

표준저항기를 이용한 전압변성기 비교기의 비오차 평가

論 文

57P-4-12

Evaluation for Ratio Error of Voltage Transformer Comparator using Standard Resistors

韓 相 吉* · 金 潤 亨* · 鄭 在 甲[†] · 韓 相 玉**

(Sang-Gil Han · Yoon-Hyoung Kim · Jae-Kap Jung · Sang-Ok Han)

Abstract - We have developed the calibration technique of the VT comparator using nonreactive standard resistors, which evaluates both accuracy and linearity of the VT comparator by comparing experimental values with theoretical values. The correction values of VT comparator obtained by using both our method and wide ratio error VT are consistent within the expanded uncertainty. Furthermore the specification for ratio error of VT comparator have been reevaluated.

Key Words : Voltage Transformer Comparator, Ratio Error, WRE VT

1. 서 론

전압변성기는 고전압을 안전하고 정밀하게 측정하기 위하여 고전압을 낮은 전압으로 바꾸어 주는 기기이다. 전압변성기의 2차 측 전압에는 전압계와 전력량계 등의 측정기와 보호계전기 등이 연결되어 전력품질 검증 및 전력량 측정 등에 사용됨으로 전압변성기의 2차 측 전압은 1차 측 전압과 정확한 변환비로 일치하여야 하며, 위상의 변위 또한 없어야 한다^[1]. 하지만 전압변성기는 1차 측과 2차 측의 누설 임피던스와 권선저항에 의한 전압강하, 자화전류와 철손 등에 의해 오차가 발생한다^[2-3]. 전압변성기는 이러한 오차의 크기에 따라 0.1 급 ~ 3 급 까지 총 5개 등급으로 나누고 있으며, 등급에 따라 허용되는 비오차는 $\pm 0.1\%$ ~ $\pm 3\%$ 이다^[4]. 이러한 전압변성기의 비오차의 정확한 측정을 위하여 전압변성기 비교기가 사용되고 있으며, 전압변성기 비교기는 피측정 전압변성기의 2차 측 전압을 표준 전압변성기의 2차 측 전압과 비교하여 피측정 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 측정하는 기기이다. 전압변성기 비교기는 $\pm 3\%$ 까지 뿐만 아니라 그 이상까지도 정확한 측정이 요구되지만, $\pm 0.2\%$ 이내의 작은 범위의 오차를 갖는 피측정 전압변성기의 비오차는 정확하게 측정할 수 있는데 반해, $\pm 0.2\%$ 이상의 큰 범위 오차에서는 비오차 측정의 눈금이 약간 벗어나 있는 경우가 있다^[5]. 따라서 넓은 범위의 오차에 대

하여 전압변성기 비교기가 직선성을 갖고 있는지를 평가하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 위상오차를 무시할 수 있는 정밀 표준저항기를 이용하여 비오차를 의도적으로 조정하여 약 -10% ~ $+10\%$ 정도의 범위에서 전압변성기 비교기의 측정값과 이론값을 비교함으로써 넓은 범위의 비오차에 대한 전압변성기 비교기의 정확도와 직선성을 동시에 평가할 수 있는 새로운 기술을 개발하였다. 또한 광범위 비오차 전압변성기를 이용한 전압변성기 비교기의 직선성 평가기술^[5]과의 비교를 통하여 본 기술의 유효성을 검증하였으며, 제조사에서 제공하는 전압변성기의 사양과의 비교를 통하여 성능을 재평가 하였다.

2. 전압변성기 비교기의 비오차의 평가 원리

전압변성기 비교기는 두 전압변성기의 2차 측 전압의 크기와 위상을 비교하여 피측정 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 측정하는 기기이다. 표준저항기를 이용하여 전압변성기의 비오차의 직선성을 평가하기 위한 시스템의 구성도는 그림 1과 같다.

여기서 a 점의 전압 V_a 의 크기는 교류 전압원의 전압값과 같고, b점의 전압 V_b 의 크기는 전압분배법칙에 의해 식 (1)과 같다.

$$V_b = \left(\frac{R_T}{R_1 + R_T} \right) V_a = NV_a \quad (1)$$

여기서 R_T 는 표준저항 R_2 와 전압변성기 비교기의 내부저항 r 과의 병렬합성저항이고, N 은 분압비이다.

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國標準科學研究院 責任研究員 · 理博

E-mail: jkjung@kriss.re.kr

* 學生會員 : 忠南大學校 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 忠南大學校 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 6月 9日

最終完了 : 2008年 8月 12日

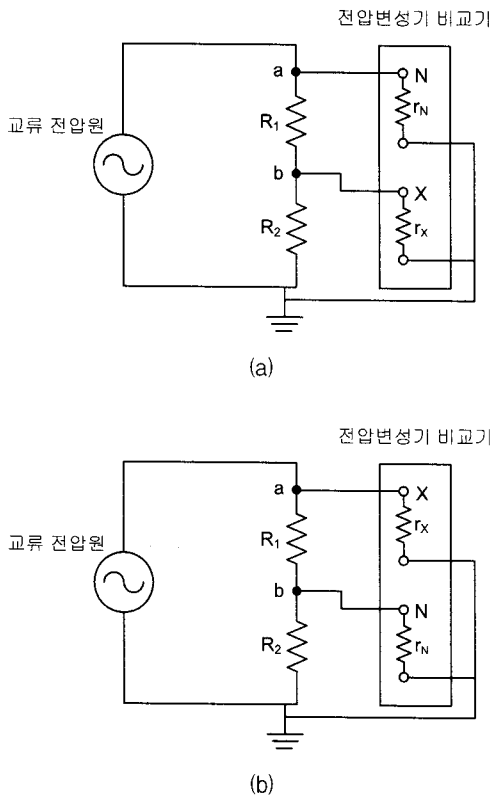


그림 1 전압변성기 비교기의 비오차 평가 시스템의 구성도
 Fig. 1 Configuration diagram on evaluation system of ratio error of VT comparator

그림 1(a)에서 a와 b는 각각 전압변성기 비교기의 N과 X 단자에 연결됨으로, 식 (1)에서 $V_X = NV_N$ 으로 쓸 수 있다. 이때 전압변성기 비교기에서 측정되는 비오차(α_-)는 식 (2)와 같다^[4].

$$\alpha_- = \frac{V_X - V_N}{V_N} \times 100 = (N-1) \times 100 = -\left(\frac{R_1}{R_1 + R_T}\right) \times 100[\%] \quad (2)$$

여기서 α_- 는 비오차의 범위가 음의 영역에 해당하고, $R_T = \frac{R_2 r_X}{R_2 + r_X}$ 이다.

한편 그림 1(b)에서 a와 b는 각각 전압변성기 비교기의 X와 N 단자에 연결됨으로 식 (1)에서 $V_N = NV_X$ 으로 쓸 수 있다. 이때 전압변성기 비교기에서 측정되는 비오차(α_+)는 식 (3)과 같다.

$$\alpha_+ = \frac{V_X - V_N}{V_N} \times 100 = \left(\frac{1-N}{N}\right) \times 100 = \frac{R_1}{R_T} \times 100[\%] \quad (3)$$

여기서 α_+ 는 비오차의 범위가 양의 영역에 해당하고, $R_T = \frac{R_2 r_N}{R_2 + r_N}$ 이다.

따라서 식 (2)와 식 (3)을 이용하면 R_1 의 값을 임의의 조정하여 이론값을 얻을 수 있고, 이 값을 실험값과 비교함으로써

음의 영역과 양의 영역에서 전압변성기 비교기의 비오차를 평가할 수 있다.

3. 전압변성기 비교기의 비오차의 평가 결과

평가에 사용된 전압변성기 비교기는 tettex사의 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 Vishay 사의 저항을 사용하였다^[6]. R_2 의 크기를 2 k Ω 으로 고정시키고, R_1 의 크기를 1 Ω ~ 200 Ω 까지의 범위에서 임의로 선정하여 그림 1 (a)과 같이 연결하여 측정하였고, 그림 1 (b)와 같이 연결을 바꾸어 동일한 방법으로 측정하였다. R_2 와 전압변성기 비교기의 내부저항(r)과의 병렬합성저항의 크기는 1732 Ω 이며 표 1의 첫 번째 열에 나타내었다. 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 계산한 비오차의 이론값은 -10.3491 % ~ +11.5438 %이며, 표 1의 네 번째 열에 나타내었다. 실제 전압변성기의 평가는 2차 전압 110 V의 27 %, 72 %, 100 %에서 이루어짐으로 30 V, 80 V, 110 V의 전압에서 각각 비오차를 3회 반복 측정하였고, 대표적으로 80 V에서 측정된 값의 평균값을 표 1의 다섯 번째 열에 나타내었다. 또한 이론값과 측정값의 차이를 표 1의 여섯 번째 열에 나타내었으며, 식 (4)와 같이 측정값의 상대오차를 구하여 표 1의 일곱 번째 열에 나타내었다.

$$\text{측정값의 상대오차} = \frac{\text{측정값} - \text{이론값}}{\text{이론값}} \times 100[\%] \quad (4)$$

표 1(a) 80 V에서 비오차의 측정값, 이론값, 보정값, 상대 오차(± 1)

Table 1(a) Measured value, theoretical value, correction value and relative error for ratio error at 80 V(± 1)

합성저항 $R_T(\Omega)$	연결법	$R_1(\Omega)$	이론값 (가) (%)	측정값 (나) (%)	보정값 (가-나) (%)	상대 오차 (%)
1732	그림 1.(a)	10	-0.5741	-0.5740	-0.0001	-0.023
		5	-0.2884	-0.2880	-0.0004	-0.135
		3.3	-0.1921	-0.1920	-0.0001	-0.038
		2	-0.1159	-0.1160	0.0002	0.145
		1	-0.0580	-0.0580	0.0000	0.045
	그림 1.(b)	1	0.0580	0.0584	-0.0003	0.562
		2	0.1160	0.1165	-0.0006	0.489
		3.3	0.1925	0.1930	-0.0005	0.272
		5	0.2892	0.2890	-0.0004	0.153
		10	0.5774	0.5790	-0.0012	0.212

표 1(b) 80 V에서 비오차의 측정값, 이론값, 보정값, 상대 오차(≥±1)

Table 1(b) Measured value, theoretical value, correction value and relative error for ratio error at 80 V(≥±1)

합성저항 $R_T(\Omega)$	연결법	R_1 (Ω)	이론값 (가) (%)	측정값 (나) (%)	보정값 (가-나) (%)	상대 오차 (%)
1732	그림 1.(a)	200	-10.3491	-10.3433	-0.0058	-0.056
		100	-5.4573	-5.4600	0.0027	0.050
		50	-2.8053	-2.8100	0.0047	0.168
		30	-1.7066	-1.7030	-0.0036	-0.209
		20	-1.1415	-1.1420	0.0005	0.042
	그림 1.(b)	20	1.1547	1.1550	-0.0003	0.025
		30	1.7362	1.7337	0.0025	-0.145
		50	2.8863	2.8900	-0.0037	0.130
		100	5.7723	5.7733	-0.0011	0.018
		200	11.5438	11.5467	-0.0028	0.025

표 1과 같이 비오차의 측정값은 -10.3433 % ~ 11.5467 % 이었고, 이론값과의 차이는 ±1 % 이하에서는 -0.0012 % ~ 0.0002 %, ±1 % 이상에서는 -0.0058 % ~ 0.0047 % 이었다. 측정값의 상대오차의 값은 ±1 % 이하에서는 -0.135 % ~ 0.562 %, ±1 % 이상에서는 -0.209 % ~ 0.168 % 이었다.

그림 2는 80 V에서 표준저항기를 이용하여 얻은 전압변성기 비교기의 비오차의 이론값에 대한 측정값과 보정값을 나타낸 것이다.

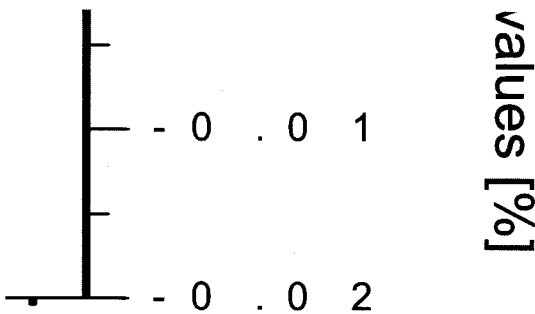


그림 2 80 V에서 비오차의 이론값에 대한 측정값과 보정값
Fig. 2 Measured value and correction value as a function of theoretical value for ratio error at 80 V.

표 2의 두 번째 열에서 보인 바와 같이 제조사에서 제공하는 전압변성기 비교기의 비오차의 사양은 ±1 % 미만에서는 ±0.0050 % 이하의 절대값을, ±1 % 이상의 범위에서는 측정값의 상대오차인 ±0.50 % 이하의 상대값을 제공한다. 본 연구에서 전압변성기 비교기의 사양을 재평가 한 결과 표 1과 같이 ±1 % 미만에서는 ±0.0012 % 이하의 절대값을, ±1 % 이상의 범위에서는 측정값의 상대오차인 ±0.21 % 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 비오차의 사양 평가의 비교
Table 2 A comparison for specification evaluation of ratio error of VT comparator

범위 (%)	전압변성기 비교기의 사양			
	제조사	본 연구		
		30 V	80 V	110 V
<±1	≤ ±0.0050%	≤ ±0.0005%	≤ ±0.0012%	≤ ±0.0011 %
≥±1	≤rdg×(±0.50%)	≤rdg×(±0.14%)	≤rdg×(±0.21%)	≤rdg×(±0.17%)

4. 불확도 분석 및 유효성 검증

4.1 전압변성기 비교기의 비오차 평가의 불확도 분석

표준저항기를 이용한 전압변성기 비교기의 비오차 측정의 불확도 요인은 A형 표준불확도인 반복측정에 의한 표준불확도(u_A)와 표준저항 측정에 의한 표준불확도(u_{B1}), 전압변성기 비교기의 내부저항 측정에 의한 표준불확도(u_{B2}), 전압변성기 비교기의 분해능에 의한 표준불확도(u_{B3})를 고려하였다. 반복측정에 의한 표준 불확도(u_A)는 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다^[7].

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_i (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

여기서 δ_i 는 각각의 측정값이고, $\bar{\delta}$ 는 측정값의 평균값이며 n 은 측정 횟수이다.

각각의 요인이 서로 독립적이고, 감도계수가 1이며 포함 인자가 2라 하면 확장불확도는 식 (6)와 같이 포함인자와 각 요인별 불확도의 root sum of squares(RSS)의 곱으로 나타낼 수 있다^[7].

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2} \quad (6)$$

상대 확장불확도(U_R)는 식 (7)과 같이 측정값에 대한 확장불확도의 비로서 나타낼 수 있다.

$$U_R = \frac{U}{\text{Measured value}} \times 100 [\%] \quad (7)$$

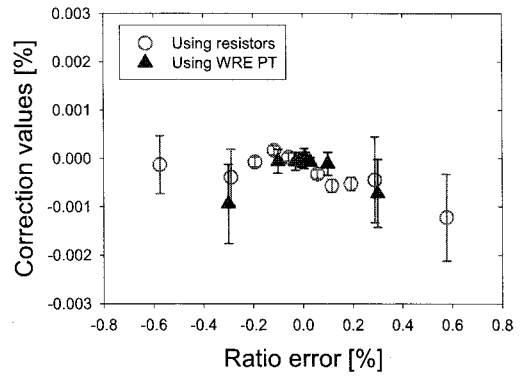
대표적으로 전압 80 V에서 측정된 표준저항기를 이용한 전압변성기 비교기의 비오차 평가기술의 불확도 요인을 정리하여 표 3에 나타내었으며, 합성 표준불확도와 확장불확도는 마지막 두 열에 나타내었다.

표 3 80 V에서 비오차의 측정값의 불확도 총괄표
Table 3 Uncertainty budget of measured values for ratio error at 80V
(단위 : %)

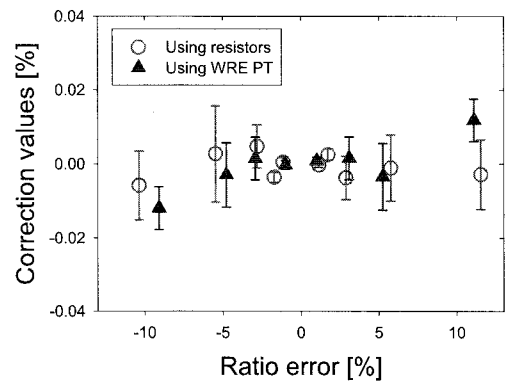
이론값	u_A	u_{B1}	u_{B2}	u_{B3}	U	U_R
-10.3491	0.0033	0.0010	0.0010	0.0029	0.0093	0.0898
-5.4573	0.0058	0.0005	0.0005	0.0029	0.0130	0.2381
-2.8053	0.0000	0.0003	0.0003	0.0029	0.0058	0.2074
-1.7066	0.0006	0.0002	0.0002	0.0003	0.0014	0.0809
-1.1415	0.0006	0.0001	0.0001	0.0003	0.0013	0.1165
-0.5741	0.0000	0.0001	0.0001	0.0003	0.0006	0.1045
-0.2884	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0006	0.2025
-0.1921	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0539
-0.1159	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0811
-0.0580	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.1546
0.0580	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.1537
0.1160	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.1143
0.1925	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0726
0.2892	0.0003	0.0000	0.0000	0.0003	0.0009	0.3058
0.5774	0.0003	0.0001	0.0001	0.0003	0.0009	0.1550
1.1547	0.0000	0.0001	0.0001	0.0003	0.0007	0.0574
1.7362	0.0007	0.0002	0.0002	0.0003	0.0015	0.0885
2.8863	0.0000	0.0003	0.0003	0.0029	0.0058	0.2018
5.7723	0.0033	0.0006	0.0006	0.0029	0.0090	0.1554
11.5438	0.0033	0.0012	0.0012	0.0029	0.0094	0.0814

4.2. 평가기술의 유효성 검증

표준저항기를 이용한 전압변성기 비교기의 비오차 평가기술의 유효성을 검증하기 위해 참고문헌[5]에서 개발한 WRE VT(wide ratio error VT)를 이용하여 피측정 전압변성기 비교기의 비오차를 평가하여 비교하였다. 그림 3 (a)와 그림 3 (b)와 같이 ±1 % 미만과 ±1 % 이상에서 두 방법의 보정값이 서로의 불확도 내에서 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 기술은 산업체 및 교정기관의 전압변성기 비교기의 평가 기술로서 활용 가능할 것으로 판단된다.



(a) ±1 % 미만



(b) ±1 % 이상

그림 3 표준저항기와 WRE VT를 이용하여 측정된 전압변성기 비교기의 비오차의 보정값 비교

Fig. 3 Comparison of correction values of ratio error of VT comparator measured by using both standard resistors and WRE VT

5. 결 론

본 연구에서는 표준저항기를 이용하여 전압변성기 비교기의 비오차의 정확도와 직선성을 동시에 평가할 수 있는 기술을 개발하였고, 참고문헌[5]의 WRE VT를 이용한 평가 방법과 비교를 통하여 유효성을 검증하였다. 두 방법을 이용하여 동일한 전압변성기 비교기를 평가한 결과 표준저항기와 WRE VT를 이용한 두 방법의 보정값은 서로의 불확도 내에서 일치하였다. 또한 본 기술을 이용하여 전압변성기 비교기의 사양을 재평가한 결과 ±1 % 이내에서는 약 ±0.0012 % 이하의 절대값을, ±1 % 이상에서는 측정값의 상대오차가 약 ±0.21 % 이하의 상대값을 가짐을 알 수 있었다.

본 기술을 통하여 평가된 전압변성기 비교기의 사양은 제조사에서 제공하는 사양보다 우수하며, 본 기술을 이용하여 표준기관 및 교정기관, 산업체 현장의 전압변성기 비교기의 사양을 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] J. L. Settles, W. R. Farber, and E. E Connor, "The analytical and graphical determination of complete potential transformer characteristics" IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, 79, No. 51, pp.1213-1218, 1961.
- [3] P. G. Agnew, F. B. Slisbee, "Accuracy of The Formulas for The Ratio Regulation And Phase Angle of Transformer", National Bureau of Standards, Washington, D. C., vol. 10, no. 2, pp. 279-93. 1914.
- [4] 계기용변성기, KSC 1706.
- [5] 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.
- [6] www.vishay.com
- [7] 한국계량측정협회, “전압변성기의 표준교정절차”, KASTO 06, 2006.

저 자 소 개



한 상 길 (韓 相 吉)

1981년 11월 23일생. 2007년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

Tel : 042-821-7604

Fax : 042-821-8895

E-mail : sanggilhan@cnu.ac.kr



김 윤 형 (金 潤 亨)

1981년 10월 15일생. 2007년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

Tel : 042-821-7604

Fax : 042-821-8895

E-mail : yoonhyoung@cnu.ac.kr



정 재 갑 (鄭 在 甲)

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

Tel : 042-868-5759

Fax : 042-868-5018

E-mail : jkjung@kriss.re.kr



한 상 옥 (韓 相 玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기)졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수. 1989년 일본 나고야대 객원교수. 현 충남대학교 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5655

Fax : 042-821-8895

E-mail : sohan@cnu.ac.kr