

고전압 전기용량 브리지와 표준용량분압기를 이용한 전자식 전압변성기의 평가

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

Evaluation of Errors of Electronic Voltage Transformer using High Voltage Capacitance Bridge and Standard Capacitive divider

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 - We established a system to evaluate the ratio error and phase angle error of electronic voltage transformer using high voltage capacitance bridge and standard capacitors. The uncertainty of evaluation system is about 0.005 % in ratio error and 1.5 min in phase angle error.

1. 서 론

현재까지 주로 사용되어 온 철심형 전압변성기는 110 V 정도의 큰 출력전압을 가지므로 주로 릴레이나 전력미터 등의 전력설비에 사용되고 있으나 출력 전압이 높고 아날로그 방식으로 되어 있어 디지털 계전기나 전력 IT 분야에서 사용하기에는 부적합하다는 문제가 있다. 따라서 설비자동화 및 무인화 단계에 적지 않은 장애 요소로 작용함으로써 보다 높은 차원의 계통운용을 구축하는 것을 어렵게 하고 있다. 또한 측정 전압이 증가할수록 전기적 절연설계가 어렵고 외형 부피가 매우 커질 뿐만 아니라, 철심코어의 자속포화문제로 인하여 계기용과 보호용을 별도로 사용해야 하는 단점이 있다^[1,2].

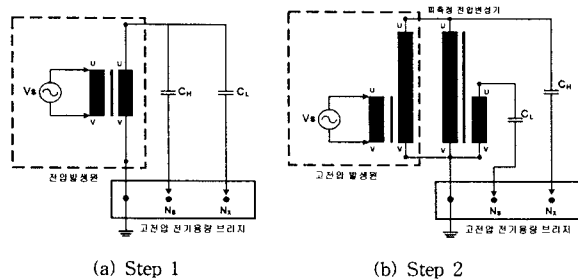
반면에 전자식 전압변성기는 부피가 작고, 경량이며, 외형을 자유롭게 변화시킬 수 있다. 따라서 급증하는 전력수요를 충족하기 위하여 대규모로 설계 제작되는 전력설비를 설치할 부피확보 문제나 배전반의 크기 등에 대한 경제적인 비용을 절감시킬 수 있다. 또한 출력신호 크기는 1 V ~ 6 V 정도로서 디지털화된 계측기, 보호 Relay 등에도 사용이 가능하다. 이러한 장점으로 인해 최근에 전자식 변성기의 사용이 급속히 증가하고 있으며, 연구 또한 활발히 진행되고 있다^[3,4].

따라서 본 논문에서는 전자식 전압변성기의 원활한 보급과 전력설비의 디지털화를 위해 고전압 전기용량 브리지와 고전압 용량기, 저전압 용량기를 이용하여 전자식 전압변성기를 평가할 수 있는 시스템을 개발하였으며, 평가시스템의 불확도를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 측정원리

고전압 전기용량 브리지(high voltage capacitance bridge, HVCB)와 고전압 용량기, 저전압 용량기를 이용하여 전압변성기를 평가하기 위한 시스템의 구성도는 <그림 1>과 같으며, 고전압 전기용량 브리지와 표준용량분압기를 이용하여 전압변성기를 평가하기 위한 과정은 고전압 용량기와 저전압 용량기의 비를 평가하는 과정(Step 1)과 평가된 두 대의 용량기를 이용하여 전압변성기를 평가하는 과정(Step 2)으로 이루어진다^[5].



<그림 1> 고전압 전기용량 브리지와 표준용량분압기를 이용한 전압변성기 평가시스템의 구성도

2.1.1 Step 1

첫 번째 단계는 <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 1차측 전압을 가하여 동일한 전압을 저전압 용량기와 고전압 용량기에 가하고, 고전압 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)과 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 $(N_S/N_X)_1$ 와 같다.

2.1.2 Step 2

<그림 1(b)>와 같이 고전압발생 변압기의 고전압 단자를 피측정 전압변성기의 1차측과 고전압 용량기의 H 단자에 연결하고, 피측정 전압변성기의 2차측 전압 단자에 저전압 용량기의 H 단자를 연결한다. 첫 번째 단계와 반대로 저전압 용량기의 L 단자는 고전압 전기용량 브리지의 N_S 단자에 고전압 용량기의 L 단자는 N_X 단자에 연결한다. 고전압 발생 변압기에 전압을 공급하여 고전압을 공급하고 고전압 전기용량 브리지의 용량비와 손실계수 다이얼을 돌려 고전압 용량기와 저전압 용량기에 동일한 전류가 흐를 때를 Lock-In Amplifier를 이용하여 찾는다. 이때, 피측정 전압변성기의 2차측 전압에 대한 1차측 고전압의 복소비는 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 N 은 피측정 전압변성기의 정격변환비, RCF 는 비보정인자, D 는 손실계수이다.

따라서 식 (1)과 식 (2)에 의해 비보정인자와 비오차, 위상각 오차는 각각 식 (4)와 식 (5), 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

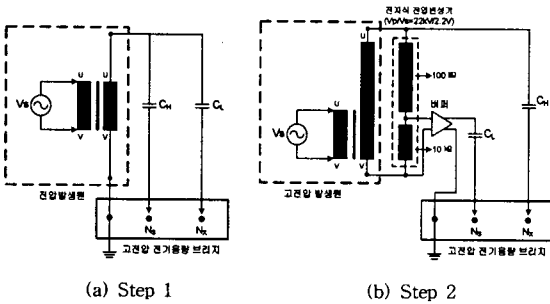
$$RCF = \left(\frac{N_S}{N_X} \right)_1 \left(\frac{N_S}{N_X} \right)_2 / N \quad (4)$$

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

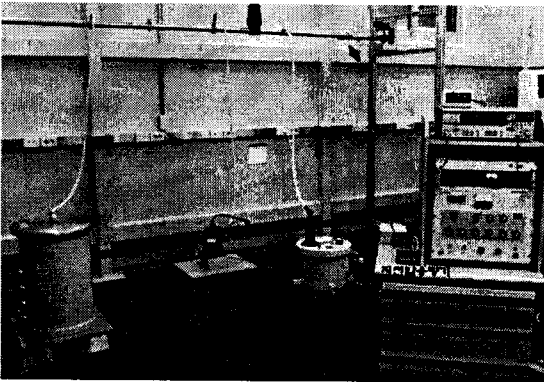
$$\Gamma = D \quad (6)$$

2.2 평가시스템 구성

고전압 전기용량 브리지와 표준용량분압기를 이용하여 전자식 전압변성기를 평가하기 위한 시스템의 구성도는 <그림 2>와 같고, 시스템의 실제 구성 사진은 <그림 3>과 같다.



(a) Step 1 (b) Step 2
<그림 2> 전자식 전압변성기의 평가시스템의 구성도



<그림 3> 전자식 전압변성기의 평가시스템의 실제 구성 사진

<그림 2(a)>와 같이 첫 번째 단계는 2.1.1과 같고, <그림 2(b)>와 <그림 3>과 같이 두 번째 단계에서는 전압변성기 대신에 평가하고자 하는 전자식 전압변성기를 연결한다. 즉, 고전압 발생분압기에 의해 22 kV로 승압된 고전압을 전자식 전압변성기의 고압측 단자와 고전압 용량기(C_H)의 H 단자에 연결하고, 전자식 전압변성기의 출력을 비퍼를 통하여 저전압 용량기(C_L)의 H 단자에 연결한다. 저전압 용량기의 L 단자는 고전압 전기용량 브리지의 N_5 단자에 고전압 용량기의 L 단자는 N_4 에 각각 연결한다.

2.3 평가 결과

전자식 전압변성기 정격전압의 80% ~ 110%의 범위에서 고전압 전기용량 브리지의 용량비와 손실계수 다이얼을 돌려 고전압 용량기와 저전압 용량기에 동일한 전류가 흐를 때를 Lock-In Amplifier를 이용하여 찾는다. 이때, 비오차와 위상각 오차는 식 (5)와 식 (6)에 의해서 구할 수 있으며, 5회에 걸쳐 평가하여 결과를 각각 <표 1>과 <표 2>에 각각 나타내었다.

고전압 전기용량 브리지와 표준용량분압기를 이용하여 전자식 전압변성기를 평가한 결과 비오차와 위상각 오차는 각각 약 -0.10%, -8.9 min 정도였다.

<표 1> 전자식 전압변성기의 비오차

전압	1차	2차	3차	4차	5차	평균
80 %	-0.103	-0.100	-0.100	-0.090	-0.093	-0.097
100 %	-0.105	-0.102	-0.103	-0.095	-0.097	-0.100
110 %	-0.110	-0.114	-0.109	-0.105	-0.105	-0.108

<표 2> 전자식 전압변성기의 위상각 오차

(단위 : min)

전압	1차	2차	3차	4차	5차	평균
80 %	-8.40	-9.22	-9.18	-8.95	-8.92	-8.94
100 %	-8.40	-9.22	-9.18	-8.90	-8.92	-8.92
110 %	-8.40	-9.18	-9.16	-8.89	-8.91	-8.91

2.4 불확도 분석

2.4.1 불확도 요인

고전압 전기용량 브리지와 표준용량분압기를 이용한 전자식 전압변성기의 오차 평가의 불확도 요인은 다음과 같이 같다^[5].

- (가) 반복측정에 의한 표준불확도(u_A)
- (나) 고전압 전기용량 브리지 다이얼의 직선성에 의한 표준불확도(u_{B1})
- (다) 고전압 전기용량 브리지의 용량비와 손실계수 정확도 사양에 의한 표준불확도(u_{B2})
- (라) 고전압 용량기의 전압계수에 의한 표준불확도(u_{B3})
- (마) 고전압 전기용량 브리지의 분해능에 의한 표준불확도(u_{B4})
- (바) 피측정 전압변성기 2차측 전압변화에 의한 표준불확도(u_{B5})
- (사) 주파수 변화에 의한 표준불확도(u_{B6})

- (가) 반복측정에 의한 표준불확도(u_A)
 반복측정에 의한 표준불확도(u_A)는 식 (7)을 이용하여 구할 수 있다.

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

여기서 δ_i 는 각각의 측정값이고, $\bar{\delta}$ 는 측정값의 평균값이며 n 은 측정 횟수이다.

- (나) 고전압 전기용량 브리지 다이얼의 직선성에 의한 표준불확도(u_{B1})
 피측정 전압변성기의 2차측에 연결하는 외부부담으로서 직-교류 차이가 10^{-6} 이하인 저항을 변화시켜가면서 비오차와 위상각 오차를 측정했을 때 비오차와 위상각 오차의 변화가 저항의 역수에 비례하여야 하는 때, 이를 이용하여 고전압 전기용량 브리지의 비오차와 위상각 오차의 직선성을 평가할 수 있다. 평가결과 비오차와 위상각 오차 모두 10×10^{-6} 이내에서 직선성이 유지되었다. 따라서 고전압 전기용량 브리지 다이얼의 직선성에 의한 표준불확도(u_{B1})는 식 (8)과 식 (9)와 같이 구해진다.

$$u_{B1,r} = (10 \times 10^{-6} / 1.732) \approx 5.8 \times 10^{-4} \% \quad (8)$$

$$u_{B1,p} = (10 \times 10^{-6} \text{ rad} / 1.732) \approx 5.8 \times 10^{-4} \text{ crad} = 0.02 \text{ min} \quad (9)$$

- (다) 고전압 전기용량 브리지의 용량비와 손실계수 정확도 사양에 의한 표준불확도(u_{B2})
 고전압 전기용량 브리지의 용량비와 손실계수 정확도의 사양은 10×10^{-6} 이다. 따라서 고전압 전기용량 브리지의 용량비와 손실계수 정확도 사양에 의한 표준불확도는 식 (10)과 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{B2,r} = (10 \times 10^{-6} / 1.732) \approx 5.8 \times 10^{-4} \% \quad (10)$$

$$u_{B2,p} = (10 \times 10^{-6} \text{ rad} / 1.732) \approx 5.8 \times 10^{-4} \text{ crad} = 0.02 \text{ min} \quad (11)$$

- (라) 고전압 용량기의 전압계수에 의한 표준불확도(u_{B3})
 앞에서 언급한 것과 같이 고전압 전기용량 브리지와 표준용량분압기를 이용하여 전자식 전압변성기를 평가하기 위한 과정은 두 과정으로 나뉜다. 첫 번째 과정에서 구한 저전압 용량기와 고전압 용량기의 비(C_L/C_H)를 이용하여 두 번째 과정에서 식 (4)와 같이 비오차를 구하게 된다. 첫 번째 과정에서 구한 용량기의 비(C_L/C_H)는 저전압에서 측정되었고, 두 번째 과정에서는 고전압 용량기(C_H)에 고전압이 인가된다. 이때 사용된 고전압 용량기는 전압 계수를 가지고 있기 때문에 저전압에서의 고전압 용량기의 값과 고전압에서의 값과는 차이가 발생한다. 사용된 고전압 용량기는 정격전압이 30 kV이고, 제조사의 사양에 의하면

고전압 용량기의 전압계수는 정격전압 30 kV에서 전압계수가 30×10^{-6} 이다. 전압계수는 공급하는 전압의 제곱에 비례하므로 1차측 전압(V_p)에 대한 전기용량비의 변화는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta C_L / C_B = 0.033 \times V_p^2 [kV] \times 10^{-6} \quad (12)$$

(마) 고전압 전기용량 브리지의 분해능에 의한 표준불확도(u_{B4})

고전압 전기용량 브리지의 분해능이 10^{-6} 이므로 비오차와 위상각 오차의 불확도는 직사각형 확률 분포로 적용하면 다음 식 (13)과 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{B4,r} = 0.5 \times 10^{-6} / 1.732 \approx 0.29 \times 10^{-4} \% \quad (13)$$

$$u_{B4,p} = 0.5 \times 10^{-6} \text{ rad} / 1.732 \approx 0.29 \times 10^{-4} \text{ crad} = 0.001 \text{ min} \quad (14)$$

(바) 피측정 전압변성기 2차측 전압변화에 의한 표준불확도(u_{B5})

비오차와 위상각 오차의 반복 측정시에 고전압의 크기를 정확하게 일치시킬 수 없다. 보통 피측정 전압변성기 2차측 전압의 0.5 % 정도의 변동이 있다고 하면, 2차측 전압의 변화에 대한 비오차와 위상각 오차의 불확도는 다음 식 (15)와 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$u_{B5,r} = \left[\frac{(\alpha_2 - \alpha_1)}{(V_2 - V_1)} \times \frac{V_s}{200} \right] / 1.732 \% \quad (15)$$

$$u_{B5,p} = \left[\frac{(\beta_2 - \beta_1)}{(V_2 - V_1)} \times \frac{V_s}{200} \right] / 1.732 \times 34.38 \text{ min} \quad (16)$$

(사) 주파수 변화에 의한 표준불확도(u_{B6})

비오차와 위상각 오차의 반복 측정시에 고전압의 주파수가 참값과 차이가 발생할 수 있다. 보통 피측정 전압변성기 2차측 전압 주파수의 0.2 % 정도의 불확도를 가지고 있을 때, 이로 인한 불확도는 다음 식 (17)과 식 (18)과 같이 구할 수 있다.

$$u_{B6,r} = \left[\frac{(\alpha_2 - \alpha_1)}{(f_2 - f_1)} \times \frac{60}{500} \right] / 1.732 \% \quad (17)$$

$$u_{B6,p} = \left[\frac{(\beta_2 - \beta_1)}{(f_2 - f_1)} \times \frac{60}{500} \right] / 1.732 \times 34.38 \text{ min} \quad (18)$$

2.4.2 합성 표준불확도(u_c), 확장불확도(U)

합성 표준불확도는 식 (19)와 같이 각 요인별 표준불확도의 root sum of squares(RSS)로서 구해진다^[6].

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots + u_{B6}^2} \quad (19)$$

이때, 확장 불확도는 식 (20)과 같이 합성 표준불확도와 포함인자의 곱으로 나타내어진다.

$$U = k \cdot u_c \quad (20)$$

이때, 포함인자는 2이다.

2.4.3 불확도 분석 결과

고전압 전기용량 브리지와 표준용량분암기를 이용한 전자식 전압변성기 평가의 불확도 요인별 표준불확도와 합성 표준불확도, 확장불확도를 전압별로 각각 구하여 <표 3>에 각각 나타내었다.

<표 3> 전자식 전압변성기의 비오차와 위상각 오차 평가의 불확도 총괄표

불확도요인	비오차(%)			위상각 오차(min)		
	80%	100%	110%	80%	100%	110%
u_A	0.0025	0.0018	0.0017	0.148	0.147	0.141
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}	0.0001	0.0001	0.0001	0.007	0.007	0.007
u_{B6}	0.0000	0.0000	0.0000	0.737	0.737	0.737
u_c	0.0027	0.0022	0.0022	0.753	0.753	0.752
U	0.0053	0.0044	0.0043	1.505	1.506	1.504

3. 결 론

최근 사용이 증가하고 있는 전자식 전압변성기의 평가를 위해 고전압 전기용량 브리지와 고전압 용량기, 저전압 용량기를 이용하여 전자식 전압변성기를 평가할 수 있는 시스템을 구축하였다. 평가시스템을 이용하여 전자식 전압변성기를 정격전압의 80 % ~ 110 %의 범위에서 평가하였고, 시스템의 불확도를 분석하였다. 평가결과 피측정 전자식 전압변성기의 비오차와 위상각 오차는 -0.1 %, -9 min 정도였으며, 시스템의 불확도는 0.005 %, 1.5 min 정도였다.

본 논문에서 구축된 평가시스템은 다른 평가시스템과의 비교를 통해 유효성이 검증된다면 전자식 전압변성기의 평가를 통한 보급 활성화와 전력설비의 자동화, 디지털화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정재갑, 권성원, 김한준, 박영태, 김명수, "넓은 범위의 비오차를 갖는 전압변성기를 이용한 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차 직선성 평가기술", 대한전기학회지, vol 54B, No. 2, pp. 66-70, 2004.
- [2] 김민수, 정재봉, 김정배, 송원표, 고희석, 최인혁, "Intelligent GIS용 전자식 변성기 개발", 2004년도 대한전기학회 하계학술대회, vol. C, pp. 1793-1795, 2004.
- [3] Saitoh, M. et al, "Electronic instrument transformers for integrated substation systems", Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, Vol. 1, pp 459-464, 2002.
- [4] 장용부, "전력기기 디지털화를 위한 전자식 CT·PT 기술동향", 전기의 세계, 53-1, 2004.
- [5] 정재갑, 권성원, 이상화, 김명수, "고전압 전기용량 브리지를 이용한 전압변성기의 비오차와 위상각 오차의 측정과 불확도 분석", 대한전기학회지, v.55C, no.3, pp. 134-141, 2006.
- [6] 한국계량측정협회, "전압변성기의 표준교정절차", KASTO 06, 2006.