

표준전압변성기 두 대를 이용한 전자식 전압변성기의 오차 평가

한상길*, 김운형*, 정재갑**, 강전홍**, 이상화**, 한상옥*
 충남대학교*, 한국표준과학연구원**

Evaluation of Errors of Electronic Voltage Transformer using Two Standard Voltage Transformers

Sang-Gil Han*, Yoon-Hyoung Kim*, Jae-Kap Jung**, Jeon-Hong Kang, Sang-Hwa Lee, Sang-Ok Han*
 Chungnam University*, Korea Research Institute of Standards and Science**

Abstract - 현재 전압변성기는 기존의 철심형 전압변성기에서 전자식 전압변성기로 변화하고 있으며, 전자식 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 정확하게 평가하는 것은 전자식 전압변성기의 보급에 중요하다. 표준전압변성기 두 대와 전압변성기 비교기를 이용하여 22 kV급 전자식 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 평가할 수 있는 시스템을 구축하였으며, 시스템의 불확도를 분석하였다.

1. 서 론

철심형 전압변성기는 무계가 무겁고 소음이 심하며, 2차측 출력전압이 높아서 디지털 계전기 또는 전력 IT 분야에 사용이 힘들다는 단점이 있다. 따라서 현재 전자식 전압변성기의 개발 및 연구가 활발히 진행되고 있으며, 수요 또한 증가하고 있는 추세이다. 전자식 전압변성기는 저항과 커패시터 값의 오차, 부유커패시턴스 등으로 인해 출력전압의 비오차와 위상각 오차가 발생하고, 이러한 비오차와 위상각 오차를 평가하는 것은 전력품질의 신뢰성 향상을 위해 중요한 부분이다^[1-4].

철심형 전압변성기의 2차측 전압이 110 V 정도인 것에 비해 전자식 전압변성기의 2차측 전압은 1 V ~ 6 V 정도로서 전압변성기 비교기를 이용하여 철심형 전압변성기와 전자식 전압변성기의 2차측 전압을 상호 비교하여 비오차와 위상각 오차를 구하는 것은 어려운 상황이다.

따라서 본 논문에서는 최근 수요가 증가하고 있는 전자식 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 정확하게 평가하기 위해 표준전압변성기 두 대를 이용하여 전자식 전압변성기 수준의 2차측 전압을 갖는 표준전압변성기를 구성하였다. 또한 고전압 전기용량 브리지와 표준용량분압기를 이용하여 표준전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 평가하였다. 전압변성기 비교기를 이용하여 두 대의 표준전압변성기로 구성된 표준전압변성기와 전자식 전압변성기의 2차측 전압을 상호 비교하여 전자식 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 평가하였으며, 평가시스템의 불확도를 분석하였다.

2. 시스템 구성 및 평가 결과

표준전압변성기 두 대와 전압변성기 비교기를 이용하여 전자식 전압변성기를 평가하기 위한 과정은 다음 순서에 의해 이루어진다.

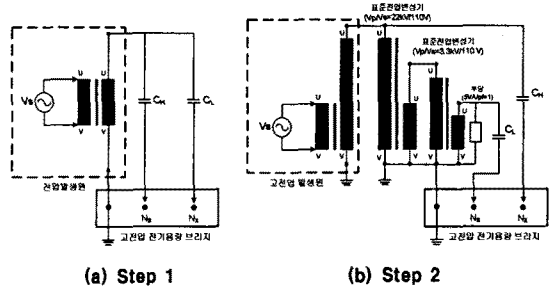
- (가) 고전압 전기용량 브리지와 표준용량분압기를 이용하여 표준전압변성기 두 대의 합성 비오차와 위상각 오차를 평가한다.
- (나) 평가된 표준전압변성기 두 대와 전압변성기 비교기를 이용하여 전자식 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 평가한다.

2.1 표준전압변성기 두 대의 합성 오차 평가(가)

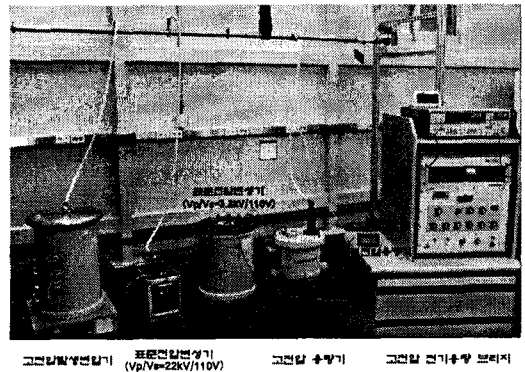
2.1.1 평가시스템의 구성 및 평가 방법

고전압 전기용량 브리지와 표준용량분압기를 이용하여 1차측 전압과 2차측 전압이 각각 22 kV와 110V, 3.3 kV와 110V인 표준전압변성기 두 대의 합성 오차를 평가하기 위한 시스템의 구성도는 <그림 1>과 같고, 시스템의 실제 구성 사진은 <그림 2>와 같다.

<그림 2>와 같이 평가는 고전압 용량기와 저전압 용량기의 비를 평가하는 첫 번째 과정(Step 1)과 평가된 두 대의 용량기를 이용하여 표준전압변성기 두 대의 합성 오차를 평가하는 과정(Step 2)으로 진행된다^[5]. 표준용량기는 용량값이 1000 pF이고 정격전압이 30 kV인 고전압 용량기와 용량값이 100 nF이고 정격전압이 250 V인 저전압 용량기를 사용하였다.



(a) Step 1 (b) Step 2
 <그림 1> 표준전압변성기 두 대의 합성 오차 평가시스템의 구성도



<그림 2> 표준전압변성기 두 대의 합성 오차 평가시스템의 실제 구성 사진

첫 번째 과정은 <그림 1(a)>와 같이 고전압 용량기(C_H)와 저전압 용량기(C_L)의 비를 평가하는 것이다. 전압변성기 2차측 전압을 저전압 용량기와 고전압 용량기의 H 단자에 연결하고, 저전압 용량기의 L 단자는 고전압 전기용량 브리지의 N_X 단자에 고전압 용량기의 L 단자는 고전압 전기용량 브리지의 N_S 단자에 연결한다. 전압변성기 1차측에 전압을 가하여 동일한 전압을 저전압 용량기와 고전압 용량기에 가하고, 전기용량 브리지의 용량비와 손실계수 다이얼을 돌려 고전압 용량기와 저전압 용량기에 동일한 전류가 흐를 때를 Lock-In Amplifier를 이용하여 찾는다.

이때, 저전압 용량기(C_L)와 고전압 용량기(C_H) 양측에 흐르는 전류는 같으므로 식 (1), 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega C_L V_S N_X = \omega C_H V_S N_S \quad (1)$$

$$\therefore \frac{C_L}{C_H} = \left(\frac{N_S}{N_X} \right)_1 \quad (2)$$

즉, 식 (2)와 같이 고전압 용량기에 대한 저전압 용량기의 비 (C_L/C_H)는 전기용량 브리지의 용량비 다이얼의 셋팅값인 (N_S/N_X)₁와 같다.

두 번째 과정은 <그림 1(b)>와 <그림 2>와 같이 고전압 발생변압기의 고압측에 표준전압변성기($V_p/V_s=22kV/110V$)의 1차측과 고전압 용량기의 H 단자가 연결되며, 고전압 용량기의 L 단자는 고전압 전기용량 브리지의 N_X 에 연결된다. 표준전압변성기($V_p/V_s=22kV/110V$)의 2차측 단자 즉, 110 V 출력 단자에 표준전압변성기($V_p/V_s=3.3kV/110V$)의 1차측이 연결되고, 표준전압변성기($V_p/V_s=3.3kV/110V$)의 2차측 단자는 저전압 용량기의 H 단자에 연결되며 저전압 용량기의 L 단자는 고전압 전기용량 브리지의 N_S 에 연결된다. 고전압발생 변압기에 전압을 공급하여 고전압을 발생시킨 상태에서 전기용량 브리지의 용량비와 손실계수 다이얼을 돌려 고전압 용량기와 저전압 용량기에 동일한 전류가 흐를 때를 Lock-In Amplifier를 이용하여 찾는다.

이때, 표준전압변성기 두 대의 출력전압에 대한 입력 고전압의 복소비는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\therefore \frac{V_p}{V_s} = N \cdot RCF(1-j\Gamma) = \left(\frac{C_L}{C_H} \right) \left(\frac{N_S}{N_X} \right)_2 (1-jD) \quad (3)$$

여기서 N 은 표준 전압변성기(22kV/110V)의 정격변환비, RCF 는 비보정인자, D 는 손실계수이다.

따라서 식 (2)와 식 (3)에 의해 비보정인자와 비오차, 위상각 오차는 각각 식 (4)와 식 (5), 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$RCF = \left(\frac{N_S}{N_X} \right)_1 \left(\frac{N_S}{N_X} \right)_2 / N \quad (4)$$

$$RE = \left[1 - \left(\frac{N_S}{N_X} \right)_1 \left(\frac{N_S}{N_X} \right)_2 / N \right] \times 100 [\%] \quad (5)$$

$$\Gamma = D \quad (6)$$

2.1.2 평가 결과

고전압 발생변압기의 1차측 전압의 80% ~ 110%의 범위에서 표준전압변성기 두 대의 합성 비오차와 위상각 오차를 4회 측정하였고, <표 1>와 <표 2>에 각각 나타내었다. 또한 측정값의 평균값을 마지막 열에 나타내었다.

<표 1> 두 대의 표준전압변성기의 합성 비오차

(단위 : %)

전압	1차	2차	3차	4차	평균
80%	-0.006	-0.007	-0.007	-0.008	-0.007
100%	-0.009	-0.010	-0.010	-0.011	-0.010
110%	-0.014	-0.014	-0.015	-0.015	-0.014

<표 2> 두 대의 표준전압변성기의 합성 위상각 오차

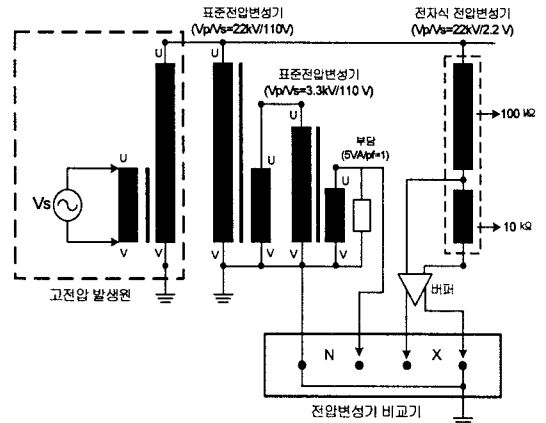
(단위 : min)

전압	1차	2차	3차	4차	평균
80%	-0.98	-0.97	-0.95	-1.00	-0.98
100%	-0.93	-0.92	-0.94	-0.96	-0.94
110%	-0.87	-0.87	-0.89	-0.90	-0.88

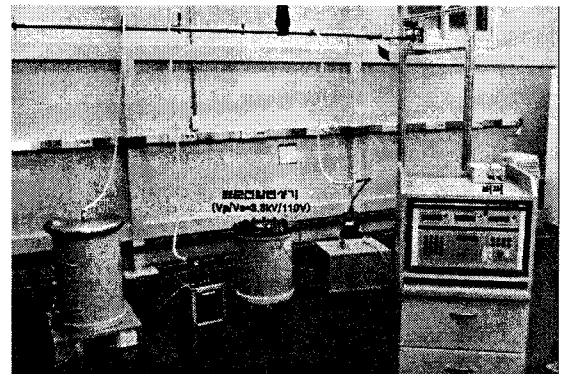
2.2 전자식 전압변성기의 평가(나)

2.2.1 평가시스템의 구성

1차측 전압과 2차측 전압이 각각 22 kV와 110V, 3.3 kV와 110V인 표준전압변성기 두 대와 전압변성기 비교기를 이용하여 전자식 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 평가하기 위한 시스템의 구성도는 <그림 3>과 같고, 시스템의 실제 구성 사진은 <그림 4>와 같다.



<그림 3> 전자식 전압변성기의 오차 평가시스템의 구성도



<그림 4> 전자식 전압변성기의 오차 평가시스템의 실제 구성 사진

<그림 3>과 <그림 4>와 같이 고전압 발생 변압기의 고압측에 표준전압변성기($V_p/V_s=22kV/110V$)의 1차측과 전자식 전압변성기의 고압측이 연결되며, 표준전압변성기($V_p/V_s=22kV/110V$)의 2차측에 표준전압변성기($V_p/V_s=3.3kV/110V$)의 1차측이 연결된다. 또한 표준전압변성기($V_p/V_s=3.3kV/110V$)의 2차측은 전압변성기 비교기의 N 단자에 연결되며, 전자식 전압변성기의 출력 전압은 전압변성기 비교기의 X 단자에 연결된다. 이때, 전자식 전압변성기의 저압측 저항은 10 kΩ이고, 전압변성기 비교기의 입력임피던스는 13 kΩ이므로, 입력임피던스에 의한 부담 효과(Load effect)로 인해 전압강하가 발생하므로 전자식 전압변성기의 출력 단자와 전압변성기 비교기의 X 단자 사이에 버퍼(Voltage follow)를 연결하였다.

2.2.2 평가 결과

전자식 전압변성기의 2차측 정격전압의 80% ~ 110%의 범위에서 비오차와 위상각 오차를 8회 측정하였으며, 각각 <표 3>와 <표 4>에 나타내었고, 평균값을 마지막 열에 나타내었다.

<표 3> 전압변성기 비교기에서의 비오차(α_r)의 측정값

(단위 : %)

전압	1차	2차	3차	4차	5차	6차	7차	8차	평균
80%	-0.096	-0.095	-0.093	-0.093	-0.091	-0.093	-0.095	-0.093	-0.094
100%	-0.095	-0.095	-0.095	-0.094	-0.094	-0.093	-0.097	-0.094	-0.095
110%	-0.092	-0.093	-0.093	-0.091	-0.091	-0.091	-0.092	-0.092	-0.092

<표 4> 전압변성기 비교기에서의 위상각 오차(β_r)의 측정값

(단위 : min)

전압	1차	2차	3차	4차	5차	6차	7차	8차	평균
80%	-9.71	-9.63	-9.74	-9.57	-9.56	-9.41	-9.44	-9.36	-9.55
100%	-9.76	-9.71	-9.73	-9.60	-9.54	-9.51	-9.43	-9.40	-9.59
110%	-9.73	-9.81	-9.74	-9.63	-9.54	-9.51	-9.49	-9.47	-9.62

전차식 전압변성기의 비오차(α_x)와 위상각 오차(β_x)는 식 (7)과 식 (8)과 같이 전압변성기 비교기에서 측정된 비오차(α_x)와 위상각 오차(β_x)의 값과 표준전압변성기 두 대의 합성 비오차(α_{s1+s2})와 위상각 오차(β_{s1+s2})를 합하여 구해질 수 있다.

$$\alpha_x = \alpha_x + \alpha_{s1+s2} \quad (7)$$

$$\beta_x = \beta_x + \beta_{s1+s2} \quad (8)$$

<표 3>과 <표 4>에 나타난 전압변성기 비교기에서의 측정값의 평균 값을 <표 5>의 두 번째 열과 다섯 번째 열에 나타내었고, <표 1>과 <표 2>에 나타난 표준전압변성기 두 대의 합성 비오차와 합성 위상각 오차의 평균값을 각각 <표 5>의 세 번째 열과 여섯 번째 열에 나타내었다. 전차식 전압변성기의 비오차와 위상각 오차는 식 (7)과 식 (8)에 의해 구해지며, 각각 <표 5>의 네 번째 열과 일곱 번째 열에 나타내었다.

<표 5> 전차식 전압변성기의 비오차와 위상각 오차

전압 (%)	비오차(%)			위상각 오차(min)		
	측정값 (α_x)	보정값 (α_{s1+s2})	최종값 (α_x)	측정값 (β_x)	보정값 (β_{s1+s2})	최종값 (β_x)
80	-0.094	-0.007	-0.101	-9.55	-0.98	-10.53
100	-0.095	-0.010	-0.105	-9.59	-0.94	-10.52
110	-0.092	-0.014	-0.106	-9.62	-0.88	-10.50

두 대의 표준전압변성기와 전압변성기 비교기를 이용하여 전차식 전압변성기를 평가한 결과 비오차와 위상각 오차는 각각 -0.10 %, -10.5 min 정도였다.

3. 시스템의 불확도 분석

3.1 표준전압변성기 두 대의 합성 오차 평가의 불확도 분석

고전압 전기용량 브리지와 표준용량분할기를 이용한 표준전압변성기 두 대의 합성 오차 평가의 불확도 요인으로는 반복측정에 의한 표준불확도(u_A), 고전압 전기용량 브리지 다이얼의 직선성에 의한 표준불확도(u_{B1}), 고전압 전기용량 브리지의 용량비와 손실계수 정확도 사양에 의한 표준불확도(u_{B2}), 고전압 용량기의 전압계수에 의한 표준불확도(u_{B3}), 고전압 전기용량 브리지의 분해능에 의한 표준불확도(u_{B4}), 피측정 전압변성기 2차측 전압변화에 의한 표준불확도(u_{B5}), 주파수 변화에 의한 표준불확도(u_{B6})가 있다^[5].

요인별 표준불확도와 합성 표준불확도(u_c), 확장불확도(U)를 <표 6>에 나타내었다.

<표 6> 표준전압변성기 두 대의 합성 비오차와 위상각 오차 평가의 불확도 총괄표

(단위 : %)

불확도요인	비오차			위상각 오차		
	80%	100%	110%	80%	100%	110%
u_A	0.0003	0.0003	0.0003	0.011	0.008	0.008
u_{B1}	0.0006	0.0006	0.0006	0.020	0.020	0.020
u_{B2}	0.0006	0.0006	0.0006	0.020	0.020	0.020
u_{B3}	0.0006	0.0009	0.0011	0.020	0.032	0.038
u_{B4}	0.0000	0.0000	0.0000	0.001	0.001	0.001
u_{B5}	0.0002	0.0002	0.0002	0.141	0.141	0.141
u_{B6}	0.0001	0.0001	0.0001	0.147	0.147	0.147
u_c	0.0011	0.0013	0.0014	0.207	0.208	0.209
U	0.0021	0.0026	0.0029	0.414	0.417	0.419

3.2 전차식 전압변성기의 오차 평가의 불확도

표준전압변성기 두 대와 전압변성기 비교기를 이용한 전차식 전압변성기의 비오차와 위상각 오차 평가의 불확도 요인은 반복측정에 의한 불확도(u_A), 표준전압변성기 두 대의 합성 오차 평가의 불확도(u_{B1}), 전압변성기 비교기의 정확도에 의한 불확도(u_{B2}), 전압변성기 비교기의 평가 방법의 불확도(u_{B3}), 전차식 전압변성기의 전압변화에 의한 불확도(u_{B4}), 전차식 전압변성기의 주파수 변화에 의한 불확도(u_{B5})로 분석할 수 있다.

요인별 표준불확도와 합성 표준불확도(u_c), 확장불확도(U)를 <표 7>에 나타내었다.

<표 7> 표준전압변성기 두 대의 합성 비오차와 위상각 오차 평가의 불확도 총괄표

(단위 : %)

불확도요인	비오차			위상각 오차		
	80%	100%	110%	80%	100%	110%
u_A	0.0005	0.0004	0.0004	0.049	0.049	0.046
u_{B1}	0.0011	0.0013	0.0014	0.207	0.208	0.209
u_{B2}	0.0014	0.0014	0.0014	0.087	0.087	0.087
u_{B3}	0.0010	0.0010	0.0010	0.070	0.070	0.070
u_{B4}	0.0001	0.0001	0.0001	0.007	0.007	0.007
u_{B5}	0.0000	0.0000	0.0000	0.737	0.737	0.737
u_c	0.0021	0.0022	0.0023	0.775	0.776	0.776
U	0.0043	0.0044	0.0046	1.550	1.551	1.551

4. 결 론

세계적으로 전력설비의 디지털화가 진행되고 있으며, 이로 인해 많은 중진기기 업체들이 전차식 전압변성기의 개발에 힘쓰고 있다. 따라서 기존의 철심형 전압변성기 대신에 전차식 전압변성기의 수요가 증가할 것으로 생각되어지며, 전차식 전압변성기의 원활한 보급과 전력설비의 디지털화를 위해서는 전차식 전압변성기 성능의 정확한 평가가 우선시 되어야 한다.

본 논문에서는 표준전압변성기 두 대와 전압변성기 비교기를 이용하여 전차식 전압변성기를 평가할 수 있는 시스템을 구축하였다. 또한 실제 전차식 전압변성기를 평가하였으며, 평가시스템의 불확도는 0.004 %, 1.5분 정도였다. 이 평가시스템은 표준전압변성기 두 대를 이용하여 출력전압을 전차식 전압변성기의 출력전압과 비슷한 수준으로 강압하여 전압변성기 비교기에서 상호 비교를 통하여 오차를 평가하는 방법으로 두 대의 철심형 전압변성기를 표준전압변성기로 구성하여 고전압 전기용량 브리지를 보유한 표준기관에서 평가를 받으면 이를 이용하여 다른 전차식 전압변성기들을 계속해서 평가할 수 있다.

따라서 본 논문에서 개발된 전차식 전압변성기의 평가시스템은 전차식 전압변성기의 정확한 평가를 가능하게 함으로서 전차식 전압변성기의 보급과 전력설비의 디지털화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Dupraz, J.P., Montillet, G.F., "An innovative method for voltage measurement: applications up to 550 kV GIS", Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES, Vol. 2, pp. 460-465, 2003.
- [2] Feser, K., "Transient Behaviour of Damped Capacitive Voltage Dividers of Some Million Volts", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, Issue 1, pp 116-121, 1974.
- [3] Vermeulen, H.J., Dann, L.R., van Rooijen, J., "Equivalent circuit modelling of a capacitive voltage transformer for power system harmonic frequencies", Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. 10, Issue 4, pp. 1743-1749, 1995.
- [4] 장용무, "전력기기 디지털화를 위한 전차식 CT·PT 기술동향", 전기의 세계, 53-1, 2004.
- [5] 정재갑, 권성원, 이상광, 김명수, "고전압 전기용량 브리지를 이용한 전압변성기의 비오차와 위상각 오차의 측정과 불확도 분석", 대한전기학회지, v.55C, no.3, pp. 134-141, 2006.