

### 전압변성기 비교기의 위상각 오차 평가

한상길\*, 김운형\*, 정재갑\*\*, 한상옥\*  
 충남대학교\*, 한국표준과학연구원\*\*

### Evaluation for Phase displacement of Voltage Transformer Comparator

Sang-Gil Han\*, Yoon-Hyoung Kim\*, Jae-Kap Jung\*, Sang-Ok Han\*  
 Chungnam University\*, Korea Research Institute of Standards and Science\*\*

**Abstract** - We have developed the calibration technique of the VT comparator using nonreactive standard resistors and a standard capacitor, which evaluates both accuracy and linearity of the VT comparator by comparing experimental values with theoretical values. The specification for phase displacement of VT comparator have been reevaluated.

#### 1. 서 론

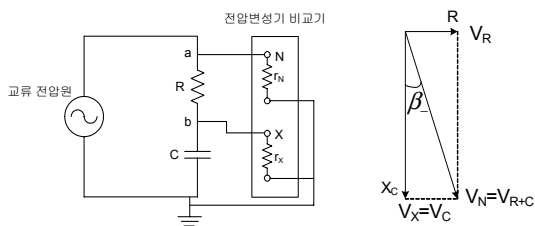
전압변성기는 1차 측 고전압을 2차 측의 낮은 전압으로 바꾸어 주는 변압기의 일종이다. 전압변성기의 2차 측 전압은 전압계, 전력량계, 보호계전기 등과 연결되어 전력 품질 검증 및 전력량 측정에 이용된다<sup>[1]</sup>. 전압변성기의 비오차와 위상각 오차는 1차 측 고전압에 대해 2차 측 전압이 일정한 변환비로서 일치하는지, 변위가 일어나는 지를 나타내는 값으로서 전압변성기의 품질을 결정하는 요소이다. 따라서 전압변성기 생산업체 및 사용 업체에서는 전압변성기의 정확한 평가가 필요하며, 전압변성기 비교기를 이용하여 피측정 전압변성기의 2차 측 전압을 표준 전압변성기의 2차 측 전압과 비교함으로써 피측정 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 평가하고 있다. 따라서 전압변성기 비교기는 피측정 전압변성기 평가에 앞서 정확하게 평가되어야 한다. 전압변성기 비교기의 비오차의 평가는 선행 연구<sup>[2]</sup>를 통하여 평가 기술이 개발되어 활용되고 있지만, 위상각 오차의 평가에 관련된 연구는 전무한 상태이다.

따라서 본 논문에서는 정밀 표준저항기와 표준커패시터를 이용하여 위상각 오차를 의도적으로 조정하여 약 -10 crad ~ +10 crad의 범위에서 전압변성기 비교기의 위상각 오차의 측정값과 이론값을 비교함으로써 넓은 범위의 위상각 오차에 대한 전압변성기 비교기의 정확도와 직선성을 동시에 평가할 수 있는 새로운 기술을 개발하였다.

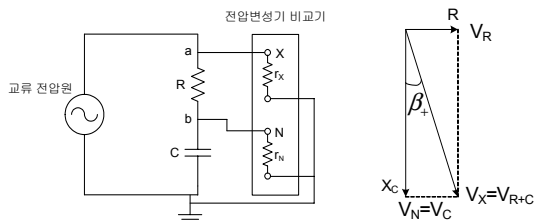
#### 2. 본 론

##### 2.1 전압변성기 비교기의 위상각 오차의 평가 원리

표준저항기와 표준커패시터를 이용하여 전압변성기의 위상각 오차를 평가하기 위한 시스템의 구성도와 벡터도는 그림 1과 같다.



(a) 위상각 오차의 음의 영역에서의 평가 시스템 구성도 및 벡터도



(b) 위상각 오차의 양의 영역에서의 평가 시스템 구성도 및 벡터도

**<그림 1> 전압변성기 비교기의 위상각 오차 평가 시스템의 구성도**

여기서  $V_{R+C} = |V_{R+C}|e^{j\beta_{R+C}}$  : 저항과 커패시터의 양단 전압벡터  
 $V_R = |V_R|e^{j\beta_R}$  : 저항의 양단 전압벡터  
 $V_C = |V_C|e^{j\beta_C}$  : 커패시터의 양단 전압벡터

그림 1과 같이 표준저항기(R)와 표준커패시터(C)를 직렬로 연결하고, 그림 1(a)의 구성도와 같이 전압변성기 비교기의 N과 X 단자를 a와 b에 연결한다. 이때 전압변성기 비교기에서 측정되는 위상각 오차( $\beta_-$ )는 그림 1(a)의 벡터도와 같이 표준커패시터 양단 전압의 위상( $\beta_C$ )과 표준저항기와 표준커패시터 양단 전압의 위상( $\beta_{R+C}$ )의 차이로 나타낼 수 있으며 식 (1)과 같다<sup>[3]</sup>.

$$\beta_- = \beta_C - \beta_{R+C} \cong -\frac{R}{X_C} = -\omega CR \quad (1)$$

한편 그림 1(a)의 구성도와는 반대로 그림 1 (b)의 구성도에서는 전압변성기 비교기의 N과 X 단자를 b와 a에 연결한다. 이때 전압변성기 비교기에서 측정되는 위상각 오차( $\beta_+$ )는 그림 1(b)의 벡터도와 같이 표준저항기와 표준커패시터 양단 전압의 위상( $\beta_{R+C}$ )과 표준커패시터 양단 전압의 위상( $\beta_C$ )의 차이로 나타낼 수 있으며 식 (2)와 같다.

$$\beta_+ = \beta_{R+C} - \beta_C \cong \frac{R}{X_C} = \omega CR \quad (2)$$

따라서 식 (1)과 식 (2)를 이용하면 표준커패시터(C)의 값을 고정시키고, 표준저항기(R)의 값을 임의 조정하여 이론값을 얻을 수 있고, 이 값을 실험값과 비교함으로써 음의 영역과 양의 영역에서 전압변성기 비교기의 위상각 오차를 평가할 수 있다.

##### 2.2 전압변성기 비교기의 위상각 오차의 평가 결과

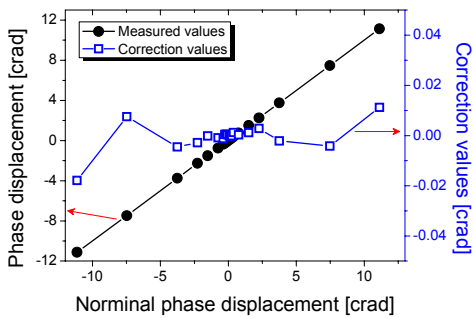
평가에 사용된 전압변성기 비교기는 tettecs사의 비교기를 사용하였고, 분해능은 측정범위에 따라 0.0001% ~ 0.01%이다. 표준저항기는 위상각 오차가 0.01% 이하 즉  $\frac{X_b}{R_b} \leq 10^{-4}$ 인 Vishay사의 저항을 사용하였고<sup>[4]</sup>, 표준커패시터(C)는 러시아 IMM사의 정격값이 2 uF인 ceramic 커패시터를 사용하였다. R의 크기를 1 Ω ~ 150 Ω 까지의 범위에서 임의로 선정하여 그림 1(a)와 같이 연결하여 측정하였고, 그림 1(b)와 같이 X, N 단자의 연결을 바꾸어 동일하게 측정하였다. 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 계산한 위상각 오차의 이론값은 -11.1345 crad ~ 11.1345 crad이며, 표 1의 세 번째 열에 나타내었다. 2차 전압 30 V, 80 V, 110 V의 전압에서 각각 위상각 오차를 3회 반복 측정하였고, 대표적으로 80 V에서 측정된 값의 평균값을 표 1의 네 번째 열에 나타내었다. 또한 이론값과 측정값의 차이를 표 1의 다섯 번째 열에 나타내었으며, 식 (3)과 같이 측정값의 상대오차를 구하여 표 1의 여섯 번째 열에 나타내었다.

$$\text{측정값의 상대오차} = \frac{\text{측정값} - \text{이론값}}{\text{이론값}} \times 100[\%] \quad (3)$$

표 1과 같이 위상각 오차의 측정값은 -11.1167 crad ~ 11.1233 crad 이었고, 이론값과의 차이는 ±1 crad 이하에서는 -0.0012 crad ~ 0.0012 crad, ±1 crad 이상에서는 -0.0179 crad ~ 0.0112 crad 이었다. 측정값의 상대오차의 값은 ±1 crad 이하에서는 -0.315% ~ 0.384%, ±1 crad 이상에서는 -0.161% ~ 0.101% 이었다. 그림 2는 80 V에서 표준저항기와 표준커패시터를 이용하여 얻은 전압변성기 비교기의 위상각 오차의 이론값에 대한 측정값과 보정값을 나타낸 것이다.

〈표 1〉 80 V에서 측정된 위상각 오차의 측정값, 이론값, 보정값, 상대오차

연결법	R (Ω)	이론값(가) (crad)	측정값(나) (crad)	보정값(가-나) (crad)	상대오차 (%)
그림 2.(a)	150	-11.1345	-11.1167	-0.0179	-0.161
	100	-7.4691	-7.4767	0.0075	0.101
	50	-3.7546	-3.7500	-0.0046	-0.121
	30	-2.2629	-2.2600	-0.0029	-0.127
	20	-1.5065	-1.5063	-0.0001	-0.009
	10	-0.7542	-0.7533	-0.0009	-0.121
	5	-0.3782	-0.3770	-0.0012	-0.315
	3.3	-0.2519	-0.2523	0.0004	0.175
	2	-0.1521	-0.1526	0.0006	0.366
	1	-0.0763	-0.0766	0.0003	0.384
그림 2.(b)	1	0.0763	0.0764	-0.0001	0.079
	2	0.1521	0.1525	-0.0004	0.256
	3.3	0.2519	0.2520	-0.0001	0.043
	5	0.3782	0.3770	0.0012	-0.315
	10	0.7542	0.7540	0.0002	-0.032
	20	1.5065	1.5053	0.0011	-0.076
	30	2.2629	2.2600	0.0029	-0.127
50	3.7546	3.7567	-0.0021	0.056	
100	7.4691	7.4733	-0.0042	0.056	
150	11.1345	11.1233	0.0112	-0.101	



〈그림 2〉 80 V에서 측정된 위상각 오차의 이론값에 대한 측정값과 보정값

표 2의 두 번째 열에서 보인 바와 같이 제조사에서 제공하는 전압변성기 비교기의 위상각 오차의 사양은  $\pm 1$  crad 미만에서는  $\pm 0.0050$  crad 이하의 절대값을,  $\pm 1$  crad 이상의 범위에서는 측정값의 상대오차인  $\pm 0.50$  % 이하의 상대값을 제공한다. 본 연구에서 전압변성기 비교기의 사양을 재평가 한 결과 표 1과 같이  $\pm 1$  % 미만에서는  $\pm 0.0012$  crad 이하의 절대값을,  $\pm 1$  % 이상의 범위에서는 측정값의 상대오차인  $\pm 0.16$  % 이하의 상대값을 가진 것으로 평가되었다. 이와 같이 제조사에서 제공하는 사양은 실제 전압변성기 비교기의 사양에 비해 넓은 범위를 제공하기 때문에 본 기술을 이용하여 표 2와 같이 각각의 전압에서 전압변성기 비교기의 사양을 재평가하였다.

〈표 2〉 전압변성기 비교기의 위상각 오차의 사양 평가의 비교

범위 (crad)	전압변성기 비교기의 사양			
	제조사	본 연구		
		30 V	80 V	110 V
$< \pm 1$	$\leq \pm 0.0050$ crad	$\leq \pm 0.0009$ crad	$\leq \pm 0.0015$ crad	$\leq \pm 0.0009$ crad
$\geq \pm 1$	$\leq \text{rdg} \times (\pm 0.50\%)$	$\leq \text{rdg} \times (\pm 0.30\%)$	$\leq \text{rdg} \times (\pm 0.26\%)$	$\leq \text{rdg} \times (\pm 0.25\%)$

2.3 전압변성기 비교기의 위상각 오차의 불확도 분석

표준저항기와 표준커패시터를 이용한 전압변성기 비교기의 위상각 오차 측정의 불확도 요인은 A형 표준불확도인 반복측정에 의한 표준불확도( $u_A$ )와 표준저항 측정에 의한 표준불확도( $u_{B1}$ ), 표준커패시터 측정에 의한 표준불확도( $u_{B2}$ ), 전압변성기 비교기의 분해능에 의한 표준불확도( $u_{B3}$ )를 고려하였다. 반복측정에 의한 표준 불확도( $u_A$ )는 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_i (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n(n-1)}} \tag{3}$$

여기서  $\delta_i$ 는 각각의 측정값이고,  $\bar{\delta}$ 는 측정값의 평균값이며  $n$ 은 측정 횟수이다. 각각의 요인이 서로 독립적이고, 감도계수가 1이며 포함인자가 2라 하면 확장불확도는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2} \tag{4}$$

상대 확장불확도( $U_R$ )는 식 (5)와 같이 측정값에 대한 확장불확도의 비로서 나타낼 수 있다.

$$U_R = \frac{U}{\text{Measured value}} \times 100 [\%] \tag{5}$$

대표적으로 전압 80 V에서 측정된 표준저항기와 표준커패시터를 이용한 전압변성기 비교기의 위상각 오차의 불확도 요인을 정리하여 표 3에 나타내었다.

〈표 3〉 전압변성기 비교기의 위상각 오차의 측정값의 불확도 총괄표

(단위 : crad)

이론값	$u_A$	$u_{B1}$	$u_{B2}$	$u_{B3}$	합성 표준불확도	확장불확도 (U)	상대 확장불확도 ( $U_R$ ) (%)
-11.1808	0.0033	0.0011	0.0011	0.0029	0.0047	0.0094	0.0842
-7.4830	0.0067	0.0007	0.0007	0.0029	0.0073	0.0147	0.1964
-3.7563	0.0000	0.0004	0.0004	0.0029	0.0029	0.0059	0.1565
-2.2632	0.0000	0.0002	0.0002	0.0029	0.0029	0.0058	0.2570
-1.5066	0.0003	0.0002	0.0002	0.0003	0.0005	0.0010	0.0650
-0.7543	0.0007	0.0001	0.0001	0.0003	0.0007	0.0015	0.1949
-0.3782	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0003	0.0006	0.1557
-0.2519	0.0003	0.0000	0.0000	0.0003	0.0004	0.0009	0.3506
-0.1521	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.1644
-0.0763	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.1917
0.0763	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.2739
0.1521	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0644
0.2519	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0003	0.0006	0.2308
0.3782	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0003	0.0006	0.1557
0.7543	0.0000	0.0001	0.0001	0.0003	0.0003	0.0006	0.0816
1.5066	0.0009	0.0002	0.0002	0.0003	0.0010	0.0019	0.1265
2.2632	0.0000	0.0002	0.0002	0.0029	0.0029	0.0058	0.2570
3.7563	0.0033	0.0004	0.0004	0.0029	0.0044	0.0089	0.2365
7.4830	0.0067	0.0007	0.0007	0.0029	0.0073	0.0147	0.1965
11.1808	0.0033	0.0011	0.0011	0.0029	0.0047	0.0094	0.0842

3. 결 론

본 연구에서는 표준저항기와 표준커패시터를 이용하여 전압변성기 비교기의 위상각 오차의 정확도와 직선성을 동시에 평가할 수 있는 새로운 기술을 개발하였다. 본 기술을 이용하여 전압변성기 비교기를 평가한 결과 이론값과 측정값은 선형성을 나타내었고, 약  $\pm 10$  crad 정도의 범위에서 이론값과 측정값의 차이는  $-0.0212$  crad ~  $0.0112$  crad 이었다. 또한 본 기술을 이용하여 전압변성기 비교기의 사양을 재평가한 결과  $\pm 1$  crad 미만에서는 약  $\pm 0.0015$  crad 이하의 절대값을,  $\pm 1$  crad 이상의 범위에서는 측정값의 약  $\pm 0.27$  % 이하의 상대값을 나타내었다.

본 기술을 통하여 평가된 전압변성기 비교기의 사양은 제조사에서 제공하는 사양보다 우수하며, 본 기술을 이용하여 표준기관 및 교정기관, 산업체 현장의 전압변성기 비교기의 정확도를 정밀하게 평가 가능할 것으로 판단된다. 또한 본 기술은 산업체 현장에서의 적용 및 상시 평가가 가능하여 시간 및 비용 절감에서 큰 효과가 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 권성원, 김문석, 정재갑, 이성하, 김명수, “전압변성기용 부담특성 정밀분석용 자동평가시스템의 개발”, 대한전기학회지, vol 54C, No. 10, pp. 457-464, 2005.
- [2] 정재갑, 권성원, 김한준, 박영태, 김명수, “넓은 범위의 비오차를 갖는 전압변성기를 이용한 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차 직선성 평가기술”, 대한전기학회지, vol 54B, No. 2, pp. 66-70, 2004.
- [3] 한국계량측정협회, “전압변성기의 표준교정절차”, KASTO 06, 2006.
- [4] www.vishay.com