전류변성기 비교 측정 장치의 비오차 및 위상각 오차의 직선성 현장 평가기술

論 文
55C-6-6

On-Site Evaluation Technique of Linearity for Ratio Error and Phase Angle Error of Current Transformer Comparison Measurement Equipment

鄭 在 甲† · 權 聖 遠* · 李 相 和** · 姜 銓 洪** · 金 明 壽***
(Jae-Kap Jung · Sung-Won Kwon · Sang-Hwa Lee · Jeon-Hong Kang · Myungsoo Kim)

Abstract - A method for evaluation of the linearity of both the ratio error and phase angle error in the current transformer(CT) comparison measurement equipment has been developed by employing the standard resistors with negligible AC-DC resistance difference less than 10^{-5}. The non-reactive standard resistors for the linearity check of the system are used as the external burden connected with the secondary of CT under test. These burdens consist of nine standard resistors, with the nominal resistance of 0.01 Ω, 0.1 Ω, 0.2 Ω, 0.4 Ω, 0.6 Ω, 1 Ω, 2 Ω, 4 Ω, and 10 Ω. For linearity check, the developed method has been applied in the CT comparison measurement equipment belonging to the industry.

Key Words : Current Transformer, Ratio Error, Phase Angle Error, Burdens, Linearity

1. 서 론

중전기기 산업체에서는 전류변성기 비교측정 장치를 이용하여 피측정 전류변성기(current transformer, CT)의 비오차와 위상각 오차를 측정한다. 전류변성기 비교 측정 장치는 작은 범위의 오차를(±0.1 % 이내) 갖는 피측정 CT의 오차를 비교적 정확하게 측정할 수 있다. 그러나 ±0.1 % 이상의 큰 범위의 오차를 갖는 피측정 CT를 측정할 때 비교측정 장치의 오차 측정 눈금이 약간 틀어져 있다면 정확한 측정이 어려워 보정(correction)을 요한다. 이를 위해서 전류변성기 비교 측정 장치에서 측정된 작은 범위의 오차 측정값이 넓은 범위까지도 직선성을 그대로 유지하고 있는가를 평가하는 것은 아주 중요하고, 이는 곧 측정 장치 교정(calibration)의 중요한 핵심기술이다.

한편 산업체에서 활용되고 있는 전류변성기 비교 측정시스템은 크기가 크고, 무거워서 운반하기가 힘들뿐만 아니라, 제품의 품질관리 및 교정시험용으로 빈번히 사용되기 때문에 이 장치를 교정시험기관으로 운반하여 성능을 평가(교정)받기는 거의 불가능하다. 이러한 이유에서 산업체의 전류변성기 비교 측정시스템의 평가를 위해서는 이동이 용이한 현장용 표준기를 개발하여 이를 산업체로 가져가서 현장에서 직접 전류변성기 측정장치를 평가하는 방법이 요구된다.

본 연구는 피측정 CT의 2차측에 리액턴스 성분이 저항성분과 비교하여 10^{-5} 이하로 무시할 수 있는 순수한 저항성분으로 이루어진 정밀저항부담(precise resistance burden)을 직렬로 연결하여 전류변성기 비교 측정 장치에서 측정된 비오차와 위상각 오차의 직선성을 평가할 수 있는 기술을 최초로 개발했다. 정밀저항부담은 작고 무게가 가벼워, 이를 산업체로 운송하여 현장에서 측정 장치를 평가할 수 있는 장점이 있다. 또한 이 기술은 다양한 정격변환비를 갖는 모든 전류변성기에 공통으로 적용할 수 있는 방법으로서, 이를 산업체의 전류변성기 비교 측정 장치에 적용하여 비교 측정장치의 직선성을 평가했다. 최근에 리액턴스 성분을 무시할수 있는 저항부담을 사용하여 전압변성기(voltage transformer) 비교측정 장치의 비오차와 위상각 오차의 직선성을 평가 할 수 있는 방법을 개발하였다.[1] 전압변성기 측정장치의 평가방법과 비교하여 본 연구에서 개발한 기술은 전류변성기 비교측정 장치의 직선성을 평가하는 기술이다. 두 가지의 평가방법의 기본이론 및 등가회로 분석, 평가원리는 명백히 서로 다르다.

† 교신저자, 正會員 : 한국표준과학연구원 책임연구원
E-mail : jkjung@kriss.re.kr
* 正 會 員 : 한국표준과학연구원 책임연구원
** 正 會 員 : 한국표준과학연구원 선임연구원
*** 正 會 員 : 한국표준과학연구원, 표준보급부장
接受日字 : 2006年 2月 23日
最終完了 : 2006年 4月 6日

2. 전류변성기 비교측정 장치의 직선성 평가원리

전류변성기의 외부 부담 Z_b가 있을 때 등가회로는 그림 1과 같다.[2,3] 그림 1에서 N_1 과 N_2는 각각 1차측 및 2차측 권선수이고, N은 전류변성기의 정격 권선비(rated transformation ratio) 이다.

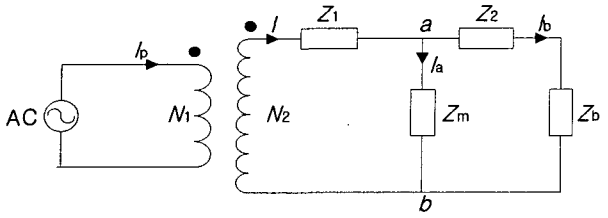

그림 1. 외부부담 Z_b 가 있을때의 전류변성기의 등가회로
Fig. 1. An equivalent circuit for current transformer with burden Z_b

외부 부담 Z_b 가 있을 때의 전류 변성기의 비오차(ratio error, α_b)와 위상각 오차(phase angle error, β_b)는 아래와 같이 쓸 수 있다.[3, 4]

$$\alpha_b = -[G_m(R_2+R_b)+B_m(X_2+X_b)] \quad (1)$$

$$\beta_b = B_m(R_2+R_b)-G_m(X_2+X_b) \quad (2)$$

식 (1) 와 (2)의 각 인자들은 아래와 같다.

$Z_1 = R_1 + jX_1$: 전류변성기의 1차 누설 임피던스(primary leakage impedance)

$Z_2 = R_2 + jX_2$: 전류변성기의 2차 누설 임피던스(secondary leakage impedance)

$Z_m = R_m + jX_m$: 자화임피던스(magnetizing impedance)

$Z_b = R_b + jX_b$: 외부부담의 임피던스

$G_m = \dfrac{R_m}{R_m^2 + X_m^2}$: 컨덕턴스(conductance)

$B_m = \dfrac{X_m}{R_m^2 + X_m^2}$: 서셉턴스(susceptance)

외부부담의 임피던스($Z_b = R_b + jX_b$)는 리액턴스 성분이 저항성분과 비교하여 10^{-5} 이하로, 즉 $\dfrac{X_b}{R_b} < 10^{-5}$ 인 영국 Tinsley 사의 표준저항을[5] 사용하면 식 (1)와 (2)에서 X_b는 무시할 수 있다. 또한 전류변성기의 2차전류를 일정하게 유지하고 외부부담 R_b 만을 변화시킬때 G_m, B_m, R_2, X_2는 상수이다. 따라서 부담이 있을때의 비오차와 위상각 오차는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\alpha_b \cong -(G_m R_2 + B_m X_2 + G_m R_b) = constant - G_m R_b \quad (3)$$

$$\beta_b \cong B_m R_2 - G_m X_2 + B_m R_b = constant + B_m R_b \quad (4)$$

식 (3)의 부담이 있을 때의 비오차(α_b)와 식 (4)의 부담이 있을 때의 위상각 오차(β_b)는 부담의 저항값에 선형적으로 비례한다($\sim R_b$). 따라서 R_b의 값을 변화시켜 가면서 얻은 α_b 와 β_b를 R_b의 함수로 피팅하여 국내 회사에서 보유하고 있는 전류변성기 비교 측정 장치의 비오차와 위상각 오차의 직선성을 평가할 수 있다.

3. 전류변성기 비교 측정 장치의 비오차 및 위상각 오차의 직선성 평가결과 및 논의

국내 산업체에서 보유하고 있는 전류 변성기 비교 측정 시스템 구성도를 그림 2에 나타내었다. 표준 전류변성기(reference current transformer)와 피측정 전류변성기(test current transformer)의 1차측에 동일한 대전류를 직렬로 공급하고, 두 전류변성기의 2차측의 전류를 전류 비교기(오차 측정 장치)를 이용하여 비교한다. 이 방법은 피측정 전류 변성기와 비교하여 비오차와 위상각 오차를 무시할 수 있는 표준 전류 변성기를 기준으로 피측정 전류 변성기의 비오차와 위상각 오차를 측정한다. KS 규정에 의해 피측정 전류변성기의 2차측 단자 에 직렬로 부담(Z_b)을 그림 2와 같이 연결하여 측정하도록 되어있다.[6] 국내 회사에서 활용하고 있는 전류변성기 비교 측정 장치는 모두 외국회사의 제품으로 미국 Knopp 사, 스위스 Tettex 사, 일본의 Soken 사 등의 제품을 사용하고 있다.

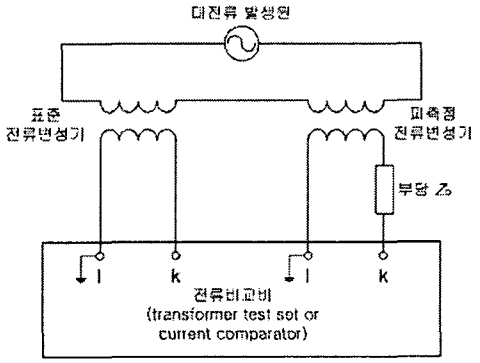

그림 2. 전류변성기 비교 측정 시스템의 구성
Fig. 2. Constitution of current transformer comparison measurement system

국내 회사에서 보유하고 있는 전류변성기 비교 측정 장치의 비오차와 위상각 오차 눈금의 직선성을 피측정 전류변성기의 2차측에 연결하는 표준저항부담(Z_b = R_b)을 변화하여 평가하였다. 여기서 비오차와 위상각 오차의 직선성은 각각 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 평가하였다. 사용한 표준저항부담은 영국 Tinsley 사의 제품으로서 정격이 각각 0.01 Ω, 0.1 Ω, 0.2 Ω, 0.4 Ω, 0.6 Ω, 1 Ω, 2 Ω, 4 Ω, 10 Ω 이고, 정격용량은 모두 10 W 이다. 여기서 사용한 피측정 전류변성기는 YEW사의 모델 2242를 사용하였고, 전류정격비는 1차측 전류가 100 A 인데 2차측 전류 5 A로서, 2차 전류를 1 A로 유지하면서 측정하였다. 표준저항부담 중에서 저항값이 제일 큰 10 Ω의 표준저항의 경우, 정격용량이 10 W 이고 이에 해당하는 1 A의 전류를 가하면서 측정하였다. 10 Ω 이하의 다른 표준저항에서도 10 Ω 표준저항과 동일한 전류에서

측정해야 되기 때문에 1 A로 통일하여 측정을 하였다.

국내 2개 회사에서 보유하고 있는 전류변성기 비교 측정 장치에서 표준저항으로 구성된 부담값을 변화시켜가면서 측정한 피측정 전류변성기의 비오차에 대한 결과를 그림 3 에 나타내었다. 그림 3 에서 표준저항부담 0.01 Ω ~ 10 Ω 범위에서 측정된 비오차의 범위는 -0.686 % ~ +0.01 % 이고, 그림 3 의 두 실선은 식 (3)을 이용하여 최소제곱법으로 분석한 결과이다. A사의 경우 부담저항이 0.01 Ω ~ 2 Ω까지는 직선성이 잘 유지되다가 4 Ω에서 윗방향으로 +0.014 % 벗어나기 시작하여, 10 Ω에서 윗방향으로 +0.052 % 크게 벗어난다는 것을 알 수 있다. B사의 경우 A 사와 유사하게 부담저항이 0.01 Ω ~ 2 Ω까지는 직선성이 잘 유지되다가 10 Ω에서 윗방향으로 +0.035 % 크게 벗어난다는 것을 알 수 있다. 두 회사의 경우 비오차가 작은 범위에서는 직선성이 잘 유지되다가, 비오차가 커지면서 직선성이 점점 크게 벗어난다는 것을 알 수 있다. A 사와 B 사의 경우 전류변성기 비교 측정 장치에서 측정된 비오차를 상기의 벗어난 크기만큼 아랫방향으로(그림 3의 화살표 방향) 보정해야 하고 보정값을 그림 3의 괄호안에 나타내었다.

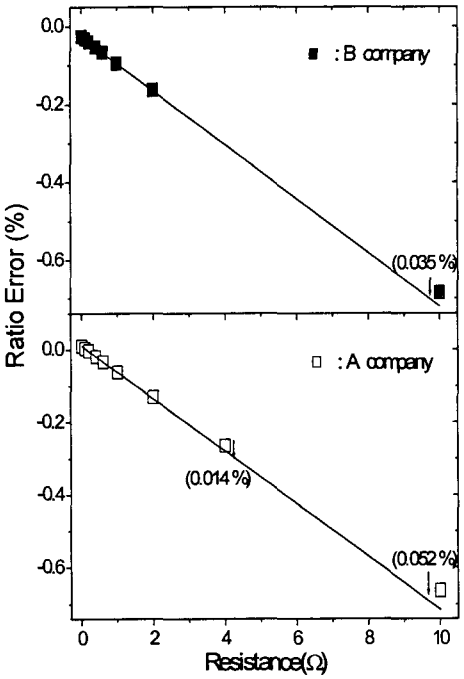

그림 3. 표준저항 부담의 저항값에 따른 비오차의 변화
Fig. 3. A change of ratio error as a function of resistance of the standard resistance burden

국내 2개 회사에서 보유하고 있는 전류변성기 비교 측정 장치에서 표준저항으로 구성된 부담값을 변화시켜가면서 측정한 피측정 전류변성기의 위상오차에 대한 결과를 그림4에 나타내었다. 그림 4에서 표준저항부담 0.01 Ω ~ 10 Ω 범위에서 측정된 위상오차의 범위는 0.00023 rad ~ 0.00631 rad 이고, 그림 4의 두 실선은 식 (4)을 이용하여 최소제곱법으로 분석한 결과이다. A사의 경우 부담저항이 0.01 Ω ~ 1 Ω까지는 직선성이 잘 유지되다가 2 Ω에서 아래방향으로 +0.00015 rad 벗어나기 시작하여, 4 Ω에서 아래방향으로 +0.00062 rad 벗어나고 10 Ω에서 아래방향으로 0.00295 rad 크게 벗어난다는 것을 알 수 있다. B사의 경우 A 사와 유사하게 부담저항이 0.01 Ω ~ 1 Ω까지는 직선성이 잘 유지되다가 2 Ω에서 아래방향으로 +0.00014 rad 벗어나기 시작하여, 10 Ω에서 아래방향으로 0.00234 rad 크게 벗어난다는 것을 알 수 있다. 두 회사의 경우 위상오차가 작은 범위에서는 직선성이 잘 유지되다가, 위상오차가 크지면서 직선성이 점점 크게 벗어난다는 것을 알 수 있다. A 사와 B 사의 경우 전류변성기 비교 측정 장치에서 측정된 위상오차를 상기의 벗어난 크기만큼 윗방향으로(그림 4의 화살표 방향) 보정해야 하고 보정값을 그림 4의 괄호안에 나타내었다.

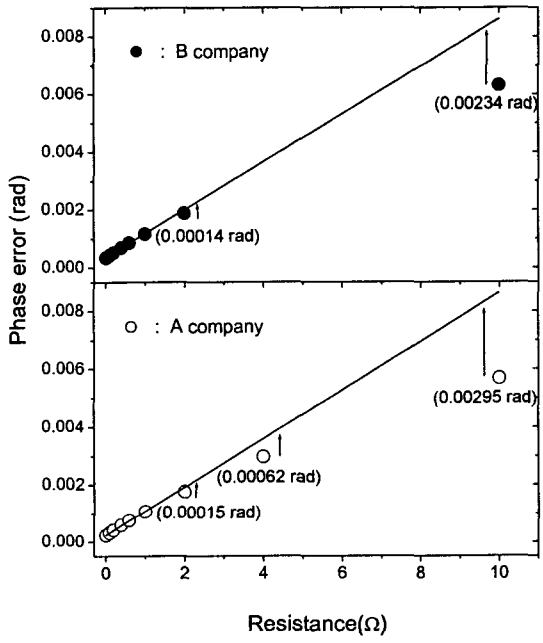

그림 4. 표준저항 부담의 저항값에 따른 위상각 오차의 변화
Fig. 4. A change of phase angle error as a function of resistance of the standard resistance burden

4. 결 론

피측정 전류변성기의 2차측에 저항값의 직-교류 차이가 거의 없는 표준저항으로 구성된 부담을 연결하여 전류변성기 비교 측정 장치의 비오차와 위상각 오차의 직선성을 평가할 수 있는 기술을 개발했다. 이 방법을 산업체에서 보유하고 있는 전류변성기 비교 측정 장치에 적용한 결과 A사의 경우 비오차가 -0.663 % 에서 최대 -0.052 % 의 보정이 필요하고, 위상각 오차가 0.00568 rad 에서 최대 +0.00295 rad 의 보정이 필요함을 알았다. B사의 경우 비오차가 -0.686 % 에서 최대 -0.035 %의 보정이 필요하고, 위상각 오차가 0.00631 rad 에서 최대 +0.00234 rad 의 보정이 필요함을 알았다. 표준저항부담을 이용한 전류변성기의 비교측정 장치의 직선성 평가방법은 산업체의 비오차 시험기의 직선성 평가에 유용하게 적용되어 관련제품의 품질향상에 크게 기여할 것으로 확신한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업인프라구축지원사업의 "연구시험설비구축사업"의 지원으로 이루어진 것입니다.

참 고 문 헌

[1] 정재갑, 권성원, 박영태 "전압변성기 비교 측정 장치의 비오차 및 위상각 오차의 직선성 평가기술", 대한전기학회지, 53C권(9호), 470-474(2004)

[2] John D. Ramboz and O. Petersons, "A Calibration Service for Current Transformers" NIST Special Publication, vol. 250, No. 36, p66(1991).

[3] 정재갑, 권성원, 이상화, 박영태 "전류변성기의 비오차와 위상각 오차의 계산값과 실험값의 차에 의한 측정 시스템 유용성 검증기술에 관한 연구", 대한전기학회지, 53C 권(4호). 213-217(2004).

[4] P. J. Betts, "Calculated Temperature Coefficients of Transformers" National Measurement Laboratory Technical Paper No 4, pp. 1-13(1977)

[5] Tinsley "Precision Resistance Measurement", Tinsley Precision Instruments 1995.

[6] 한국표준협회, "계기용변성기(표준용 및 일반계기용)", KS C 1706, 1982.

저 자 소 개

정 재 갑(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

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

이 상 화(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

강 전 홍(姜 銓 洪)

1963년 2월 8일생, 1988년 대전한밭대 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2004년 충남대학교 전기공학과 박사과정, 1988년-2004년 현재 : 한국표준과학연구원 기반표준부 선임연구원

Tel : 042-868-5152

Fax : 042-868-5018

E-mail : jhkang@kriss.re.kr

김 명 수(金 明 壽)

1954년 8월 26일생. 1977년 서울공대 화공과졸업. 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