \times 10^{-4}$	$\infty$
브리지 분해능에 의한 불확도 ( $u_{B4}$ )	$0.5 \times 10^{-4}$	직사각형	$\sqrt{3}$	$0.3 \times 10^{-4}$	$\infty$
2차전압 변화에 의한 불확도 ( $u_{B5}$ )	$0.3 \times 10^{-4}$	직사각형	$\sqrt{3}$	$0.2 \times 10^{-4}$	$\infty$
주파수 변화에 의한 불확도 ( $u_{B6}$ )	$0.7 \times 10^{-4}$	직사각형	$\sqrt{3}$	$0.4 \times 10^{-4}$	$\infty$
합성표준 불확도 ( $u_c$ )				0.001	
유효자유도 ( $\nu_{eff}$ )					217
확장 불확도 ( $U=2u_c$ )				0.002	

4. 측정결과의 유효성 검증

고전압 전기용량기 브리지를 이용한 전압 변성기 측정방법의 유효성을 검증하기 위해 KRISS에서 측정한 동일한 피 측정기기에 대해 동일한 측정조건에서 호주 NMIA에서 측정하였고 양 기관에서의 비오차와 위상각 오차의 측정결과를 각각 표 3 (a) 와 표 3 (b)에 나타내었다. 양 기관에서의 비오차와 위상각 오차의 비교결과를 각각 표 3(a)와 3(b)의

표 3 (a). KRISS와 NMIA 비오차 측정결과의 비교 (0 VA, 60 Hz)

Table 3 (a). Comparison of measurement results of ratio error between KRISS and NMIA(0 VA, 60 Hz)

1차전압/2차전압	2차전압(V)	비오차 (%)		차이 (%) (KRISS-NMIA)
		KRISS	NMIA	
220 V/110 V	30	-0.006	-0.005	-0.001
	110	-0.006	-0.005	-0.001
440 V/110 V	30	-0.003	-0.005	+0.002
	110	-0.004	-0.004	+0.000
550 V/110 V	30	-0.003	-0.005	+0.002
	110	-0.003	-0.004	+0.001
1100 V/110 V	30	+0.003	+0.005	-0.002
	110	+0.009	+0.010	-0.001
2200 V/110 V	30	+0.013	+0.012	+0.001
	110	+0.017	+0.016	+0.001
3300 V/110 V	30	+0.013	+0.013	+0.000
	110	+0.017	+0.016	+0.001
6600 V/110 V	30	+0.010	+0.008	+0.002
	110	+0.014	+0.013	+0.001

마지막 열에 나타내었다. KRISS 와 NMIA의 측정결과의 차이가 비오차의 경우 최대 0.002 %, 위상각 오차의 경우 최대 0.003 crad 이다. KRISS 와 NMIA 의 경우 측정 불확도가 동일하게 비오차와 위상각 오차의 경우 0.002 % 와 0.002 crad 임을 감안하면 두 기관간의 측정결과가 서로의 불확도내에서 일치함을 알 수 있다.

표 3 (b). KRISS와 NMIA 위상각 오차 측정결과의 비교 (0 VA, 60 Hz)

Table 3 (b). Comparison of measurement results of phase angle error between KRISS and NMIA(0 VA, 60 Hz)

1차전압/2차전압	2차전압(V)	위상오차 (crad)		차이 (crad) (KRISS-NMIA)
		KRISS	NMIA	
220 V/110 V	30	+0.001	+0.004	-0.003
	110	+0.002	+0.002	+0.000
440 V/110 V	30	+0.001	+0.003	-0.002
	110	+0.000	+0.001	+0.000
550 V/110 V	30	+0.000	+0.003	-0.003
	110	+0.000	+0.001	-0.001
1100 V/110 V	30	+0.008	+0.006	+0.002
	110	+0.004	+0.003	+0.001
2200 V/110 V	30	+0.001	-0.001	+0.002
	110	-0.001	-0.002	+0.001
3300 V/110 V	30	-0.003	-0.004	+0.001
	110	-0.004	-0.004	+0.000
6600 V/110 V	30	-0.003	-0.004	+0.001
	110	-0.005	-0.004	-0.001

5. 결 론

고전압 표준을 확립하기 위한 상위표준의 핵심장비인 고전압 표준 변성기의 비오차와 위상각 오차를 정밀측정 할 수 있는 방법을 개발하였다. 이는 고전압 전기용량 브리지, 고전압 표준용량기와 저전압 용량기를 사용하는데, 두 전기용량기의 용량비와 손실계수를 측정하여 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 정밀 측정하는 방법으로서 표준 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 절대 측정할 수 있는 방법이다. 오차 측정시 생기는 모든 불확도 요인을 고려함으로써 불확도 평가도 같이 수행하였는데, 불확도는 비오차와 위상각 오차의 경우 각각 0.002 % 와 0.002 crad 이었다. 이는 외국선진 표준기관과 대등한 수준이다.

또한 고전압 전기용량기 브리지를 이용한 전압 변성기 측정방법의 유효성을 검증하기위해 본 연구원에서 측정한 동일한 피측정기기에 대해 동일한 측정조건에서 호주 국가표준기관(NMIA)에서 측정한 결과와 상호비교를 하였는데 서로의 불확도 이내에서 측정값이 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이번에 본 연구에서 구축된 고전압 변성기를 정밀 측정할 수 있는 고전압 전기용량 브리지를 이용하여 충전기 산업체에서 활용하고 있는 고전압 변성기에 양질의 교정 지원을 수행함으로써, 국가표준으로부터 소급성의 연계가 가능하다고 판단된다.

**감사의 글**

본 연구는 산업자원부 전력산업인프라구축지원사업의 “연구시험설비구축사업”의 지원으로 이루어진 것입니다.

**참고 문헌**

- [1] William E. Anderson, "A Calibration Service for Voltage Transformers and High-Voltage Capacitors" NBS Measurement Services Special Publication 50-33, 1988.
- [2] G. Jones, "The Traceable Calibration of Voltage Transformers" NPL Special Publication, 1994.
- [3] N. L. Kusters and O. Petersons, "A Transformer Ratio Arm Bridge for High Voltage Capacitance Measurements" IEEE Trans. Communication and Electronics, vol. 82, pp. 606-611, 1963.
- [4] Eddy So, "A Microprocessor-Controlled High Voltage Current Comparator Based Capacitance Bridge" IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, No. 2, pp. 533-537, 1990.
- [5] Eddy So, Hans-Georg Latzel, "NRC-PTB Intercomparison of Voltage transformer Calibration Systems for High Voltage at 60 Hz, 50 Hz, and 16.66 Hz" IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 50, No. 2, pp. 419-421, 2001.
- [6] W. J. M. Moore, P. N. Miljanic "The current comparator", Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1988.
- [7] 정재갑, 권성원, 김규태, 김명수, "외부부담이 전압변성기의 비오차와 위상각오차에 미치는 영향에 대한 연구" 대한전기학회지, 53C권(3호), pp 137-142, 2004.
- [8] 정재갑, 권성원, 박영태 "전압변성기 비교 측정 장치의 비오차 및 위상 각 오차의 직선성 평가기술", 대한전기학회지, 53C권(9호), pp 470-474, 2004.
- [9] 정재갑, 권성원, 김한준, 박영태, 김명수 "넓은 범위의 비오차를 갖는 전압변성기를 이용한 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차 직선성 평가기술", 대한전기학회지, 54B권(2호). pp 66-70, 2005.

**저자 소개**



**정재갑 (鄭在甲)**

1965년 7월 4일생. 1998년 고려대 물리학과 졸업 박사. 2001년~현재 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹 선임연구원

Tel : 042-868-5152, Fax : 042-868-5018

E-mail : jkjung@kriss.re.kr



**권성원 (權聖遠)**

1952년 1월 19일생. 1974년 한국항공대 전자공학과 1978년~현재 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹 책임연구원

Tel : 042-868-5155, Fax : 042-868-5018

E-mail : swkwon@riss.re.kr



**이상화 (李相和)**

1967년 1월 26일생. 1994년 한밭대 전자공학과, 1986년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 기반표준부 전자기그룹 선임연구원

Tel : 042-868-5151, Fax : 042-868-5018

E-mail : shlee@kriss.re.kr



**김명수 (金明壽)**

1954년 8월 26일생. 1977년 서울공대 화공과 졸업, 1986년 미국 미주리대 (공학박사), 1977년~1982년 국방과학연구소, 1987년~현재 한국표준과학연구원 표준보급부부장

Tel : 042-868-5040, Fax : 042-868-5018

E-mail : mkim@kriss.re.kr