

Absolute Evaluation Method to Obtain Ratio Error and Phase Displacement of Current Transformers

金潤亨* · 鄭在甲[†] · 韓相吉* · 丘庚完** · 韓相玉***

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

Abstract - We have developed an absolute evaluation method to obtain the ratio error and phase displacement of a current transformer (CT) without any precise standard CT by measuring four parameters in a CT equivalent circuit. The excitation admittance in the CT equivalent circuit can be obtained by employing standard resistors with negligible reactive component. The secondary leakage impedance in the CT equivalent circuit can be measured using a universal impedance bridge. The method was applied to CTs under test with the wide current ratios in the range of 5 A / 5 A - 5,000 A / 5 A and 5 A / 1 A - 5,000 A / 1 A. The ratio error and phase displacement of the CT under test obtained in this study are consistent with those measured at the national institute in Canada using the same CT under test within an expanded uncertainty ($k = 2$) in the overall current ratios.

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

1. 서 론

전류변성기(Current Transformer, CT)는 변압기를 생산하는 중전기기 업체에서 대전류를 정확하게 측정하기 위해 사용된다. 전류변성기를 평가하는데 많이 이용되는 방법은 전류비교기를 이용하여 피측정 전류변성기의 2차 전류를 오차를 무시할 수 있는 표준 전류변성기의 2차 전류와 비교 측정하는 것이다. 이를 위해 표준 전류변성기의 오차는 정확하게 평가하여 알고 있어야 한다. 또한 표준 전류변성기를 평가하기 위해서는 정확도가 표준 전류변성기보다 우수한 국가표준기관에서 보유하고 있는 오차 0.005 %이하의 초정밀 표준 전류변성기를 이용하여 평가하여야 한다. 따라서 전류변성기를 평가하는 것은 과정이 복잡하고, 상대적인 비교 측정 방법이기 때문에 표준기로 사용하는 표준 전류변성기의 성능에 의존할 수 밖에 없다.

본 연구에서 전류변성기의 오차를 절대 평가하기 위한 새로운 기술을 개발하였다. 이 기술은 전류변성기의 오차에 연관되는 네 가지 인자(G_m , B_m , R_2 , X_2)를 독립적으로 측정하여 전류변성기의 오차를 절대 평가하는 기술이다. 이 기술을 이용해 표준 전류변성기의 성능에 의존하지 않고도 피측정 전류변성기의 오차를 정확하게 얻을 수 있다. 이를 위해 현재 한국표준과학연구원(KRISS)에서 보유하고 있는 20 kA급 전류변성기 비교 측정 시스템을 활용한다. 한국표준과학연구원의 전류변성기 비교 측정 시스템과 저항성분에 대한 인

덕턴스성분이 10^{-6} 이하로 리액턴스성분을 무시할 수 있는 표준정밀저항을 이용하여 전류변성기의 여자어드미턴스(G_m , B_m)를 측정할 수 있다. 전류변성기의 2차 누설임피던스(R_2 , X_2)는 정밀급의 멀티미터를 이용하여 측정할 수 있다. 이렇게 얻어진 네 가지 인자를 이용하여 피측정 전류변성기의 비오차와 위상오차를 구할 수 있다. 이 기술의 타당성을 검증하기 위해 동일한 전류변성기에 대한 캐나다 국가표준기관(NRC)의 비오차 및 위상오차 측정 결과를 네 가지 인자를 이용해 얻은 피측정 전류변성기의 오차와 비교 분석하였다.

2. 전류변성기의 비오차 및 위상오차의 측정 이론

전류변성기는 정상 사용 상태에서 실질적으로 전류비가 권선비에 반비례하고, 방향이 적절하게 연결되어 2차 전류의 위상이 1차 전류에 비해 거의 영인 계기용 변성기이다. 전류변성기의 비오차와 위상오차는 정격 주파수에서 2차 부단이 정격 부단의 특정 범위에 있을 때 일정 수치를 초과할 수 없도록 규정되어 있다[1, 2]. 전류변성기의 2차측에 부담(Z_b)을 연결했을 때 전류변성기의 등가회로는 그림 1과 같고, 각 인자들은 다음과 같다[3, 4].

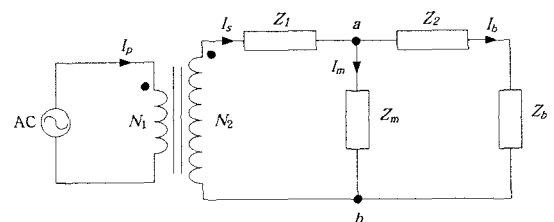


그림 1 2차 부담 Z_b 가 있을 때 전류변성기의 등가회로.
Fig. 1 The equivalent circuit for a CT with an external burden Z_b .

* 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 : 湖西大學校 國防科學技術學科 教授 · 工博

*** 正會員 : 忠南大學校 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 4月 1日

最終完了 : 2008年 4月 23日

$Z_m = R_m + jX_m$: 여자임피던스(excitation impedance)

$Z_1 = R_1 + jX_1$: 1차 누설임피던스(primary leakage impedance)

$Z_2 = R_2 + jX_2$: 2차 누설임피던스(secondary leakage impedance)

$Z_b = R_b + jX_b$: 2차 부담의 임피던스(impedance of external burden)

I_p : 실제 1차 전류(actual primary current)

I_s : 누설이 없고 무한대의 여자임피던스를 가진 전류변성기의 이상적인 2차 전류(ideal secondary current with no leakage impedance and infinite excitation impedance)

I_b : 2차 부담이 있을 때 실제 2차 전류(actual secondary current with burden)

I_m : 여자전류(exciting current)

N_1 : 1차 권선수(number of primary windings)

N_2 : 2차 권선수(number of secondary windings)

누설전류가 없고 무한대의 여자임피던스를 가진 전류변성기의 전류비는 권선비에 반비례하므로 식 (1)과 같다.

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_2}{N_1} = N \quad (1)$$

여기서, N 은 전류변성기의 정격권선비 혹은 정격변환비이다.

전류변성기의 1차 전류(I_p)와 부담에 흐르는 실제 2차 전류(I_b)의 전류벡터는 아래와 같이 복소 벡터로 나타낼 수 있다.

$$I_p = |I_p|e^{j\theta_p} \quad (2)$$

$$I_b = |I_b|e^{j\theta_b} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 $|I_p|$ 와 $|I_b|$ 는 각각 전류벡터 I_p 와 I_b 의 크기이고, θ_p 와 θ_b 는 각각 전류벡터 I_p 와 I_b 의 위상이다. 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 전류변성기의 부담에 흐르는 2차 전류(I_b)에 대한 1차 전류(I_p)의 복소비는 아래와 같다.

$$\frac{I_p}{I_b} = \frac{|I_p|}{|I_b|} e^{j(\theta_p - \theta_b)} = NRCF_b e^{-j(\theta_b - \theta_p)} \quad (4)$$

식 (4)에서 $(\theta_b - \theta_p)$ 는 부담이 있을 때 전류변성기의 1차 전류와 2차 전류의 위상차이 즉 위상오차(β_b)로 2차 전류의 위상이 1차 전류를 앞설 때 정(lead), 반대일 경우 부(lag)이다[1, 2]. RCF_b 는 부담이 있을 때의 비 보정인자(ratio

correction factor)로 전류변성기의 실제 변환비(N_b)를 정격 변환비(N)로 나눈 것으로 정의하고 비오차가 영인 이상적인 전류변성기의 비 보정인자는 1이다. 비 보정인자(RCF_b)와 비오차(α_b)의 관계는 식 (5)와 같다[5].

$$RCF_b = 1 - \alpha_b \quad (5)$$

전류변성기는 0.1 %이내의 것을 사용하기 때문에 $(\theta_b - \theta_p)$ 는 10^{-3} 이하로 작다. 따라서 식 (4)의 $e^{-j(\theta_b - \theta_p)}$ 의 급수전개에서 2차항 이상은 10^{-6} 보다 작으므로 무시할 수 있다. 식 (5)를 이용하여 식 (4)를 다시 쓰면 아래와 같다.

$$\frac{I_p}{I_b} = N(1 - \alpha_b)(1 - j\beta_b) \cong N(1 - \alpha_b - j\beta_b) \quad (6)$$

식 (6)에서 $\alpha_b\beta_b$ 는 10^{-6} 보다 작으므로 무시하였다.

그림 1의 전류변성기 등가회로에서 전류변성기의 2차측에 흐르는 전류(I_s)는 여자전류(I_m)와 부담에 흐르는 실제 2차 전류(I_b)의 합이므로 식 (7)과 같다. 또한 단자 a와 b의 전압 강하가 같으므로 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$I_s = I_m + I_b \quad (7)$$

$$I_m Z_m = I_b (Z_2 + Z_b) \quad (8)$$

식 (1), (7), (8)을 이용하여 전류변성기의 부담에 흐르는 2차 전류(I_b)에 대한 1차 전류(I_p)의 관계를 정리하면 아래와 같다.

$$\frac{I_p}{I_b} = N \left(1 + \frac{Z_2 + Z_b}{Z_m} \right) \quad (9)$$

식 (6)과 식 (9)의 실수부와 허수부를 비교하면 2차 부담이 있을 때 전류변성기의 비오차(α_b)와 위상오차(β_b)는 각각 다음과 같다.

$$\alpha_b = -\operatorname{Re} \left(\frac{Z_2 + Z_b}{Z_m} \right) = -G_m (R_2 + R_b) - B_m (X_2 + X_b) \quad (10)$$

$$\beta_b = -\operatorname{Im} \left(\frac{Z_2 + Z_b}{Z_m} \right) = -G_m (X_2 + X_b) + B_m (R_2 + R_b) \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)의 인자 G_m 과 B_m 은 각각 여자컨덕턴스와 여자서셉턴스이고 다음과 같다.

$$G_m = \frac{R_m}{R_m^2 + X_m^2} \quad (12)$$

$$B_m = \frac{X_m}{R_m^2 + X_m^2} \quad (13)$$

전류변성기의 2차측에 연결되는 부담($Z_b = R_b + jX_b$)은 쉽게 측정할 수 있기 때문에 네 가지 인자 G_m, B_m, R_2, X_2 를 독립적으로 측정하면 식 (10)과 식 (11)에 의해 2차 부담이 있을 때 전류변성기의 비오차와 위상오차를 알 수 있다.

3. 측정 시스템 구성 및 측정 방법

3.1 전류변성기 비교측정시스템의 구성

그림 2는 전류변성기 비교측정시스템의 구성도이다. 전류변성기 비교측정시스템은 대전류 발생원, 표준 전류변성기, 피측정 전류변성기, 전류변성기 비교기와 전류변성기용 부담으로 구성되어 있다. 동일한 교류 대전류를 표준 전류변성기와 피측정 전류변성기의 1차측에 직렬로 공급하고, 전류변성기 비교기에서 두 전류변성기의 2차 전류를 비교해서 비오차와 위상오차를 측정한다.

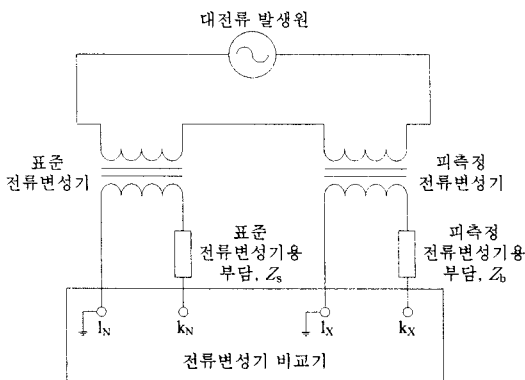


그림 2 전류변성기 비교측정시스템의 구성.

Fig. 2 The constitution of the CT comparison measuring system.

본 연구에서 사용된 전류변성기 비교기는 Tettex사의 2767이다. 제조사에서 제공한 전류변성기 비교기의 불확도는 비오차의 경우 10×10^{-6} 이고 위상오차의 경우 10×10^{-6} rad이다[6]. 피측정 전류변성기는 A사와 B사의 전류변성기를 이용하였고 전류변성기용 부담으로 저항의 인덕턴스 성분을 무시할 수 있는($L/R < 10^{-6}$) Tinsley사의 표준정밀저항을 사용하였다[7]. 피측정 전류변성기의 1, 2차 전류와 표준정밀저항값을 표 1에 정리하였다.

표 1 피측정 전류변성기의 1, 2차 전류와 표준정밀저항 값의 범위.

Table 1 Current ratios of CTs under test and range of standard resistors.

피측정 전류변성기	1차 전류 [A]	2차 전류 [A]	표준정밀저항 값의 범위 [Ω]
A사	30 ~ 1500	5	0.01 ~ 1
B사	5 ~ 5000	1	0.1 ~ 10
		5	0.01 ~ 1

3.2 G_m, B_m, R_2, X_2 의 측정 방법

식 (10)과 식 (11)에 따라 2차 부담이 있을 때 피측정 전류변성기의 비오차와 위상오차를 얻기 위해 전류변성기 등가회로의 네 가지 인자(G_m, B_m, R_2, X_2)를 측정해야 한다. 다음에서 네 가지 인자를 독립적으로 측정하는 방법에 대해 설명한다.

3.2.1 G_m, B_m 의 측정

피측정 전류변성기의 부담(Z_b)으로 저항의 인덕턴스 성분을 무시할 수 있는 표준정밀저항을[7] 사용하면($X_b = 0$) 식 (10)과 식 (11)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\alpha_b = -(G_m R_2 + B_m X_2 + G_m R_b) = constant - G_m R_b \quad (14)$$

$$\beta_b = -G_m X_2 + B_m R_2 + B_m R_b = constant + B_m R_b \quad (15)$$

식 (14)와 식 (15)에서 피측정 전류변성기의 2차 전류를 일정하게 하고, 부담(R_b)을 변화시키면 G_m, B_m, R_2, X_2 는 상수로 일정하다. 따라서 피측정 전류변성기의 2차 전류를 일정하게 유지하고 R_b 를 변화시키면서 전류변성기 비교측정 시스템에서 측정된 전류변성기의 비오차(α_b)와 위상오차(β_b)를 R_b 에 대한 함수로 나타내면 기울기가 각각 $-G_m$ 과 B_m 이 된다. 이 방법은 상대적으로 기울기를 얻는 측정 방법 이므로 여자어드미턴스(excitation admittance) G_m 과 B_m 은 표준 전류변성기가 가지고 있는 오차에 무관한 독립적인 값이다.

3.2.2 R_2, X_2 의 측정

피측정 전류변성기의 2차 권선저항 R_2 는 1차 단자를 단락시키고 2차 단자의 저항을 멀티미터로 측정해서 쉽게 얻을 수 있다. 한편 전류변성기의 1, 2차 누설임피던스 Z_1 과 Z_2 는 따로 측정하기가 힘들다. 1, 2차 권선의 전체 누설임피던스 Z_{tot} 는 1차 단자를 단락시키고 2차 단자의 입력임피던스를 측정해서 얻을 수 있다. 이 때 전체 임피던스 $Z_{tot} = \sqrt{R_{tot}^2 + (X_{tot})^2}$ 이다. 여기서 $X_{tot} = \omega L_{tot}$ 로 전류변성기의 전체 리액턴스이고, L_{tot} 는 다음과 같다[8].

$$L_{tot} = L_2 + N^2 L_1 \quad (16)$$

식 (16)에서 L_1, L_2 는 각각 1, 2차 누설인덕턴스이고 N 은 정격 변환비이다. 한편 전류변성기의 2차 권선은 단층으로 코일에 근접하여 감겨있기 때문에 전류변성기의 1차 누설인덕턴스 L_1 에 비해 2차 누설인덕턴스 L_2 는 매우 작다. 따라서 X_2 는 무시할 수 있다[9-11].

4. 측정 결과

그림 3과 그림 4는 A사 전류변성기의 전류비 100 A / 5 A탭에서 G_m 과 B_m 의 측정 결과이다.

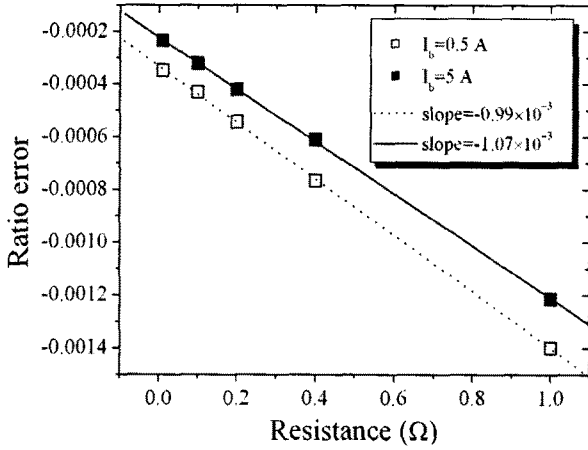


그림 3 전류비 100 A / 5 A 탭에서 표준저항부담의 변화에 따른 전류변성기의 비오차 측정결과.

Fig. 3 Ratio errors of a CT measured using different standard resistors.

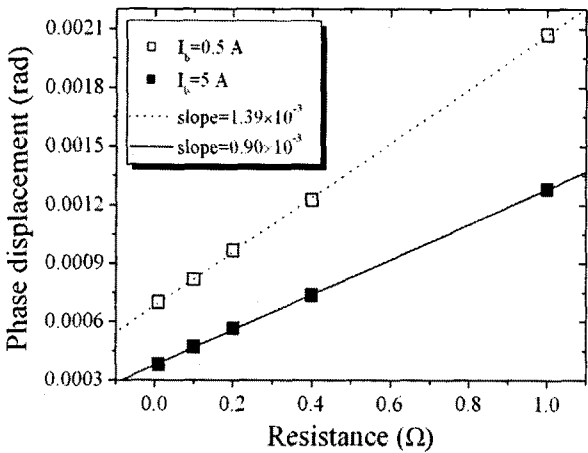


그림 4 전류비 100 A / 5 A 탭에서 표준저항부담의 변화에 따른 전류변성기의 위상오차 측정결과.

Fig. 4 Phase displacement of a CT measured using different standard resistors.

그림 3과 그림 4에서 2차 전류를 0.5 A와 5 A로 유지하고 표준저항부담을 변화시키면서 측정한 비오차와 위상오차를 저항값에 대해 피팅한 결과 2차 전류가 0.5 A일 때 $G_m = 1.07 \times 10^{-3}$ S이고, $B_m = 1.39 \times 10^{-3}$ S이다. 2차 전류가 5 A일 때 $G_m = 0.99 \times 10^{-3}$ S이고, $B_m = 0.90 \times 10^{-3}$ S이다. 동일한 방법으로 A사 전류변성기의 나머지 탭과 B사 전류변성기의 모든 탭에서 측정한 G_m 과 B_m 을 표 2, 3, 4의 세 번째 열에 나타내었다.

A사 전류변성기의 각각의 전류 탭별로 2차 권선저항 R_2 를 측정하여 그 값을 표 2의 네 번째 열에 정리하였다. 마찬가지로 B사의 전류변성기도 각 탭별로 2차 권선저항 R_2 를 측정하였고 그 값을 표 3, 4의 네 번째 열에 정리하였다.

표 2 A사 전류변성기의 여자어드미턴스(G_m , B_m)와 2차 권선저항(R_2).

Table 2 The excitation admittance and secondary winding resistance of A company CT.

전류비 (A / A)	2차 전류 (%)	여자어드미턴스 (S)		2차 권선저항 R_2 (Ω)
		$G_m (\times 10^{-3})$	$B_m (\times 10^{-3})$	
30 / 5	10	1.27	1.38	0.25
	100	0.95	0.78	0.25
100 / 5	10	1.12	1.38	0.25
	100	1.02	0.85	0.25
500 / 5	10	1.10	1.43	0.25
	100	0.94	0.80	0.25
750 / 5	10	1.04	1.32	0.25
	100	0.94	0.83	0.25
1500 / 5	10	1.01	1.38	0.25
	100	0.94	0.87	0.25

표 3 B사 전류변성기의 2차 전류 1 A일 때 여자어드미턴스(G_m , B_m)와 2차 권선저항(R_2).

Table 3 The excitation admittance and secondary winding resistance of B company CT with secondary current of 1 A.

전류비 (A / A)	2차 전류 (%)	여자어드미턴스 (S)		2차 권선저항 R_2 (Ω)
		$G_m (\times 10^{-6})$	$B_m (\times 10^{-6})$	
5 / 1	5	1.39	-1.30	3.25
	10	1.33	-1.25	3.25
	20	1.17	-1.28	3.25
	50	1.22	-1.37	3.25
	100	1.35	-1.16	3.25
10 / 1	5	0.88	-1.10	3.25
	10	0.98	-0.75	3.25
	20	0.87	-0.81	3.25
	50	0.85	-0.79	3.25
	100	0.96	-0.72	3.25
100 / 1	5	0.64	-1.06	3.20
	10	0.72	-0.93	3.20
	20	0.64	-0.84	3.20
	50	0.66	-0.91	3.20
	100	0.75	-0.92	3.20
1000 / 1	5	0.76	-0.17	3.20
	10	0.77	0.09	3.20
	20	0.72	0.03	3.20
	50	0.77	0.01	3.20
	100	0.86	0.39	3.20
5000 / 1	5	0.67	-0.47	3.15
	10	0.66	-0.31	3.15
	20	0.60	-0.40	3.15
	50	0.57	-0.39	3.15
	100	0.65	-0.38	3.15

표 4 B사 전류변성기의 2차 전류 5 A일 때 여자어드미턴스(G_m, B_m)와 2차 권선저항(R_2).

Table 4 The excitation admittance and secondary winding resistance of B company CT with secondary current of 5 A.

전류비 (A / A)	2차 전류 (%)	여자어드미턴스 (S)		2차 권선저항 R_2 (Ω)
		$G_m(\times 10^{-6})$	$B_m(\times 10^{-6})$	
5 / 5	5	12.53	-7.81	0.50
	10	13.50	-8.55	0.50
	20	13.40	-9.44	0.50
	50	14.20	-10.14	0.50
	100	15.03	-9.30	0.50
10 / 5	5	5.38	4.74	0.70
	10	5.97	4.36	0.70
	20	5.92	4.16	0.70
	50	6.01	4.04	0.70
	100	6.14	5.45	0.70
50 / 5	5	4.31	3.97	0.46
	10	4.08	4.38	0.46
	20	4.52	4.45	0.46
	50	4.79	4.72	0.46
	100	5.22	5.43	0.46
100 / 5	5	2.40	1.62	0.11
	10	2.19	1.40	0.11
	20	2.28	1.72	0.11
	50	2.17	1.63	0.11
	100	2.27	2.13	0.11
500 / 5	5	2.65	1.46	0.10
	10	2.43	1.60	0.10
	20	1.74	1.52	0.10
	50	2.40	1.72	0.10
	100	2.12	1.81	0.10
1000 / 5	5	4.79	4.45	0.45
	10	4.17	3.64	0.45
	20	4.36	4.37	0.45
	50	4.74	4.01	0.45
	100	4.96	4.35	0.45
5000 / 5	5	1.39	0.72	0.65
	10	1.54	0.78	0.65
	20	1.05	0.81	0.65
	50	1.05	0.90	0.65
	100	1.43	1.31	0.65

5. 측정 결과의 비교 분석

A사의 전류변성기에서 측정한 네 가지 인자(G_m, B_m, R_2, X_2)와 식 (10)과 식 (11)을 이용해 부담이 영일 때($R_b=0, X_b=0$)의 비오차(α_0)와 위상오차(β_0)를 계산하여 이를 표 5의 세 번째 열에 정리하였다. 본 연구에서 개발한 방법을 적용해 얻은 A사의 전류변성기에 대한 오차의 확장 불확도($k=2$)는 파라미터 모델링 오차를 포함해서 비오차는 100×10^{-6} 이고, 위상오차는 128×10^{-6} rad이다[5]. 여기서 k 는 유효 자유도이고, 확장 불확도 U 는 k 와 합성 불확도 u_c

의 곱($U=ku_c$)으로 정의되어 진다[12]. 동일한 전류변성기에 대해 캐나다 국가표준기관(NRC)에서 측정한 결과를 표 5의 네 번째 열에 나타내었다. 표 5에 나타난 A사의 전류변성기에 대한 NRC에서 측정한 오차의 확장 불확도($k=2$)는 비오차는 200×10^{-6} 이고, 위상오차는 200×10^{-6} rad이다[13]. 네 가지 인자를 이용해 얻은 비오차와 위상오차의 KRISS 실험값과 NRC 측정값과의 차이를 표 5의 마지막 열에 나타내었다.

표 5 영 부담일 때 A사의 전류변성기에 대한 KRISS 실험값과 NRC 측정값 비교.

Table 5 A comparison of the CT errors of A company measured at KRISS and NRC with zero burden.

전류비 (A / A)	2차 전류 (%)	KRISS 실험값		NRC 측정값		NRC와 KRISS 실험값의 차이	
		$\alpha_0(\%)$	$\beta_0(\text{crad})$	$\alpha_0(\%)$	$\beta_0(\text{crad})$	$\Delta \alpha_0(\%)$	$\Delta \beta_0(\text{crad})$
30 / 5	10	-0.0322	0.0348	-0.0200	0.0400	0.0122	0.0052
	100	-0.0242	0.0197	-0.0200	0.0200	0.0042	0.0003
100 / 5	10	-0.0285	0.0350	-0.0200	0.0500	0.0085	0.0150
	100	-0.0259	0.0215	-0.0200	0.0200	0.0059	-0.0015
500 / 5	10	-0.0279	0.0363	-0.0500	0.0600	-0.0221	0.0237
	100	-0.0238	0.0202	-0.0200	0.0300	0.0038	0.0098
750 / 5	10	-0.0262	0.0334	-0.0500	0.0600	-0.0238	0.0266
	100	-0.0239	0.0209	-0.0200	0.0200	0.0039	-0.0009
1500 / 5	10	-0.0255	0.0348	-0.0500	0.0600	-0.0245	0.0252
	100	-0.0239	0.0219	-0.0200	0.0200	0.0039	-0.0019

표 5에서 보인 바와 같이 A사의 전류변성기의 전류비 30 A / 5 A ~ 1500 A / 5 A일 때 네 가지 인자를 이용해 얻은 KRISS 실험값과 NRC 측정결과의 차이가 비오차의 경우 0.0038 ~ 0.0245 % 이고, 위상오차의 경우 0.0003 ~ 0.0266 crad이다. 따라서 모든 범위의 전류비에 대해 비오차와 위상오차가 두 기관에서 제시한 확장 불확도 내에서 일치함을 알 수 있다.

한편 B사의 전류변성기는 NRC에서 측정한 결과가 부담이 5 VA/PF=1일 때의 결과이므로 이에 해당하는 부담값은 $R_b=0.2, X_b=0$ 이다. B사의 전류변성기에서 측정한 네 가지 인자(G_m, B_m, R_2, X_2)와 R_b 그리고 식 (10)과 식 (11)을 이용해 부담이 5 VA/PF=1일 때의 비오차(α_b)와 위상오차(β_b)를 계산하여 이를 표 6, 7의 세 번째 열에 정리하였다. 본 연구에서 개발한 방법을 적용해 얻은 B사의 전류변성기에 대한 오차의 확장 불확도($k=2$)는 비오차는 20×10^{-6} 이고, 위상오차는 20×10^{-6} rad이다[5]. 동일한 전류변성기를 NRC에서 측정한 결과를 표 6, 7의 네 번째 열에 나타내었다. 표 6, 7에 나타난 B사의 전류변성기에 대한 NRC에서 측정된 오차의 확장 불확도($k=2$)는 비오차는 20×10^{-6} 이고, 위상오차는 20×10^{-6} rad이다[14]. 네 가지 인자를 이용해 얻은 비오차와 위상오차의 KRISS 실험값과 NRC 측정값과의 차이를 표 6, 7의 마지막 열에 나타내었다.

표 6 부담 5 VA/PF=1일 때 B사 전류변성기의 2차 전류 1 A에 대한 KRISS 실험값과 NRC 측정값 비교.
Table 6 A comparison of the CT errors of B company measured at KRISS and NRC with burden 5 VA/PF=1 and secondary current 1 A.

전류비 (A / A)	2차 전류 (%)	KRISS 실험값		NRC 측정값		NRC와 KRISS 실험값의 차이	
		α_b (%)	β_b (crad)	α_b (%)	β_b (crad)	$\Delta\alpha_b$ (%)	$\Delta\beta_b$ (crad)
5 / 1	5	-0.0005	-0.0004	-0.0004	-0.0006	0.0001	-0.0002
	10	-0.0005	-0.0004	-0.0006	-0.0007	-0.0002	-0.0003
	20	-0.0004	-0.0004	-0.0007	-0.0008	-0.0003	-0.0003
	50	-0.0004	-0.0005	-0.0007	-0.0009	-0.0003	-0.0004
	100	-0.0005	-0.0004	-0.0007	-0.0010	-0.0002	-0.0006
10 / 1	5	-0.0003	-0.0004	-0.0005	0.0007	-0.0002	0.0011
	10	-0.0003	-0.0003	-0.0005	0.0007	-0.0002	0.0010
	20	-0.0003	-0.0003	-0.0005	0.0006	-0.0002	0.0009
	50	-0.0003	-0.0003	-0.0005	0.0006	-0.0002	0.0009
	100	-0.0003	-0.0002	-0.0005	0.0006	-0.0002	0.0009
100 / 1	5	-0.0002	-0.0004	-0.0003	0.0010	-0.0001	0.0013
	10	-0.0002	-0.0003	-0.0003	0.0010	-0.0001	0.0013
	20	-0.0002	-0.0003	-0.0003	0.0010	-0.0001	0.0013
	50	-0.0002	-0.0003	-0.0003	0.0009	-0.0001	0.0012
	100	-0.0003	-0.0003	-0.0003	0.0009	0.0000	0.0012
1000 / 1	5	-0.0003	-0.0001	0.0002	0.0006	0.0005	0.0007
	10	-0.0003	0.0000	0.0002	0.0006	0.0005	0.0006
	20	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0005	0.0005	0.0005
	50	-0.0003	0.0000	0.0002	0.0005	0.0005	0.0005
	100	-0.0003	0.0001	0.0001	0.0005	0.0004	0.0004
5000 / 1	5	-0.0002	-0.0002	0.0027	0.0005	0.0029	0.0007
	10	-0.0002	-0.0001	0.0025	0.0006	0.0027	0.0007
	20	-0.0002	-0.0001	0.0022	0.0007	0.0024	0.0008
	50	-0.0002	-0.0001	0.0017	0.0008	0.0019	0.0009
	100	-0.0002	-0.0001	0.0015	0.0007	0.0017	0.0008

표 6에서 보인 바와 같이 B사의 전류변성기의 전류비 5 A / 1 A ~ 5000 A / 1 A일 때 네 가지 인자를 이용해 얻은 KRISS 실험값과 NRC 측정결과의 차이가 비오차의 경우 0.0000 ~ 0.0029 %이고, 위상오차의 경우 0.0000 ~ 0.0013 crad이다. 따라서 모든 범위의 전류비에 대해 비오차와 위상오차가 두 기관에서 제시한 확장 불확도 내에서 일치함을 알 수 있다.

표 7에서 보인 바와 같이 B사의 전류변성기의 전류비 5 A / 5 A ~ 5000 A / 5 A일 때 네 가지 인자를 이용해 얻은 KRISS 실험값과 NRC 측정결과의 차이가 비오차의 경우 0.0000 ~ 0.0007 %이고, 위상오차의 경우 0.0000 ~ 0.0008 crad이다. 따라서 모든 범위의 전류비에 대해 비오차와 위상오차가 두 기관에서 제시한 확장 불확도 내에서 일치함을 알 수 있다.

표 7 부담 5 VA/PF=1일 때 B사 전류변성기의 2차 전류 5 A에 대한 KRISS 실험값과 NRC 측정값 비교.
Table 7 A comparison of the CT errors of B company measured at KRISS and NRC with burden 5 VA/PF=1 and secondary current 5 A.

전류비 (A / A)	2차 전류 (%)	KRISS 실험값		NRC 측정값		NRC와 KRISS 실험값의 차이	
		α_b (%)	β_b (crad)	α_b (%)	β_b (crad)	$\Delta\alpha_b$ (%)	$\Delta\beta_b$ (crad)
5 / 5	5	-0.0009	-0.0005	-0.0003	-0.0012	0.0006	-0.0007
	10	-0.0009	-0.0006	-0.0003	-0.0013	0.0006	-0.0007
	20	-0.0009	-0.0007	-0.0004	-0.0013	0.0005	-0.0006
	50	-0.0010	-0.0007	-0.0004	-0.0014	0.0006	-0.0007
	100	-0.0011	-0.0007	-0.0004	-0.0015	0.0007	-0.0008
10 / 5	5	-0.0005	0.0004	-0.0002	0.0001	0.0003	-0.0003
	10	-0.0005	0.0004	-0.0002	0.0000	0.0003	-0.0004
	20	-0.0005	0.0004	-0.0003	0.0000	0.0002	-0.0004
	50	-0.0005	0.0004	-0.0003	0.0000	0.0002	-0.0004
	100	-0.0006	0.0005	-0.0003	0.0000	0.0003	-0.0005
50 / 5	5	-0.0003	0.0003	-0.0002	0.0003	0.0001	0.0000
	10	-0.0003	0.0003	-0.0002	0.0003	0.0001	0.0000
	20	-0.0003	0.0003	-0.0002	0.0003	0.0001	0.0000
	50	-0.0003	0.0003	-0.0002	0.0003	0.0001	0.0000
	100	-0.0003	0.0004	-0.0002	0.0003	0.0001	-0.0001
100 / 5	5	-0.0001	0.0000	-0.0001	0.0003	0.0000	0.0003
	10	-0.0001	0.0000	-0.0001	0.0003	0.0000	0.0003
	20	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0003	0.0000	0.0002
	50	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0003	0.0000	0.0002
	100	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0003	0.0000	0.0002
500 / 5	5	-0.0001	0.0000	-0.0002	0.0003	-0.0001	0.0003
	10	-0.0001	0.0000	-0.0002	0.0003	-0.0001	0.0003
	20	-0.0001	0.0000	-0.0002	0.0003	-0.0001	0.0003
	50	-0.0001	0.0001	-0.0002	0.0003	-0.0001	0.0002
	100	-0.0001	0.0001	-0.0002	0.0003	-0.0001	0.0002
1000 / 5	5	-0.0003	0.0003	-0.0001	0.0003	0.0002	0.0000
	10	-0.0003	0.0002	-0.0002	0.0003	0.0001	0.0001
	20	-0.0003	0.0003	-0.0002	0.0003	0.0001	0.0000
	50	-0.0003	0.0003	-0.0002	0.0003	0.0001	0.0000
	100	-0.0003	0.0003	-0.0002	0.0003	0.0001	0.0000
5000 / 5	5	-0.0001	0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0000	-0.0002
	10	-0.0001	0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0000	-0.0002
	20	-0.0001	0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0000	-0.0002
	50	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001
	100	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001

6. 결 론

본 연구에서 피측정 전류변성기를 절대 평가하는 기술을 개발하였다. 이 기술은 전류변성기의 비오차와 위상오차를 오차에 연관되는 인자들의 독립 측정으로부터 얻는 방법으로 피측정 전류변성기의 오차를 표준 전류변성기의 성능에 의존하지 않고 절대 평가 할 수 있다. 개발된 방법을 전류비 30 A / 5 A ~ 1500 A / 5 A의 범위를 갖는 전류변성

기와 전류비 5 A / 5 A ~ 5000 A / 5 A 그리고 5 A / 1 A ~ 5000 A / 1 A의 범위를 갖는 전류변성기에 적용하였다. 개발한 기술의 타당성을 검증하기 위해 본 기술을 적용하여 얻은 오차 측정 결과를 동일한 전류변성기에 대한 캐나다 국가표준기관(NRC)에서의 측정값과 비교하였고, 비교 결과 피측정 전류변성기의 모든 범위의 전류비에 대해 비오차와 위상오차가 서로의 확장 불확도 내에서 일치하고 있다. 이는 본 연구에서 개발한 전류변성기의 비오차와 위상오차 절대 평가 방법이 타당성이 있음을 보여주고 있다. 기존에 이용되던 전류변성기 평가가 표준기와의 상대 비교 측정을 통해 가능해졌지만, 본 기술은 전류변성기 비교측정시스템이 구축되어 있는 산업 현장에 적용하면 표준정밀저항과 멀티미터를 이용하여 전류변성기의 오차를 절대 측정할 수 있는 비교적 간단한 방법이다. 또한 현장에서 사용되고 있는 전류변성기를 표준기관으로 이동하지 않아도 전류변성기의 자체 평가가 가능하다는 장점을 활용하여 비용 절감과 교정기간 단축 등의 효과를 얻을 수 있을 것이다.

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] J. D. Ramboz and O. Petersons, “A calibration service for current transformers”, NIST Special Publication, vol. 250, No 36, p60, 1991.
- [4] 정재갑, 권성원, 이상화, 박영태, “전류변성기 비오차와 위상각오차의 계산값과 실험값의 차에 의한 측정시스템 유용성 검증기술에 관한 연구”, 대한전기학회지, 53C, 213-7, 2004.
- [5] Jae Kap Jung, Sung Won Kwon, Sang Hwa Lee, Jeon Hong Kang, “Calibration of Current Transformer”, KRIS, C-13-2-0100-2006(E), 2006.
- [6] Tettex, “Automatic instrument transformer test set Type 2767”, Haefely Test AG - instrument transformer measurement, 2007. (www.tettex.com)
- [7] Tinsley, “Precision Resistance Measurement”, Tinsley Precision Instruments, 1995. (www.tinsley.co.uk)
- [8] Voltech instruments, “Measuring leakage inductance”, VOLTECH NOTES VPN 104-105/2, 2001. (www.voltech.com)
- [9] H. W. Price and C. K. Duff, “Effects of magnetic leakage in current transformers”, University of Toronto Research Bulletin, No. 2, 167-90, 1921.
- [10] P. J. Betts , “Calculated temperature coefficients of transformers”, Australia National Measurement Laboratory Technical Paper, No. 4, 1-13, 1977.
- [11] D. Slomovitz and H. Souza, “Shielded electronic current transformer”, IEEE Trans. on Instrum. and Measurement, 54, 500-2, 2005.
- [12] 한국표준협회 “측정 결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침”, KS A 3000, 2005.
- [13] Calibration of Yokogawa current transformer (Model

: 2242, S/N : 03004) in NRC (INMS Reference No: 410961, Reference: NRC Form 32)

[14] Calibration of Tettex current transformer (Model : 4764, S/N : 153606) in NRC (INMS Reference No: 410961, Reference: NRC Form 32)

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



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 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



구 경 완 (丘庚完)

1961년 2월 5일생. 1983년 충남대학교 전자공학교육과 졸업. 1992년 충남대학교 전자공학과 졸업(박사). 현재 호서대학교 국방과학기술학과 교수.
Tel : 041-540-9541
E-mail : alarmkoo@hoseo.edu



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