

Development of The Accurate Potential Transformer with Wide Ratio Error and Its Application

權 聖 遠[†] · 鄭 在 甲^{*} · 李 相 和^{**} · 金 明 壽^{***}
 (Sung-Won Kwon · Jae-Kap Jung · Sang-Hwa Lee · Myungsoo Kim)

Abstract - A accurate potential transformer(PT) with the nominal ratio errors in the wide range of - 9 % to + 11 % has been developed. The developed wide ratio error PT can be used to evaluate the linearity of the PT comparator by comparing both the theoretical values as standard values and experimental values of the PT. The new method has been successfully applied for calibration and correction in the PT comparator including very low ratio error values from ± 0.005 % to ± 0.3 % belonging to industry.

Key Words : Potential Transformer(PT), Wide Ratio Error PT, PT Comparator, Linearity, Correction

1. 서 론

전압변성기(potential transformer, PT)는 수 백 V ~ 수 백 kV의 고전압을 안전하고 정밀측정하기 쉬운 낮은 전압으로 변환하기 위하여 사용되는 변압기의 일종이다. PT의 1차측의 고전압에 비례하는 2차측의 전압 측정값에 PT의 변환비를 곱하면 1차측의 고전압을 계산할 수 있으며, PT의 2차측 교류전압, 즉 110 V에 대한 측정정확도가 고전압 측정의 정확도를 결정짓는 한 요인이다. 또한 고전압을 정확하게 측정하기 위해서는 PT의 1차측 전압에 대한 2차측 전압의 변환비의 비오차를 정확하게 측정하는 것이 필요한 조건이다. 1000 V 이하의 교류전압은 열전형 전압변환기(thermal voltage converter)를 활용하여, 해당 교류전압과 열적 효과가 동등한 직류전압 값을 해당 교류전압의 실효치로 부여하는 방식으로 표준소급체계를 구축하였으며, 40 Hz ~ 1 MHz의 주파수 범위에서 약 (3 ~ 50) x 10⁻⁵ 이하의 불확도로 측정할 수 있다.^[1, 2]

전압변성기(potential transformer, PT)를 생산하는 산업체나 교정시험기관에서는 PT의 특성을 평가 또는 교정시험하기 위하여 전압변성기 비오차 측정시스템(이하 PT comparator)을 사용한다. 이 측정시스템을 이용하여 PT의 비오차

(ratio error)와 위상각 오차(phase angle error)를 측정한다.^[3] 실용되고 있는 PT는 오차의 등급에 따라 0.1 급 ~ 3.0 급의 총 5개 등급으로 나누고 있으며, 등급에 따라 허용되는 비오차는 각각 ± 0.1 % ~ ± 3 % 이하로 규정하고 있다.^[4] 따라서 PT comparator는 ± 3 % 범위까지 PT의 비오차를 정확하게 측정할 수 있어야 하며, 상용의 PT comparator는 ± 20 % 까지의 비오차도 측정할 수 있도록 제작되어 있다. 또한 PT의 성능을 평가하기 위한 PT comparator의 측정 분해능은 모델 및 용도에 따라 0.01 % ~ 0.0001 % 범위에 있다. 따라서 PT comparator의 비오차 전 범위에 대한 정확도를 평가하는 것은 PT의 품질관리 및 교정시험분야에서 대단히 중요하다. 이를 해결하기 위하여 명목 비오차 0 %, ± 0.5 %, ± 1 %, ± 3 % 를 갖는 넓은 비오차를 갖는 전압변성기를 제작 활용하였으나,^[5] PT comparator에서 활용빈도가 높은 ± 0.5% 이하에 대한 비오차 측정정확도를 정밀하게 평가하기에는 한계가 있다.

본 논문은 분해능이 0.001 % 이상인 표준급 PT comparator의 비오차를 정확히 평가하기 위하여, 1차측의 권선수를 의도적으로 조정하여 - 9 % 및 + 11 % 까지 넓은 범위의 명목 비오차를 갖도록 설계 제작한 전압변성기(wide ratio error PT, 이하 WRE PT)를 이용하여 PT comparator의 비오차 눈금의 직선성을 평가하기 위한 측정기술에 관한 것이다. 개발된 WRE PT는 1차측 전압이 13200 V, 2차측 전압이 110 V로써 정격변환비가 120이며, 이 때의 비오차를 0(零)이 되도록 설계하였으며, 특히 PT comparator에서 사용빈도가 가장 높은 ± 0.005 % ~ ± 0.3 % 의 비오차 범위에 대한 정확도를 상세히 평가하기 위하여 11 개의 비오차 표준값을 갖도록 제작하였다. PT comparator의 비오차는 WRE PT의 권선비에 의한 비오차 측정값과 이론적인 계산값, 즉 표준값 사이의 일치도를 분석

† 교신저자, 正會員 : 韓國標準科學研究院 基盤標準部, 電磁氣 그룹 責任研究員

E-mail : swkwon@kriss.re.kr

* 正會員 : 韓國標準科學研究院 基盤標準部 電磁氣 그룹 責任研究員

** 正會員 : 韓國標準科學研究院 基盤標準部 電磁氣 그룹 研究員

*** 正會員 : 韓國標準科學研究院 標準普及部長

接受日字 : 2006年 3月 13日

最終完了 : 2006年 4月 14日

함으로써 PT comparator의 넓은 범위의 비오차에 대한 정확도와 직선성을 평가할 수 있다.

2. 전압변성기의 원리

전압변성기는 철심에 1차 코일과 2차 코일을 감은 변압기의 일종으로서, 등가회로를 그림 1에 나타내었다.

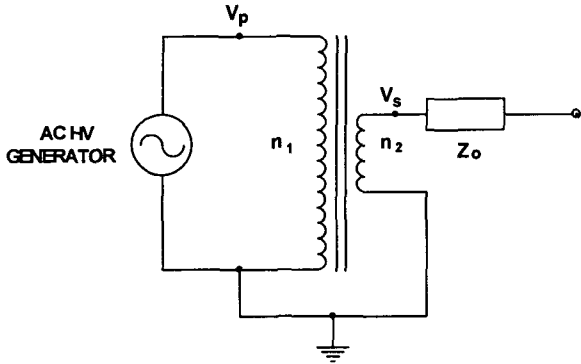


그림 1. 전압변성기의 등가회로
Fig. 1. An equivalent circuit for the potential transformer

Z_o 는 전압변성기의 누설 출력 임피던스(leakage output impedance)이다. 전압변성기의 2차측 저전압(V_s)에 대한 1차측 고전압(V_p) 비는 2차측 권선수(n_2)에 대한 1차측 권선수(n_1)의 비와 같으므로 아래와 같이 쓸 수 있다.^[6, 7]

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_1}{n_2} \tag{1}$$

식 (1)은 오차가 없는 이상적인 변압기에 해당되는 식이며, 실제의 PT는 고유한 오차(error)(δ)를 가지고 있기 때문에 식 (2)와 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_1}{n_2} + \delta \quad \text{혹은} \quad V_p = V_s \left(\frac{n_1}{n_2} + \delta \right) \tag{2}$$

한편 전압변성기의 비오차(ratio error, RE)는 아래와 같이 정의된다.

$$RE \equiv 100 \cdot \left[\frac{(NV_s - V_p)}{V_p} \right] [\%] \tag{3}$$

여기서 N 은 전압변성기의 정격 변환비(nominal ratio)이다. 식 (2)의 오른쪽의 수식을 이용하여 식 (3)을 다시 풀면 다음과 같다.

$$RE \equiv 100 \cdot \left(\frac{N - \frac{n_1}{n_2} - \delta}{\frac{n_1}{n_2} + \delta} \right) \approx \epsilon_t + \epsilon_s [\%] \tag{4}$$

이다. 상세한 수식의 전개는 부록에 나타내었다. 식 (4)에서 우변의 첫 번째 항은 권선비에 의한 비오차(ϵ_t)이고 두 번째 항은 자체 비오차(ϵ_s)로서 각각 아래와 같다.

권선비에 의한 비오차 :

$$\epsilon_t = 100 \cdot \left(\frac{Nn_2 - n_1}{n_1} \right) [\%] \tag{5}$$

$$\text{자체 비오차 : } \epsilon_s = 100 \cdot \left(-N\delta \frac{n_2^2}{n_1^2} \right) [\%] \tag{6}$$

식 (4), (5), (6)에서와 같이 정격 변환비(N)와 WRE PT의 권선비(turn ratio)가 동일한 경우, 즉 $N = \frac{n_1}{n_2}$ 일때 WRE PT는 자체 비오차만을 가지고 있으나, 정격변환비와 권선비가 다를 경우 WRE PT는 권선비에 의한 비오차와 자체 비오차를 함께 가지고 있음을 알 수 있다.

3. 전압변성기 비오차 측정시스템의 구성

그림 2는 국내 산업체 등에서 보유, 활용되고 있는 PT comparator의 구성도이다. 고전압 발생기(AC HV Generator)로부터 기준 전압변성기(Reference PT)와 피측정 전압변성기(Test PT)의 1차측에 동일한 전압을 병렬로 공급하고, 두 전압변성기의 2차측 전압을 PT comparator에 연결하여 비오차를 측정한다. Z_b 는 비오차를 평가할 피측정 PT의 정격부담과 동일한 조건으로 만들어 주기 위해서 피측정 PT에 병렬로 연결하는 부담이다. PT comparator에서는 비오차가 0.01 % 이하인 이상적인 PT가 기준 전압변성기로 사용되며, 산업체 등에서 활용되는 PT comparator의 비오차 측정범위는 대부분 최대 $\pm 20\%$ 이다.

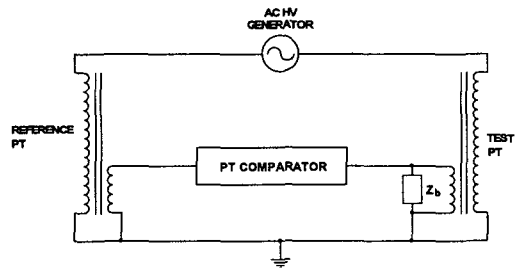


그림 2. 전압변성기 비오차 측정시스템의 구성도
Fig. 2. Block diagram of the potential transformer comparator system.

4. 초정밀 Wide Ratio Error PT를 이용한 PT Comparator의 비오차 직선성 평가

4-1. 초정밀 Wide Ratio Error PT의 설계 제작

PT comparator의 비오차의 정확도를 평가하기 위해서는 이론적으로 비오차의 평가가 표준기를 활용해야 한다. 특히

사용빈도가 가장 높은 $\pm (0.005 \sim 0.3) \%$ 의 비오차 범위에 대한 정확도를 상세히 평가할 수 있어야 하며, 비오차의 최대 측정범위까지도 평가를 해야만 PT comparator의 활용도를 높일 수 있다.

이러한 요구를 만족시키기 위하여 이번에 개발된 WRE PT는 식 (5)의 권선비에 의한 비오차가 영(零)인 단자와, 이 단자에서 2차측의 권선수를 고정시키고, 1측의 권선수를 달리하여 의도적으로 넓은 범위의 권선비에 의한 비오차를 갖도록 제작한 것이다. WRE PT는 명목 비오차를 0 %, $\pm 0.005 \%$, $\pm 0.01 \%$, $\pm 0.03 \%$, $\pm 0.1 \%$, $\pm 0.3 \%$, $\pm 1 \%$, $\pm 3 \%$, $\pm 5 \%$, -9% 및 $+11 \%$ 가 되도록 하였으며, 이론적인 권선비에 의한 비오차의 계산값과 측정값이 일치하도록 제작한 것이다.

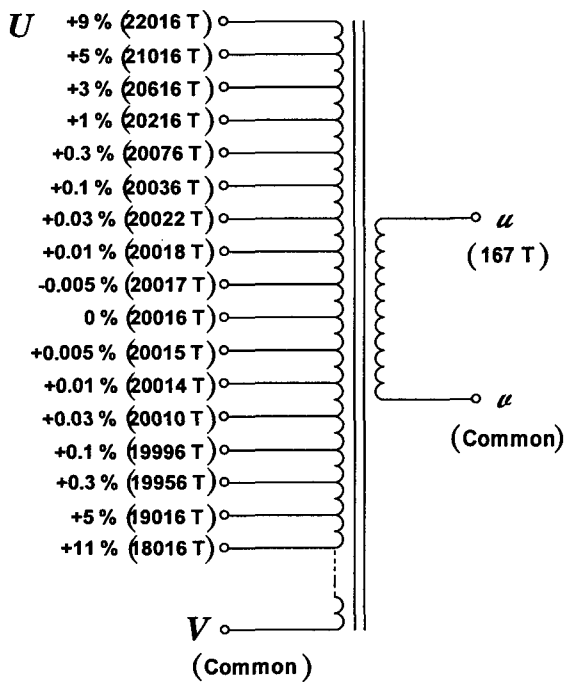


그림 3. 넓은 범위의 비오차를 갖는 초정밀 전압변성기의 권선도(13200 V/110 V)

Fig. 3. Wiring of the accurate wide ratio error PT (13200 V/110 V) (괄호 속은 권선수 turn 임)

그림 3은 개발된 WRE PT의 권선도이며, 1차측(U, V) 및 2차측(u, v) 전압이 각각 13200 V 및 110 V이고, 1개의 코어에 19개의 권선을 하였다. 그림 3에서 권선비에 의한 비오차가 영인 단자의 경우는 식 (1)에 의해 변환비는 $N = 119.85629$ 으로서 2 차측의 권선수 167회에 대하여 1차측의 권선수는 20016회에 해당된다. 다른 단자의 경우는 2 차측의 권선수를 167회으로 고정시키고, 1 차측의 권선수를 각각 22016회, 21016회, 20616회, 20216회, 20076회, 20036회, 20022회, 20018회, 20017회, 20016회, 20015회, 20014회, 20010회, 19996회, 19956회, 19816회, 19416회, 19016회, 18016회가 되도록 권선하였다. 이들 단자들의 권선비에 의한 비오차는 식 (5)

를 이용하여 계산하면 각각 -9.0843% , -4.7583% , -2.9104% , -0.9893% , -0.2989% , -0.0998% , -0.0300% , -0.0100% , -0.0050% , 0.0000% , $+0.0050 \%$, $+0.0100 \%$, $+0.0300 \%$, $+0.1000 \%$, $+0.3007 \%$, $+1.0093 \%$, $+3.0902 \%$, $+5.2587 \%$, $+11.1012 \%$ 가 된다. 이 계산된 권선비에 의한 비오차(이론값)를 표 1의 세 번째 열에 나타내었다.

4-2. 초정밀 Wide Ratio Error PT의 권선비에 의한 비오차의 측정값

그림 2에서 WRE PT를 피측정 계기용변성기로 선택하여 이 PT의 비오차를 PT comparator로 측정하였으며, 이 결과를 표 1의 네 번째 열에 나타내었다. WRE PT의 측정된 비오차는 식 (4)와 같이 두 가지 요인으로 나타낼 수 있다. 즉 WRE PT의 비오차 측정값은 권선비에 의한 비오차와 자체 비오차의 합이다.

자체 비오차는 1 절에서 언급한 자기 포화 현상과, 1차측과 2차측의 누설 임피던스에 의해 생기는 내부오차로서, -0.0004% 로 측정되었다. 자체 비오차는 권선비에 의한 비오차가 전혀 없는 전압변성기가 자체적으로 가지고 있는 비오차로서, 식 (5)에 의해 $N=119.85629$ 이고, 2차측 권선수에 대한 1 차측 권선수의 비가 20016/167 인 권선비에서 측정된 오차에 해당한다. 이는 식 (6)에서

$$\epsilon = 100 \cdot \left(-119.85629 \cdot \delta \cdot \frac{167^2}{20016^2} \right) = -0.0004 \%$$

에 해당되므로 여기서 δ 를 계산하면 $\delta=0.000481$ 에 해당된다. 다른 단자에 대해서도 $\delta=0.000481$ 과 식 (6)을 이용하여 계산된 자체 비오차 값을 표 1의 다섯 번째 열에 나타내었다. 따라서 권선비에 의한 비오차의 측정값은 식 (4)에 의해 [WRE PT의 비오차 측정값-(자체 비오차)] 이므로, 이를 계산하여 표 1의 여섯 번째 열에 나타내었다.

4-3. PT Comparator의 비오차의 직선성 평가결과 및 논의

PT comparator의 비오차의 직선성이 정확하게 유지된다면, WRE PT의 각 단자의 권선비에 의한 비오차의 측정값은 이론값(표준값)과 동일해야 한다. 이 두 값의 차이, 즉 [권선비에 의한 비오차(이론값)-권선비에 의한 비오차(측정값)]가 PT comparator에 대한 보정값을 의미하는 것이며, 이를 표 1의 마지막 열에 나타내었다.

표 1에서 보는 바와 같이 권선비에 의한 명목 비오차가 $-3 \% \sim +0.1 \%$ 범위에서는 이론값과 측정값의 차이가 $\pm 0.0005 \%$ 이하이고, 명목 비오차 $+0.3 \%$ 및 $+1 \%$ 에서는 이론값과 측정값의 차이가 최대 $+0.0013 \%$ 이다. PT comparator의 불확도가 $\pm 0.002 \%$ 이므로^[8] 위의 비오차 범위에서는 PT comparator의 비오차를 보정할 필요가 없다. 명목 비오차가 큰 범위에서는 차이가 점점 증가하여, -9% 에서는 -0.0070% 만큼, $+11 \%$ 에서는 $+0.0079 \%$ 만큼 PT comparator 비오차의 측정값을 보정해 주어야 정확한

측정결과를 얻을 수 있다(표 1의 e 열). 여기서 보는 바와 같이 개발된 WRE PT를 이용하여 분해능이 0.0001 % 로 우수한 PT comparator의 비오차를 - 9 % ~ + 11 % 범위에서 정확히 평가할 수 있게 되었다.

표 1. WRE PT의 권선비에 따라 계산된 비오차와 측정된 비오차의 비교.

Table 1. Comparison between calculated and experimental ratio errors by turn ratio for the various turn ratios of the WRE PT.

(단위 : %)

명목 비오차 (%)	권선비 (n1/n2)	권선비에 의한 비오차 ^a (이론값)	비오차 ^b (측정값)	자체 비오차 ^c	권선비에 의한 비오차 측정값 ^d (b-c)	보정값 ^e (a-d)
-9	22016/167	-9.0843	-9.0776	-0.00033	-9.0773	-0.0070
-5	21016/167	-4.7583	-4.7551	-0.00036	-4.7547	-0.0035
-3	20616/167	-2.9104	-2.9105	-0.00038	-2.9101	-0.0002
-1	20216/167	-0.9893	-0.9892	-0.00039	-0.9888	-0.0005
-0.3	20076/167	-0.2989	-0.2995	-0.00040	-0.2991	+0.0002
-0.1	20036/167	-0.998	-0.1006	-0.00040	-0.1002	+0.0004
-0.03	20022/167	-0.0300	-0.0307	-0.00040	-0.0303	+0.0003
-0.01	20018/167	-0.0100	-0.109	-0.00040	-0.0105	+0.0005
-0.005	20017/167	-0.0050	-0.0059	-0.00040	-0.0055	+0.0005
0.000	20016/167	0.0000	-0.0004	-0.00040	0.0000	0.0000
+0.005	20015/167	+0.0050	+0.0041	-0.00040	+0.0045	+0.0005
+0.01	20014/167	+0.0100	+0.0092	-0.00040	+0.0096	+0.0004
+0.03	20010/167	+0.0300	+0.0292	-0.00040	+0.0296	+0.0004
+0.1	19996/167	+0.1000	+0.0993	-0.00040	+0.0997	+0.0003
+0.3	19956/167	+0.3007	+0.2990	-0.00040	+0.2994	+0.0013
+1	19816/167	+1.0093	+1.0077	-0.00041	+1.0081	+0.0012
+3	19416/167	+3.0902	+3.0873	-0.00043	+3.0877	+0.0025
+5	19016/167	+5.2587	+5.2541	-0.00044	+5.2545	+0.0042
+11	18016/167	+11.1012	+11.0928	-0.00049	+11.0933	+0.0079

- a : 식 (5)에 의해 계산된 권선비에 의한 비오차 이론값
- b : PT comparator로 측정한 WRE PT의 비오차 측정값
- c : WRE PT에서 $\delta=0.000481$ 과 식 (6)을 이용하여 계산된 자체 비오차.
- d : [WRE PT의 비오차 측정값 - 자체 비오차,] 즉 표 1에서 (b-c).
- e : PT comparator의 보정값, 즉 표 1에서 (a-d).

그림 4는 개발된 WRE PT의 명목 비오차에 따른 권선비에 의한 비오차의 이론적인 계산값 및 측정값(Y축의 왼쪽)과 PT comparator의 비오차 보정값(Y축의 오른쪽)을 나타낸 것이다. 여기서 보는 바와 같이 비오차 범위 - 9 % ~ + 11 % 범위에서 직선성이 우수하며, 또한 PT comparator

의 보정값은 최대 ± 0.0079 % 이하로 나타났다. 이와 같이 개발된 초정밀 WRE PT를 활용한 결과 아주 작은 PT comparator의 비오차에 대한 보정값을 구할 수 있게 되었으며, 이러한 성능의 PT comparator는 매우 정확한 전압변성기의 표준을 유지하고 보급하는 교정시험기관에서 활용하기에 적합한 것으로 판단된다.

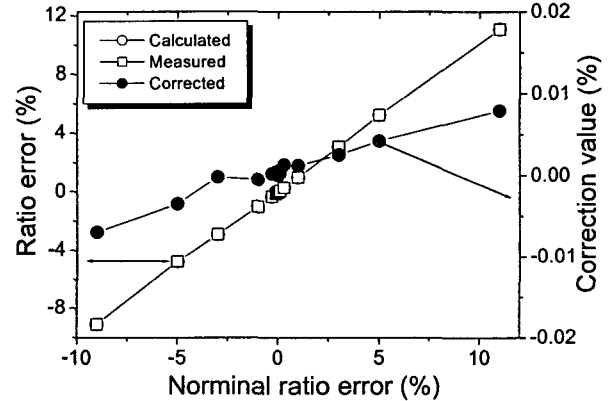


그림 4. 명목 비오차에 따른 권선비에 의한 비오차의 이론값(○) 및 측정값(□)과 전압변성기 비오차 측정시스템의 보정값

Fig. 4. Theoretical(○) and measured(□)values of ratio error by turn ratio as a function of nominal ratio error in WRE PT, and corrected(●) values for the comparator.

5. 결 론

이론적인 권선비에 의한 비오차 계산값, 즉 표준값과 정확히 일치하고, - 9 % ~ + 11 % 까지의 넓은 범위의 비오차를 갖는 전압변성기(wide ratio error PT, 이하 WRE PT)를 설계 제작하였으며, 이 WRE PT를 이용하여 - 9 % ~ + 11 %의 비오차 범위에서 전압변성기 비교측정 시스템(PT comparator)의 비오차의 정확도 및 직선성을 평가할 수 있는 기술을 개발했다. 개발된 WRE PT는 1차측 전압이 13200 V, 2차측 전압이 110 V로써 정격변환비가 120이며, 이 때의 비오차가 0(零)이 되도록 설계하였으며, 특히 PT comparator에서 사용빈도가 가장 높은 ± 0.005 % ~ ± 0.3 %의 비오차 범위에 대한 정확도를 상세히 평가하기 위하여 11 개의 비오차 표준값을 갖도록 제작하였다. 이 WRE PT를 이용한 비오차의 평가는 각 권선비에 의한 비오차의 이론값, 즉 표준값과 측정값의 일치도를 비교 분석하여 PT comparator의 비오차의 직선성을 정확하게 분석할 수 있으며, 이 두 값의 차이는 PT comparator의 비오차 보정값으로써 이 만큼 보정하여야 정확한 비오차를 측정할 수 있다.

이 기술을 적용하여 PT comparator의 비오차 직선성을 평가한 결과 권선비에 의한 명목 비오차가 - 3 % ~ + 0.1 % 범위에서는 보정값이 ± 0.0005 % 이하이고, 명목 비오차 + 0.3 % 및 + 1 % 에서는 보정값이 최대 + 0.0013 % 로

나타났다. PT comparator의 불확도가 ± 0.002 % 이므로 위의 비오차 범위에서는 PT comparator의 비오차를 보정할 필요가 없다. 명목 비오차가 큰 범위에서는 차이가 점점 증가하여, - 9 %에서는 - 0.0070 % 만큼, + 11 %에서는 + 0.0079 % 만큼 PT comparator 비오차의 측정값을 보정해 주어야 정확한 측정결과를 얻을 수 있다. 여기서 보는 바와 같이 개발된 초정밀 WRE PT를 이용하여 측정 분해능이 0.0001 % 로 우수한 PT comparator의 비오차를 - 9 % ~ + 11 % 범위에서 정확히 평가할 수 있게 되었으며, 특히 ± (0.005 ~ 0.3) % 범위의 비오차를 아주 정밀하게 평가할 수 있게 되었다. 이는 본 초정밀 WRE PT를 활용하지 않으면 확인할 수 없는 결과이며, 본 WRE PT를 사용하여 PT comparator의 비오차를 평가하여 얻은 매우 중요한 결과이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] 권성원, 박세일, 조용명, 강진흥, “평면형 다중접합 열전 변환기의 제작”, 한국센서학회지, Vol. 5, No. 4, pp. 17, 1996.
 [2] 권성원, 조용명, 김규태, 강진흥, 박영태, “교류-직류 변환 오차 자동 측정시스템”, 한국센서학회지, Vol. 7, No. 6, pp. 401, 1998.
 [3] 정재갑, 권성원, 김규태, 김명수, “외부부담이 전압변성기의 비오차와 위상각오차에 미치는 영향에 대한 연구”, 대한전기학회지, Vol. 53C, No. 3, pp 137-142, 2004.
 [4] 계기용변성기, KSC 1706.
 [5] 정재갑, 권성원, 김한준, 박영태, 김명수, “넓은 범위의 비 오차를 갖는 전압변성기를 이용한 계기용변성기 비교 측정 장치의 비오차 직선성 평가기술”, 대한전기학회지, Vol. 54B, No. 2, p 662, 2005.
 [6] 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, Vol. 79, No. 51, pp. 1213-1218, 1961.
 [7] IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers, American National Standards Institute, ANSI /IEEE Vol. C57, No. 13, pp. 45-46, 1978.
 [8] Certificate of the PT comparator (Zera model WM 303U), PTB, 2005.

부 록 : 수식의 유도

식 (2)를 다시 쓰면

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_1}{n_2} + \delta \quad \text{혹은} \quad V_p = V_s \left(\frac{n_1}{n_2} + \delta \right) \quad (2)$$

이다. 전압변성기의 비오차(ratio error, RE)는 아래와 같이 정의된다.

$$RE \equiv 100 \cdot \left[\frac{(NV_s - V_p)}{V_p} \right] \quad [\%] \quad (3)$$

여기서 N 은 전압변성기의 정격 변환비(nominal ratio)이다. 식 (2)의 오른쪽 식을 이용하여 식 (3)을 다시 풀어쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} RE &\equiv 100 \cdot \left(\frac{N - \frac{n_1}{n_2} - \delta}{\frac{n_1}{n_2} + \delta} \right) = 100 \cdot \left(\frac{N \frac{n_2}{n_1} - 1 - \delta \frac{n_2}{n_1}}{1 + \delta \frac{n_2}{n_1}} \right) \\ &= 100 \cdot \left(N \frac{n_2}{n_1} - 1 - \delta \frac{n_2}{n_1} \right) \left(1 - \delta \frac{n_2}{n_1} + \dots \right) \\ &= 100 \cdot \left(N \frac{n_2}{n_1} - 1 - N\delta \frac{n_2^2}{n_1^2} + \delta^2 \frac{n_2^2}{n_1^2} + \dots \right) \\ &\cong 100 \cdot \left(\frac{Nn_2 - n_1}{n_1} \right) + 100 \cdot \left(-N\delta \frac{n_2^2}{n_1^2} + \delta^2 \frac{n_2^2}{n_1^2} \right) \\ &= 100 \cdot \left(\frac{Nn_2 - n_1}{n_1} \right) + \epsilon_s = \epsilon_t + \epsilon_s \quad [\%] \quad (4) \end{aligned}$$

여기서, ϵ_t 는 권선비에 의한 오차이고, ϵ_s 는 다음과 같다.

$$\epsilon_s = 100 \cdot \left(-N\delta \frac{n_2^2}{n_1^2} + \delta^2 \frac{n_2^2}{n_1^2} \right) \cong 100 \cdot \left(-N\delta \frac{n_2^2}{n_1^2} \right) [\%]$$

이다. 식 (4)의 수식 전개에서 $\left(\delta \frac{n_2}{n_1} \right)$ 의 2차항 이상은 크기가 수 10^{-6} 이하이므로 무시 가능하다.

저 자 소 개



권 성 원(權 聖 遠)

1952년 1월 19일생. 1974년 한국항공대학교 전자공학과 졸업. 1974년-1977년 공군정밀측정시험소 전기전자시험과장. 1978년-현재, 한국표준과학연구원 기반표준부 책임연구원
 Tel : 042-868-5155
 Fax : 042-868-5018
 E-mail : swkwon@kriss.re.kr



정재갑(鄭在甲)

1965년 7월 4일생. 1998년 고려대 물리학과 졸업(이학박사). 1999-2001 아이오아 주립대 박사후 연구원. 2001년-현재 한국표준과학연구원 기반표준부 책임연구원

Tel : 042-868-5759

Fax : 042-868-5018

E-mail : jkjung@kriss.re.kr



이상화(李相和)

1967년 1월 26일생. 1994년 한밭대 전자공학과 졸업. 1986-현재 한국표준과학연구원 기반표준부 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, 표준보급부장

Tel : 042-868-5040

Fax : 042-868-5439

E-mail : mkim@kriss.re.kr