

Evaluation Technique for Ratio Error and Phase Displacement of Current Transformer Comparator

金潤亨* · 韓相吉* · 鄭在甲[†] · 韓相玉**
(Yoon-Hyoung Kim · Sang-Gil Han · Jae-Kap Jung · Sang-Ok Han)

Abstract - We have developed an evaluation technique for both ratio error and phase displacement of current transformer (CT) comparator by using the precise standard capacitors and resistors. By applying this technique to equivalent circuit of CT comparator evaluation system, we can obtain the calculated and measured ratio errors (or phase displacements) in the CT comparator. Thus we can evaluate ratio errors and phase displacement of CT comparator by comparing the calculated and measured ratio errors (or phase displacements). The method was applied to CT comparator under test with the ratio errors and phase displacement ranges of 0 ~ ±10 % and 0 ~ ±7.5 crad, respectively. Finally we have compared the ratio error and phase displacement of the CT comparator obtained in this method with specifications of two companies.

Key Words : Current Transformer, CT Comparator, Ratio Error, Phase Displacement, Correction

1. 서 론

전류변성기(CT, current transformer)는 정상사용 상태에서 실질적으로 전류비가 권선비에 반비례하고, 방향이 적절하게 연결되어 2차 전류의 위상이 1차 전류에 비해 거의 영인 계기용 변성기이다. 전류변성기의 비오차와 위상오차는 정격 주파수에서 2차 부담이 정격 부담의 특정 범위에 있을 때 일정 수치를 초과할 수 없도록 규정되어 있다[1, 2]. KS 규격에 명시된 전류변성기는 오차 등급에 따라 0.1 급 ~ 3.0 급의 5개 등급으로 나뉘고 있으며 IEC 규격에는 5.0 급이 포함되어 6개 등급으로 나뉘고 있다. 등급에 따라 허용되는 오차는 비오차의 경우 ±0.1 % ~ ±5 % 이하이고 위상오차의 경우 ±5 min ~ ±180 min 이하로 규정하고 있다 [1, 2].

한편 전류변성기를 생산하는 중전기 업체나 교정시험기관에서는 전류변성기 비교측정시스템을 이용하여 전류변성기의 비오차 및 위상오차를 측정한다[3]. 전류변성기 비교측정시스템의 핵심장비인 전류변성기 비교기는 표준 전류변성기와 피측정 전류변성기의 2차측 전류를 비교하여 피측정 전류변성기의 비오차와 위상오차를 측정하기 위해 사용된다. 따라서 피측정 전류변성기의 비오차 및 위상오차를 정확하게 측정하기 위해서는 전류변성기 비교기의 성능을 정확하게 평가하여야 한다.

본 논문에서는 종전에 연구되었던 전류변성기 비교기의

비오차 평가 기술[4]에 추가로 전류변성기 비교기의 위상오차의 정확도와 직선성을 평가하기 위한 새로운 기술을 개발하였다. 이 기술은 그 값을 정확하게 알고 있는 표준커패시터와 표준저항을 이용하여 위상오차 평가 시스템의 등가회로로부터 계산된 위상오차의 이론값과 실제 측정값을 비교하여 전류변성기 비교기의 위상오차 정확도와 직선성을 동시에 평가하는 기술이다. 이 기술을 이용하여 두 회사의 전류변성기 비교기에 대해 비오차 및 위상오차를 평가하였고, 평가 시스템의 불확도를 분석하였다. 마지막으로 전류변성기 비교기의 제조사에서 제공한 비오차 및 위상오차 사양과, 본 연구에서 개발한 방법으로 얻은 것과 비교하여 전류변성기 비교기의 성능을 재평가하였다. 한편 본 논문은 두 회사의 전류변성기 비교기에 대한 기존의 비오차 평가 내용과 이번에 새롭게 개발한 위상오차의 평가 결과를 종합적으로 서술하였다.

2. 전류변성기 비교기의 비오차 및 위상오차 평가 이론

2.1 비오차 평가 이론

전류변성기 비교기의 비오차 정확도를 평가하기 위해 선행 연구되었던 전류변성기 비교기의 비오차 평가 시스템은 그림 1과 같이 교류 전압발생원과 표준커패시터로 구성된다 [4]. 그림 1에서 I_N , I_X , C_N , C_X , C_V 는 각각 다음과 같다.

I_N , I_X : 전류변성기 비교기의 k_N 및 k_X 단자에 흐르는 전류
 C_N , C_X : 전류변성기 비교기의 k_N 및 k_X 단자에 연결되는 표준 커패시터
 C_V : 임의의 비오차를 인가하기 위해 표준커패시터 C_N 에 병렬로 연결되는 커패시터

[†] 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 8月 27日

最終完了 : 2008年 10月 2日

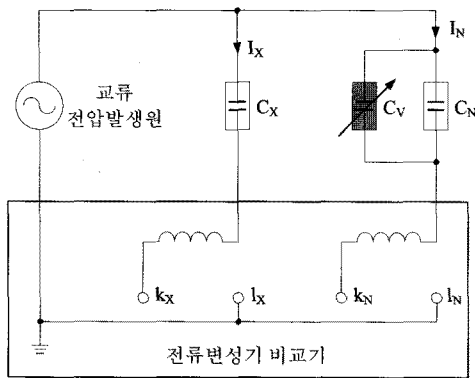


그림 1 전류변성기 비교기의 비오차 평가 시스템
Fig. 1 Evaluation system for ratio error of CT comparator

그림 1에서 C_V 를 C_N 에 병렬로 연결했을 때의 비오차(α_-)에서 C_V 가 없을 때의 비오차(α_{0-})를 빼어 다음과 같이 인가된 비오차의 이론값을 얻을 수 있다.

$$\alpha_- - \alpha_{0-} = -\frac{C_X C_V}{C_N (C_N + C_V)} \times 100 [\%] \quad (1)$$

이때 표준커패시터 C_N , C_X , C_V 의 커패시턴스는 정확하게 알고 있어야 한다. 식 (1)에서 C_V 에 의한 비오차의 범위는 음(-)의 영역이다. 전류변성기 비교기의 양(+)의 영역에 대한 비오차 정확도를 평가하기 위해 그림 1에서 k_N 단자와 k_X 단자의 위치를 바꾸면 C_V 를 C_N 에 병렬로 연결했을 때의 비오차(α_+)에서 C_V 가 없을 때의 비오차(α_{0+})를 빼어 다음과 같이 양(+)의 영역에 대한 인가된 비오차의 이론값을 얻을 수 있다.

$$\alpha_+ - \alpha_{0+} = \frac{C_V}{C_X} \times 100 [\%] \quad (2)$$

따라서, 커패시턴스를 정확하게 알고 있는 표준커패시터 C_N , C_X , C_V 와 식 (1)과 (2)을 이용하여 전류변성기 비교기의 비오차 이론값을 구하고, 이 값을 전류변성기 비교기에서 측정되는 실험값과 비교하여 전류변성기 비교기의 비오차 정확도를 평가할 수 있다.

2.2 위상오차 평가 이론

그림 2의 (a)와 같이 직렬 연결된 커패시터와 저항에 교류전압을 인가하였을 때 흐르는 전류의 위상은 그림 2 (b)와 같다. 그림 2 (b)에 보인바와 같이 I 의 위상은 I_R 과 I_C 의 벡터합으로 나타낼 수 있다. 이때 전류 I 의 위상 θ 는 다음과 같다.

$$\tan\theta = \omega CR, \quad \theta = \tan^{-1}(\omega CR) \quad (3)$$

식 (3)을 급수전개(Taylor series) 하면 다음과 같다.

$$\theta = \tan^{-1}(\omega CR) = \omega CR - \frac{(\omega CR)^3}{3} + \frac{(\omega CR)^5}{5} - \frac{(\omega CR)^7}{7} + \dots \quad (4)$$

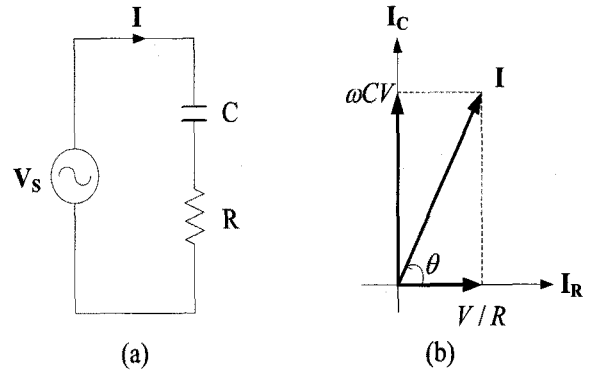


그림 2 직렬로 연결된 커패시터와 저항에 흐르는 전류의 위상
Fig. 2 Phase of current flowing in capacitor and resistor, connected in series.

식 (4)에서 2차항 이상이 10^{-6} 이하로 무시할 수 있다면 전류 I 의 위상 θ 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\theta = \omega CR \quad (5)$$

전류변성기 비교기의 위상오차를 평가하기 위해 교류 전압발생원과 표준커패시터 C_N 과 C_X 를 각각 전류변성기 비교기의 k_N 과 k_X 단자에 각각 연결하여 그림 3과 같은 시스템을 구성한다. 그림 3에서 I_N , I_X , R_V 는 각각 다음과 같다[5].

I_N : 전류변성기 비교기의 k_N 단자에 흐르는 전류

I_X : 전류변성기 비교기의 k_X 단자에 흐르는 전류

R_V : 임의의 위상오차를 인가하기 위해 표준커패시터 C_N 에 직렬로 연결되는 표준저항

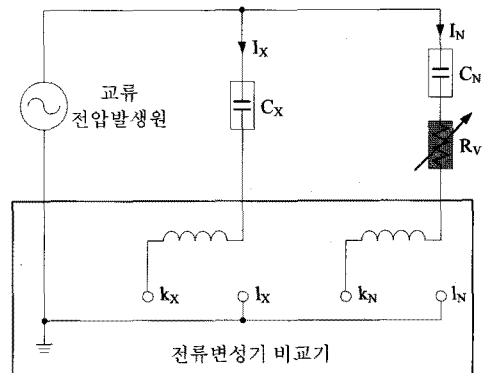


그림 3 전류변성기 비교기의 위상오차 평가 시스템
Fig. 3 Evaluation system for phase displacement of CT comparator

전류변성기 비교기에서 측정되는 위상오차(β)는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \theta_X - \theta_N \quad (6)$$

위상오차의 단위는 min 과 crad 이 주로 사용되는데 1

crad=34.38 min 이다. 표준커패시터 C_N 과 C_X 에 동일한 교류 전압을 인가할 때 C_N 에 흐르는 전류(I_N)와 C_X 에 흐르는 전류(I_X)의 위상에 대해 식 (5)와 식 (6)을 이용하면 R_V 가 없을 때의 위상오차(β_{0-})와 R_V 를 C_N 에 직렬로 연결했을 때의 위상오차(β_-)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\beta_{0-} = \omega C_X R_X - \omega C_N R_V \quad (7)$$

$$\beta_- = \omega C_X R_X - \omega C_N (R_N + R_V) = \beta_{0-} - \omega C_N R_V \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)에 의해 R_V 가 없을 때의 위상오차(β_{0-})와 R_V 를 C_N 에 직렬로 연결했을 때의 위상오차(β_-)를 비교하여 임의의 위상오차의 이론값을 얻을 수 있다. 이때 표준커패시터 C_N , C_X 의 커패시턴스와 표준저항 R_V 의 저항값은 정확하게 알고 있어야 한다. 식 (8)에서 R_V 에 의한 위상오차의 범위는 음(-)의 영역이다.

전류변성기 비교기의 양(+)의 영역에 대한 위상오차 정확도를 평가하기 위해 그림 2에서 k_N 단자와 k_X 단자의 위치를 바꾸고, 동일한 과정을 반복하여 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\beta_+ - \beta_{0+} = \omega C_N R_V \quad (9)$$

따라서 식 (8)과 (9)를 이용하여 전류변성기 비교기의 위상오차 이론값을 구하고, 이 값을 전류변성기 비교기에서 측정되는 실험값과 비교하여 전류변성기 비교기의 위상오차 정확도를 평가할 수 있다.

3. 전류변성기 비교기의 비오차 및 위상오차 평가 결과

3.1 비오차 평가 결과

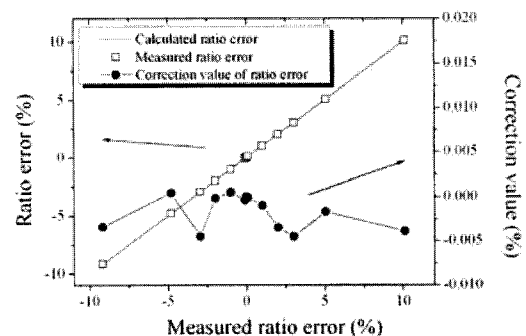
본 연구에서 평가한 A사와 B사의 전류변성기 비교기는 0 ~ ±20 % 범위의 비오차를 측정할 수 있고, 본 연구에서의 비오차 평가 범위는 IEC 규격에서 명시하고 있는 비오차의 가장 높은 등급인 5급을 고려하여 비오차 측정 범위 0 ~ ±10 % 를 평가하였다. 평가 시스템의 전압발생원으로는 California사의 1251 RP를 이용하였고, 커패시터의 정격을 고려하여 112 V 의 일정한 전압을 인가하면서 실험하였다. 표준커패시터 C_N 과 C_X 는 커패시턴스를 정확하게 알고 있는 정격 10 uF 의 동일한 커패시터를 사용하였다. 전류변성기 비교기의 0 ~ ±10 % 범위에 대해 임의의 비오차를 인가하기 위한 표준커패시터 C_V 의 커패시턴스는 표 1의 첫 번째 열에 정리하였다. 그림 1의 전류변성기 비교기의 비오차 정확도 평가 시스템과 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 음(-)의 영역과 양(+)의 영역에 대한 비오차의 이론값을 표 1의 두 번째 열에 정리하였다. 또한 A사와 B사의 전류변성기 비교기에 대한 비오차의 실제 측정값을 표 1의 세 번째 열과 다섯 번째 열에 정리하였다. 표 1의 네 번째 열과 마지막 열은 두 회사의 전류변성기 비교기에 대한 비오차의 이론값과 측정값의 차이로 전류변성기 비교기에서 측정되는 비오차에 대한 보정값을 나타낸다.

표 1 전류변성기 비교기의 비오차의 이론값, 측정값, 보정값
Table 1 Calculated ratio error, measured ratio error and correction value for CT comparator.

커패시턴스 [nF]	C_V 에 의한 비오차	A사 전류변성기 비교기[4]		B사 전류변성기 비교기	
		이론값 [%] (A)	측정값 [%] (B)	보정값 [%] (C=A-B)	측정값 [%] (B')
1000.050	-9.1594	-9.1560	-0.0034	-9.1590	-0.0004
499.932	-4.7989	-4.7993	0.0004	-4.8000	0.0011
300.109	-2.9372	-2.9327	-0.0045	-2.9370	-0.0002
199.941	-1.9762	-1.9760	-0.0002	-1.9775	0.0013
99.989	-0.9982	-0.9987	0.0005	-0.9990	0.0008
9.9999	-0.1007	-0.1003	-0.0004	-0.1005	-0.0002
1.0000	-0.0101	-0.0100	0.0000	-0.0100	-0.0001
1.0000	0.0101	0.0102	-0.0001	0.0105	-0.0004
9.9999	0.1011	0.1012	-0.0001	0.1015	-0.0004
99.989	1.0105	1.0115	-0.0010	1.0115	-0.0010
199.941	2.0207	2.0242	-0.0035	2.0225	-0.0018
300.109	3.0330	3.0375	-0.0045	3.0335	-0.0005
499.932	5.0525	5.0542	-0.0017	5.0535	-0.0010
1000.050	10.1069	10.1109	-0.0039	10.1075	-0.0006

비오차의 보정값은 A사 전류변성기 비교기의 경우 음(-)의 영역에서는 -0.0045 % ~ +0.0005 %이고, 양(+)의 영역에서는 -0.0045 % ~ -0.0001 % 이다. B사 전류변성기 비교기의 경우 음(-)의 영역에서는 -0.0004 % ~ +0.0013 % 이고, 양(+)의 영역에서는 -0.0018 % ~ -0.0004 % 이다.

그림 4는 표 1에서의 전류변성기 비교기의 -10 % 에서 +10 % 까지의 비오차 측정 범위에 따른 이론값 및 측정값, 보정값을 나타낸 것이다. 그림 4에서 보인바와 같이 전류변성기 비교기의 비오차가 직선성이 잘 유지되고 있음을 쉽게 확인할 수 있다.



(a)

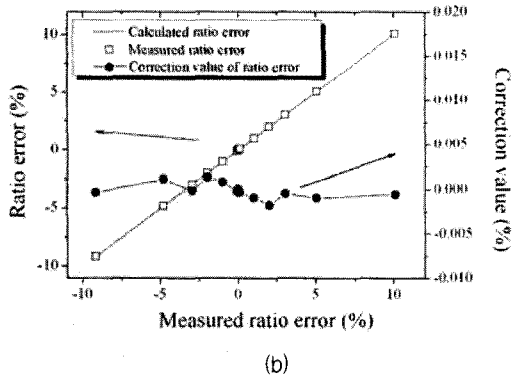


그림 4 비오차 측정값에 따른 비오차의 이론값 및 측정값과 보정값. (a) A사[4] (b) B사
 Fig. 4 Calculated ratio error, measured ratio error, and correction value versus measured range of ratio error. (a) A company (b) B company

한편 제조사에서 제공하는 전류변성기 비교기의 보정값의 사양은 A사의 경우 0.2 % 이하의 낮은 범위의 비오차에 대해서는 10 ppm 인 절대값이고, 0.2 % 이상에서는 측정값의 0.5 % 인 상대값으로 주어진다[6]. B사의 경우는 100 ppm 인 절대값에 측정값의 1 % 를 더한 값으로 주어진다[7]. 한편 제조사에서 제공하는 사양과 본 연구 결과의 비교를 위해 0.2 % 이하에서는 절대값인 보정값을 취하였고, 0.2 % 이상에서는 상대값인 측정값의 상대오차를 취하였다. 측정값의 상대오차는 다음과 같다.

$$\text{측정값의 상대오차} = \frac{\text{측정값} - \text{이론값}}{\text{이론값}} \times 100 [\%] \quad (10)$$

표 2에 제조사에서 제공하는 사양과 본 연구에서 평가한 결과를 정리하여 나타내었다.

표 2 A사와 B사의 전류변성기 비교기들의 비오차 평가 결과의 비교.

Table 2 A comparison of evaluation results for ratio error of CT comparators of A and B companies.

비오차 범위 [%]	A사 전류변성기 비교기[4]		B사 전류변성기 비교기	
	제조사	평가 결과	제조사	평가 결과
0 ~ ± 0.2	±10 ppm	±4 ppm	±100 ppm + rdg × (±)1 %	±53 ppm
± 0.2 ~ ± 10	rdg* × (±)0.5 %	rdg × (±)0.17 %		

* rdg : 전류변성기 비교기의 측정값

표 2에 보인 바와 같이 전류변성기 비교기의 비오차를 평가한 결과 A사의 경우 0.2 % 이하에서는 보정값이 최대 4 ppm 의 절대값이고, 0.2 % 이상에서는 측정값의 상대오차가 0.17 % 로 제조사에서 제공한 사양보다 좋게 나오고 있음을 확인할 수 있다. 또한 B사의 경우는 최대 53 ppm 의

절대값으로 제조사에서 제공한 사양보다 좋게 나오고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 위상오차 평가 결과

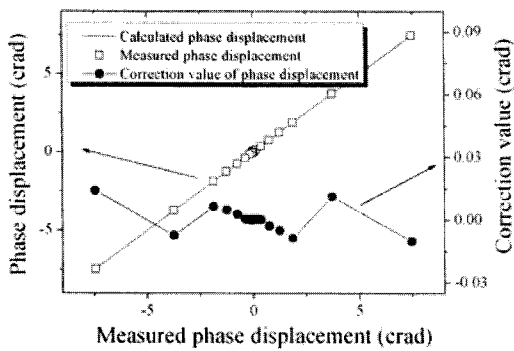
본 연구에서 평가한 A사와 B사의 전류변성기 비교기는 0 ~ ±20 crad 범위의 위상오차를 측정할 수 있고, 본 연구에서의 위상오차 평가 범위는 KS 규격 및 IEC 규격에서 명시하고 있는 위상오차의 가장 높은 등급인 5급을 고려하여 비오차 측정 범위 0 ~ ±7.5 crad 를 평가하였다. 평가 시스템의 전압발생원으로 비오차 평가시와 동일한 California사의 1251 RP를 이용하였고, 커패시터의 정격을 고려하여 112 V 의 일정한 전압을 인가하였다. 또한 표준커패시터 C_N 과 C_X 는 정격 10 uF 의 동일한 커패시터를 사용하였다. 전류변성기 비교기의 0 ~ ±7.5 crad 범위에 대해 임의의 위상오차를 인가하기 위한 표준저항 R_V 의 저항값을 표 3의 첫 번째 열에 정리하였다.

표 3 전류변성기 비교기의 위상오차의 이론값, 측정값, 보정값
 Table 3 Calculated phase displacement, measured phase displacement and correction value for CT comparator.

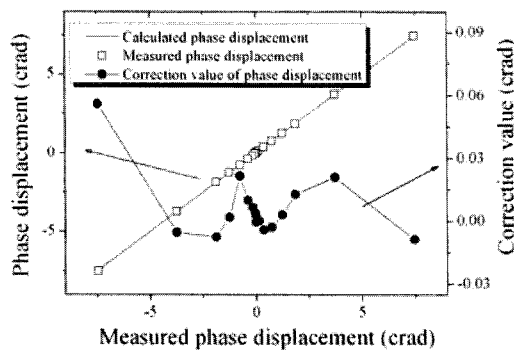
저항 [Ω]	R_V 에 의한 위상오차	A사 전류변성기 비교기[5]		B사 전류변성기 비교기	
		측정값 [crad] (b)	보정값 [crad] (c=a-b)	측정값 [crad] (b')	보정값 [crad] (c'=a-b')
R_V	이론값 [crad] (a)				
20.0061	-7.4573	-7.4712	0.0139	-7.5131	0.0558
10.0002	-3.7328	-3.7255	-0.0073	-3.7274	-0.0054
5.0018	-1.8677	-1.8740	0.0064	-1.8601	-0.0076
3.3355	-1.2456	-1.2504	0.0048	-1.2474	0.0018
2.0101	-0.7506	-0.7534	0.0027	-0.7721	0.0214
1.0062	-0.3758	-0.3761	0.0004	-0.3857	0.0100
0.40015	-0.1494	-0.1496	0.0002	-0.1561	0.0066
0.10041	-0.0375	-0.0375	0.0000	-0.0417	0.0042
0.01014	-0.0038	-0.0039	0.0001	-0.0064	0.0026
0.01014	0.0038	0.0035	0.0002	0.0043	-0.0005
0.10041	0.0375	0.0371	0.0004	0.0377	-0.0002
0.40015	0.1494	0.1491	0.0004	0.1493	0.0001
1.0062	0.3758	0.3756	0.0001	0.3800	-0.0042
2.0101	0.7506	0.7534	-0.0028	0.7537	-0.0030
3.3355	1.2456	1.2507	-0.0051	1.2427	0.0029
5.0018	1.8677	1.8763	-0.0087	1.8550	0.0127
10.0002	3.7328	3.7216	0.0111	3.7120	0.0208
20.0061	7.4573	7.4674	-0.0101	7.4660	-0.0087

그림 3의 전류변성기 비교기의 위상오차 정확도 평가 시스템과 식 (8)과 (9)를 이용하여 음(-)의 영역과 양(+)의 영역에 대한 위상오차의 이론값을 표 3의 두 번째 열에 정리하였다. 또한 A사와 B사의 전류변성기 비교기에 대한 위상오차의 실제 측정값을 표 3의 세 번째 열과 다섯 번째 열에 정리하였다. 표 3의 네 번째 열과 마지막 열은 두 회사의 전류변성기 비교기에 대한 위상오차의 이론값과 측정값의 차이로 전류변성기 비교기에서 측정되는 위상오차에 대한 보정값을 나타낸다. 위상오차의 보정값은 A사 전류변성기 비교기의 경우 음(-)의 영역에서는 $-0.0073 \text{ crad} \sim +0.0139 \text{ crad}$ 이고, 양(+)의 영역에서는 $-0.0101 \text{ crad} \sim +0.0111 \text{ crad}$ 이다. B사 전류변성기 비교기의 경우 음(-)의 영역에서는 $-0.0076 \text{ crad} \sim +0.0558 \text{ crad}$ 이고, 양(+)의 영역에서는 $-0.0087 \text{ crad} \sim +0.0208 \text{ crad}$ 이다.

그림 5는 표 1에서의 전류변성기 비교기의 -7.5 crad 에서 $+7.5 \text{ crad}$ 까지의 위상오차 측정 범위에 따른 이론값 및 측정값, 보정값을 나타낸 것이다. 그림 5에서 보인바와 같이 전류변성기 비교기의 위상오차가 직선성이 잘 유지되고 있음을 쉽게 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 5 위상오차 측정값에 따른 위상오차의 이론값 및 측정값과 보정값. (a) A사[5] (b) B사

Fig. 5 Calculated phase displacement, measured phase displacement, and correction value versus measured range of phase displacement. (a) A company (b) B company

한편 제조사에서 제공하는 전류변성기 비교기의 보정값의 사양은 A사의 경우 0.2 crad 이하의 낮은 범위의 비오차에

대해서는 $10 \mu\text{rad}$ 인 절대값이고, 0.2 crad 이상에서는 측정값의 0.5% 인 상대값으로 주어진다[6]. B사의 경우는 $100 \mu\text{rad}$ 인 절대값에 측정값의 1% 를 더한 값으로 주어진다[7]. 한편 제조사에서 제공하는 사양과 본 연구 결과의 비교를 위해 0.2% 이하에서는 절대값인 보정값을 취하였고, 0.2% 이상에서는 상대값인 측정값의 상대오차를 취하였다. 표 4에 제조사에서 제공하는 사양과 본 연구에서 평가한 결과를 정리하여 나타내었다.

표 4 A사와 B사의 전류변성기 비교기들의 위상오차 평가 결과의 비교.

Table 4 A comparison of evaluation results for phase displacement of CT comparators of A and B companies.

위상오차 범위 [crad]	A사 전류변성기 비교기[5]		B사 전류변성기 비교기	
	제조사	평가 결과	제조사	평가 결과
$0 \sim \pm 0.2$	$\pm 10 \mu\text{rad}$	$\pm 4 \mu\text{rad}$	$\pm 100 \mu\text{rad} +$	$\pm 100 \mu\text{rad} +$
$\pm 0.2 \sim \pm 7.5$	$\text{rdg}^* \times (\pm)0.5 \%$	$\text{rdg} \times (\pm)0.46 \%$	$\text{rdg} \times (\pm)1 \%$	$\text{rdg} \times (\pm)0.61 \%$

* rdg : 전류변성기 비교기의 측정값

표 4에 보인 바와 같이 전류변성기 비교기의 위상오차를 평가한 결과 A사의 경우 0.2 crad 이하에서는 보정값이 최대 $4 \mu\text{rad}$ 의 절대값이고, 0.2 crad 이상에서는 측정값의 상대오차가 0.46% 로 제조사에서 제공한 사양보다 좋게 나오고 있음을 확인할 수 있다. 반면에 B사의 경우는 표 3에서 -7.5 crad 에서 최대 $\pm 100 \mu\text{rad} + \text{rdg} \times (\pm)0.61 \%$ 로 제조사의 사양을 만족하고 있다. 그러나 붉은색으로 표시한 -0.75 crad 부분이 $\pm 100 \mu\text{rad} + \text{rdg} \times (\pm)1.48 \%$ 로 제조사에서 제공한 사양을 만족하지 못하는 것으로 나타나고 있다.

4. 불확도 평가

표준커패시터와 표준저항을 이용한 전류변성기 비교기의 비오차 및 위상오차 정확도 평가의 불확도 평가를 위해 불확도 요인을 찾아 요인별 표준 불확도와 자유도를 구하고, 이로부터 합성 표준 불확도와 유효 자유도를 구한다. 유효 자유도와 신뢰수준에 따른 포함인자를 찾아 합성 표준 불확도에 곱하면 확장 표준불확도가 된다[8]. 여기서 포함인자는 2이므로 확장 표준불확도는 아래와 같이 표현된다.

$$U = 2 \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + \dots} \quad (11)$$

표준커패시터를 이용한 전류변성기 비교기의 비오차 및 위상오차 평가의 불확도 요인을 정리하여 각각 표 5와 6에 나타내었다. 표 5와 6에서 A형 표준불확도 u_A 는 3회 반복측정에서 나타나는 반복측정에 의한 표준불확도이고, B형 표준불확도 u_{B1} 은 전류변성기 비교기의 분해능에 대한 표준불확도이다. u_{B2} 와 u_{B3} (표 6)는 각각 표준커패시터와 표준저항

의 측정값에 대한 표준불확도이다. 표 5와 6에서 A형 표준 불확도 u_A 는 대표적으로 A사의 전류변성기 비교기에 대한 표준불확도를 언급하였는데, 측정 시스템이 동일하므로 B사의 전류변성기 비교기에 대한 B형 표준불확도는 표 5와 6과 동일하고 A형 표준불확도만 다르다. B사 전류변성기 비교기의 A형 표준불확도는 비오차의 경우 0.0000 ~ 0.0020 % 이고, 위상오차의 경우 0.0020 ~ 0.0250 crad 이다. 표 5와 6의 마지막 열에 나타난 상대확장 표준불확도(U_R)는 명목비오차에 대한 확장 표준불확도의 비로 다음과 같이 정의된다.

$$\text{상대확장불확도}(U_R) = \frac{\text{확장불확도}}{\text{명목비오차}} \times 100 [\%] \quad (12)$$

표 5 표준커패시터를 이용한 전류변성기 비교기 비오차 평가의 불확도 총괄표[4].

Table 5 Uncertainty budget of ratio error evaluation for CT comparator using standard capacitors.

명목 비오차 [%]	불확도 요인			합성표준 불확도 (u_c) [%]	확장 표준불확도 U [%]	상대확장 표준불확도 U_R [%]
	반복측정 (u_A) [%]	비교기분해능 (u_B) [%]	표준커패시터 (u_R) [%]			
10.1069	0.0050	0.0029	0.0012	0.0059	0.0119	0.12
5.0525	0.0017	0.0029	0.0005	0.0034	0.0068	0.13
3.0330	0.0017	0.0029	0.0003	0.0033	0.0067	0.22
2.0207	0.0017	0.0029	0.0002	0.0034	0.0067	0.33
1.0105	0.0009	0.0003	0.0001	0.0009	0.0018	0.18
0.1011	0.0002	0.0003	0.0000	0.0004	0.0007	0.69
0.0101	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.87
-0.0101	0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	1.85
-0.1007	0.0002	0.0003	0.0000	0.0004	0.0008	0.75
-0.9982	0.0002	0.0003	-0.0001	0.0004	0.0008	0.08
-1.9762	0.0016	0.0029	-0.0002	0.0033	0.0066	0.34
-2.9372	0.0017	0.0029	-0.0003	0.0034	0.0068	0.23
-4.7989	0.0031	0.0029	-0.0005	0.0043	0.0086	0.18
-9.1594	0.0046	0.0029	-0.0011	0.0056	0.0111	0.12

표 5에서 보인바와 같이 A사 전류변성기 비교기의 비오차 대한 불확도 평가 결과가 0.2 % 이하에서는 절대불확도 0.0001 ~ 0.0008 % 이고, 0.2 % 이상에서는 상대불확도 0.08 ~ 0.34 % 로 계산된다.

표 6 표준커패시터와 표준저항을 이용한 전류변성기 비교기 위상오차 평가의 불확도 총괄표[5].

Table 6 Uncertainty budget for phase displacement evaluation of CT comparator using standard capacitors and standard resistors.

명목 위상오차 [crad]	불확도 요인				합성표준 불확도 (u_c) [crad]	확장 표준불확도 U [crad]	상대확장 표준불확도 U_R [%]
	반복측정 (u_A) [crad]	비교기분해능 (u_B) [crad]	표준커패시터 (u_{RC}) [crad]	표준저항 (u_{RR}) [crad]			
-7.4573	0.0033	0.0029	-0.0004	-0.0037	0.0058	0.0115	0.15
-3.7328	0.0034	0.0029	-0.0002	-0.0019	0.0048	0.0096	0.26
-1.8677	0.0006	0.0029	-0.0001	-0.0009	0.0031	0.0062	0.33
-1.2456	0.0005	0.0003	-0.0001	-0.0006	0.0009	0.0018	0.14
-0.7506	0.0007	0.0003	0.0000	-0.0004	0.0009	0.0017	0.23
-0.3758	0.0003	0.0003	0.0000	-0.0002	0.0004	0.0009	0.24
-0.1494	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	0.0001	0.0002	0.15
-0.0375	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.26
-0.0038	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	2.28
0.0038	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	6.95
0.0375	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0007	1.88
0.1494	0.0004	0.0000	0.0000	0.0001	0.0004	0.0009	0.59
0.3758	0.0006	0.0003	0.0000	0.0002	0.0007	0.0014	0.38
0.7506	0.0008	0.0003	0.0000	0.0004	0.0009	0.0019	0.25
1.2456	0.0005	0.0003	0.0001	0.0006	0.0009	0.0017	0.14
1.8677	0.0005	0.0029	0.0001	0.0009	0.0031	0.0062	0.33
3.7328	0.0004	0.0029	0.0002	0.0019	0.0035	0.0069	0.19
7.4573	0.0035	0.0029	0.0004	0.0037	0.0059	0.0118	0.16

표 6에서 보인바와 같이 A사 전류변성기 비교기의 위상오차 대한 불확도 평가 결과가 0.2 crad 이하에서는 절대불확도 0.0001 ~ 0.0009 crad 이고, 0.2 crad 이상에서는 상대 불확도 0.14 ~ 0.38 % 로 계산된다.

5. 결 론

본 논문에서 값을 정확하게 알고 있는 표준커패시터와 표준저항을 이용하여 전류변성기 비교기에 임의의 비오차와 위상오차를 인가하고, 비오차와 위상오차의 이론값과 측정값

을 비교하여 전류변성기 비교기의 비오차 및 위상오차를 평가하는 기술을 개발하였다. 본 기술을 비오차 측정 범위 0 ~ ±20 % 를 가지고 있는 전류변성기 비교기에 대해 0 ~ ±10 % 의 비오차 측정 범위에 적용하였다. 또한 본 기술을 위상오차 측정 범위 0 ~ ±20 crad 를 가지고 있는 전류변성기 비교기에 대해 0 ~ ±7.5 crad 의 위상오차 측정 범위에 적용하여 평가하였다.

한편 전류변성기 비교기의 비오차와 위상오차 평가 결과를 제조사에서 제공하는 전류변성기 비교기의 사양과 비교하였는데, A사의 전류변성기 비교기의 비오차 및 위상오차가 제조사에서 제공하고 있는 성능보다 좋게 나옴을 알 수 있었다. B사의 전류변성기 비교기의 비오차는 제조사에서 제공하고 있는 성능보다 좋게 나왔으나, 위상오차는 성능을 만족하지 못하는 곳이 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제시한 전류변성기 비교기의 위상오차 평가 방법은 표준준거 시터와 표준저항을 이용하는 비교적 간단한 방법이다. 또한 산업현장에서 바로 적용할 수 있다는 장점을 활용하여 전류변성기 비교기의 자체 평가가 가능하고, 이로 인해 전류변성기 비교기의 성능의 신뢰성 유지와 교정 비용절감 등의 효과가 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국표준협회 “계기용 변성기(표준용 및 일반 계기용)”, KS C 1706, 1982.
- [2] 한국표준협회 “계기용 변성기-제1부:변류기”, KS C IEC 60044-1, 2003.
- [3] Jae Kap Jung, Sung Won Kwon, Sang Hwa Lee, Jeon Hong Kang, “Calibration of Current Transformer”, KRISS, C-13-2-0100-2006(E), 2006.
- [4] 김윤형, 정재갑, 한상길, 한상욱, “전류변성기 비교기의 비오차 평가 기술”, 대한전기학회지, 57P(3호), 291-295, 2008.
- [5] 김윤형, 한상길, 정재갑, 한상욱, “전류변성기 비교기의 위상오차 평가 기술”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 2032-2033, 2008.
- [6] Tettex, “Automatic instrument transformer test set Type 2767”, Haefely Test AG - instrument transformer measurement, 2007. (www.tettex.com)
- [7] Presco AG, “Current transformer test part, Type WD-SP00”, Presco AG - Technical Specifications, 2004. (www.prescoag.com)
- [8] 한국표준협회 “측정 결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침”, KS A 3000, 2005.

저 자 소 개



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



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



정 재 갑 (鄭在甲)

1965년 7월 4일생. 1998년 고려대 물리학과 졸업(박사). 2001년~현재 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹 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. 현재 충남대학교 전기공학과 교수.

Tel : 042-821-5655

Fax : 042-821-8895

E-mail : sohan@cnu.ac.kr