

전류변성기 비교기의 위상오차 평가 기술

김윤형*, 한상길*, 정재갑**, 한상옥*
 충남대학교*, 한국표준과학연구원**

Evaluation technique for phase displacement of current transformer comparator

Yoon Hyoung Kim* · Sang Gil Han* · Jae Kap Jung** · Sang Ok Han*

*Chungnam National University · **Korea Research Institute of Standards and Science

Abstract - We have developed an evaluation technique for phase displacement of current transformer (CT) comparator by using the precise standard capacitors and resistors. By applying this technique for equivalent circuit of CT comparator evaluation system, we can obtain the calculated and measured phase displacement in the CT comparator. Thus we can evaluate phase displacement of CT comparator by comparing the calculated and measured phase displacement. The method was applied to CT comparator under test with the phase displacement ranges of $0 \sim \pm 7.5$ crad. Finally we have compared the phase displacement of the CT comparator under test theoretically obtained in this method with the specification.

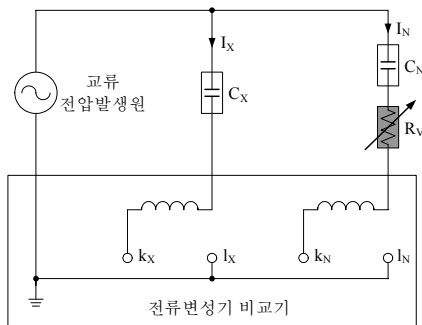
1. 서 론

전류변성기(CT, current transformer)를 생산하는 중전기 업체나 교정시험기관에서는 전류변성기 비교측정시스템을 구축하여 전류변성기의 비오차 및 위상오차를 측정한다. KS 규격에 명시된 전류변성기의 오차 등급은 0.1 급 ~ 3.0 급의 5개 등급으로 나뉘어 있으며, IEC 규격에는 5.0 급이 포함되어 6개 등급으로 나뉘어 있다. 등급에 따라 허용되는 위상오차는 $\pm 5 \text{ min} \sim \pm 180 \text{ min}$ 이하이다[1, 2]. 전류변성기 비교측정시스템의 핵심장비인 전류변성기 비교기는 표준 전류변성기와 피측정 전류변성기의 2차측 전류를 비교하여 피측정 전류변성기의 비오차와 위상오차를 측정하기 위해 사용된다. 따라서 피측정 전류변성기의 오차를 정확하게 측정하기 위해서는 전류변성기 비교기의 성능을 정확하게 평가하여야 한다.

본 논문에서 전류변성기 비교기의 위상오차를 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 위상오차를 평가하는 기술이다. 개발된 기술을 적용하여 전류변성기 비교기의 위상오차를 평가하였다 또한 평가 시스템의 불확도를 분석하였다. 마지막으로 전류변성기 비교기의 제조사에서 제공한 사양과 그 일치도를 비교하고 전류변성기 비교기의 성능을 재평가하였다.

2. 전류변성기 비교기의 위상오차 평가 이론

전류변성기 비교기의 위상오차 평가 시스템은 그림 1과 같고 그림 1의 인자들은 다음과 같다.



〈그림 1〉 전류변성기 비교기의 위상오차 평가 시스템

C_N, C_X : 표준커패시터

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

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

$$\beta = \theta_X - \theta_N \text{ [min or crad]} \quad (1)$$

식 (1)에서 $1 \text{ min} = 0.0291 \text{ crad}$ 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 위상은 커패시턴스에 비례한다. 식 (1)을 이용하여 표준저항 R_V 가 없을 때의 위상오차(β_{0-})와 R_V 를 C_N 에 직렬로 연결했을 때의 위상오차(β_-)를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\beta_{0-} = \omega C_X R_X - \omega C_N R_N \quad (2)$$

$$\beta_- = \omega C_X R_X - \omega C_N (R_N + R_V) = \beta_{0-} - \omega C_N R_N \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)에 의해 R_V 가 없을 때의 위상오차(β_{0-})와 R_V 를 C_N 에 직렬로 연결했을 때의 위상오차(β_-)를 비교하여 다음과 같이 임의의 위상오차의 이론값을 얻을 수 있다.

$$\beta_- - \beta_{0-} = -\omega C_N R_N \quad (4)$$

이때 표준커패시터 C_N, C_X 의 커패시턴스와 표준저항 R_V 의 저항값은 정확하게 알고 있어야 한다. 식 (4)에서 R_V 에 의한 위상오차의 범위는 음(-)의 영역이다.

전류변성기 비교기의 양(+)의 영역에 대한 위상오차 정확도를 평가하기 위해 그림 1에서 k_N 단자와 k_X 단자의 위치를 바꾸고, 동일한 과정을 반복하여 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\beta_+ - \beta_{0+} = \omega C_N R_N \quad (5)$$

따라서 식 (4), (5)를 이용하여 전류변성기 비교기의 위상오차 이론값을 구하고, 이 값을 전류변성기 비교기에서 측정되는 실험값과 비교하여 전류변성기 비교기의 위상오차를 평가할 수 있다.

3. 전류변성기 비교기의 위상오차 평가

본 연구에서 평가한 전류변성기 비교기는 $0 \sim \pm 20 \text{ crad}$ 범위의 위상오차를 측정할 수 있는 A사의 전류변성기 비교기이고, 본 연구에서의 위상오차 평가 범위는 상용되고 있는 전류변성기 비교기의 가장 높은 등급인 5.0 급을 고려하여 위상오차 측정 범위 $0 \sim \pm 7.5 \text{ crad}$ 를 평가하였다. 평가 시스템의 전압발생원으로는 California사의 1251 RP를 이용하여 112 V의 전압을 일정하게 가하면서 실험하였다. 표준커패시터 C_N 과 C_X 는 커패시턴스를 정확하게 알고 있는 정격 10 μF 의 동일한 커패시터를 사용하였다. 전류변성기 비교기의 $0 \sim \pm 7.5 \text{ crad}$ 범위에 대해 임의의 위상오차를 인가하기 위한 표준저항 R_V 의 저항값을 표 1의 첫

번째 열에 정리하였다.

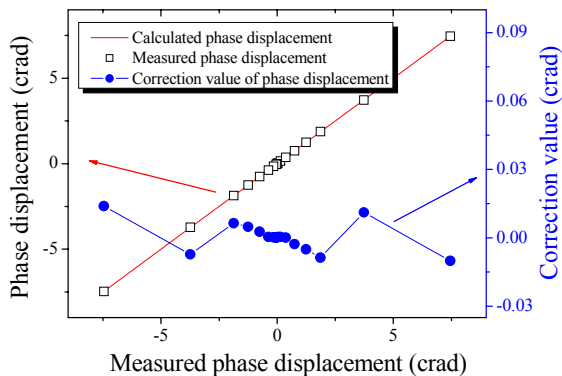
그림 1의 전류변성기 비교기의 위상오차 평가 시스템과 식 (4), (5)를 이용하여 음(-)의 영역과 양(+)의 영역에 대한 위상오차의 이론값과 측정값을 표 1의 두 번째 열과 세 번째 열에 나타내었다. 표 1의 네 번째 열은 위상오차의 이론값과 측정값의 차이로 전류변성기 비교기에서 측정되는 위상오차에 대한 보정값을 나타낸다. 표 1의 마지막 열은 측정값의 상대오차로 다음과 같이 정의된다.

$$\text{측정값의 상대오차} = \frac{\text{측정값} - \text{이론값}}{\text{이론값}} \times 100 [\%] \quad (6)$$

〈표 1〉 전류변성기 비교기의 위상오차 이론값, 측정값, 보정값, 상대오차

저항 [Ω]	R_V 에 의한 위상오차 [crad]			상대오차 [%]
	이론값(A)	측정값(B)	(C=A-B)	
R_V				
20.0061	-7.4573	-7.4712	0.0139	0.1865
10.0002	-3.7328	-3.7255	-0.0073	-0.1958
5.0018	-1.8677	-1.8740	0.0064	0.3405
3.3355	-1.2456	-1.2504	0.0048	0.3862
2.0101	-0.7506	-0.7534	0.0027	0.3626
1.0062	-0.3758	-0.3761	0.0004	0.0979
0.40015	-0.1494	-0.1496	0.0002	0.1115
0.10041	-0.0375	-0.0375	0.0000	0.0734
0.01014	-0.0038	-0.0039	0.0001	2.9916
0.01014	0.0038	0.0035	0.0002	-6.5154
0.10041	0.0375	0.0371	0.0004	-1.1133
0.40015	0.1494	0.1491	0.0004	-0.2398
1.0062	0.3758	0.3756	0.0001	-0.0352
2.0101	0.7506	0.7534	-0.0028	0.3697
3.3355	1.2456	1.2507	-0.0051	0.4103
5.0018	1.8677	1.8763	-0.0087	0.4637
10.0002	3.7328	3.7216	0.0111	-0.2985
20.0061	7.4573	7.4674	-0.0101	0.1358

그림 2는 표 1에의 위상오차 측정 범위에 따른 이론값, 측정값 및 보정값을 나타낸 것이다.



〈그림 2〉 측정값에 따른 위상오차의 이론값, 측정값 및 보정값

한편 제조사에서 제공하는 전류변성기 비교기의 보정값의 사양을 정리하여 표 2의 두 번째 열에 나타내었다[3]. 제조사 제공 사양과 본 연구 결과의 비교를 위해 0.2 crad 이하에서는 절대값인 보정값을 취하고, 0.2 crad 이상에서는 상대값인 측정값의 상대오차를 취하여 이를 표 2의 세 번째 열에 정리하였다.

〈표 2〉 전류변성기 비교기의 위상오차 평가 결과

위상오차 범위 [crad]	제조사	평가 결과
0 ~ ± 0.2	±10 ppm	±4 ppm
± 0.2 ~ ± 20	rdg × (±)0.5 %	rdg × (±)0.46 %

4. 전류변성기 비교기의 위상오차 평가 시스템의 불확도 평가

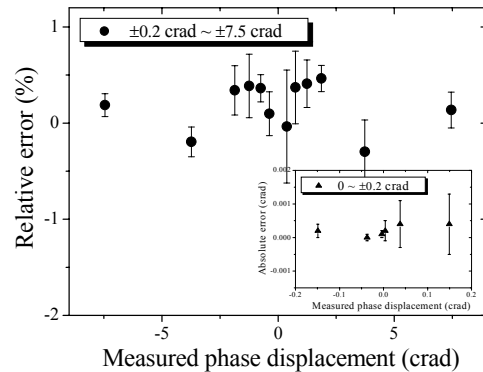
표준커패시터와 표준저항을 이용한 전류변성기 비교기의 위상오차 평가의 불확도 평가를 위해 불확도 요인을 찾아 요인별 표준 불확도와 자유도를 구하고, 이로부터 합성 표준 불확도와 유효 자유도를 구한다. 유효 자유도와 신뢰수준에 따른 포함인자를 찾아 합성 표준 불확도에 곱하면 확장 불확도가 된다[4]. 여기서 포함인자는 2이므로 확장 불확도(U)는 아래와 같이 표현된다.

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + \dots} \quad (7)$$

표준커패시터와 표준저항을 이용한 전류변성기 비교기의 위상오차 평가의 불확도 요인에서 A형 불확도 u_A 는 3회 반복측정에서 나타나는 반복측정에 의한 불확도이고, B형 불확도 u_{B1} 은 전류변성기 비교기의 분해능에 의한 불확도이다. u_{B2} , u_{B3} 는 각각 표준커패시터와 표준저항의 측정값에 대한 불확도이다. 상대확장 불확도(U_R)는 명목위상오차에 대한 확장불확도의 비로 다음과 같이 정의된다.

$$\text{상대확장불확도}(U_R) = \frac{\text{확장불확도}}{\text{명목위상오차}} \times 100 [\%] \quad (8)$$

그림 3은 위상오차 0.2 crad 이하와 0.2 crad 이상의 영역에 대한 절대오차, 상대오차를 확장불확도, 상대확장불확도와 함께 나타낸 것이다.



〈그림 3〉 측정값에 따른 위상오차의 절대오차, 상대오차 및 불확도

3. 결 론

본 논문에서 표준커패시터와 표준저항을 이용하여 전류변성기 비교기의 위상오차를 평가하는 기술을 개발하였다. 본 기술을 0 ~ ±20 crad의 위상오차 측정 범위를 가지고 있는 전류변성기 비교기에 대해 0 ~ ±7.5 crad의 위상오차 범위에 적용하여 평가하였다. 한편 전류변성기 비교기의 위상오차 평가 결과를 ±0.2 crad 이하의 위상오차 범위와, ±0.2 ~ ±7.5 crad의 위상오차 범위로 나누어 평가하여 제조사에서 제공하는 전류변성기 비교기의 사양과 비교하였는데, 전류변성기 비교기의 위상오차가 제조사에서 제공하고 있는 성능보다 좋게 나옴을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시한 전류변성기 비교기의 위상오차 평가 방법은 표준커패시터와 표준저항을 이용하는 비교적 간단한 방법이다. 또한 산업현장에서 바로 적용할 수 있다는 장점을 활용하여 전류변성기 비교기의 자체 평가가 가능하고, 이로 인해 전류변성기 비교기의 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] Tettex, “Automatic instrument transformer test set Type 2767”, Haefely Test AG - instrument transformer measurement, 2007. (www.tettex.com)
- [4] 한국표준협회 “측정 결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침”, KS A 3000, 2005.