

외부부담이 전압변성기의 비오차와 위상각오차에 미치는 영향에 대한 연구

論 文
53C-3-4

A Study on Ratio Error and Phase Angle Error Caused by an External Burden in Voltage Transformer

鄭在甲* · 權聖遠** · 金奎泰** · 金明壽***
(Jae Kap Jung · Sung Won Kwon · Kyu Tae Kim · Myung Soo Kim)

Abstract - A voltage transformer(VT) used for the establishment of high voltage national standard, has generally ratio error and phase angle error. Both errors in VT depend critically on values of external burden of VT used. Both ratio error and phase angle error in existence of the external burden is calculated. These calculated values are very well consistent with the experimental result. The principle and the measurement method of VT in our institute are also explained.

Key Words : Voltage transformer, Ratio error, Phase angle error, Burden, National standard,

1. 서 론

세계적 추세인 송전전압 및 전력용량의 증대에 따라 관련 제품 시험의 전압 및 전류 범위도 크게 증대되고 있으며, 동시에 품질보증의 핵심인 시험성적서의 국제적 신뢰성 및 투명성이 보다 더 엄격한 수준에서 요구되고 있다. 최근 국내 외에 불고 있는 전력산업의 구조개편 및 민영화, 국가 규제 철폐, B2B 전자상거래 등의 추세에 따라 대용량 거래에 대한 정확한 측정표준이 절실히 필요한 시점이 되었다. 전세계적으로 고정밀 전압측정 기술은 주로 일반 수용가에 공급되는 100 V ~ 240 V 의 낮은 전압 영역에서 개발되어왔으며, 수십 kV 이상의 고전압 영역에서는 측정기술 및 표준소급성 확보기술 등이 활발히 연구되지 못하였다. 이것은 주로 고전압영역이 기술적으로 접근하기가 용이하지 않고, 통상 기존의 독점적 전력산업 구조상 대용량 거래의 측정 수요가 제한된 영역에서만 발생해 왔기 때문이다.

세계적으로 전력기기 수요가 크게 늘고 있는 상황에서 국내에서 생산되는 증전기 제품 품질의 국제적 신뢰성 확보 및 수출 활성화를 위해 고전압 국가측정표준의 확립이 필요하다. 국가측정표준의 확립을 위해서는 핵심요소인 계기용 전압 변성기(instrument voltage transformer) 또는 고전압 분할기(high voltage divider)의 비오차(ratio error)와 위상각오차(phase angle error)의 정밀측정이 요구된다.

고전압 측정표준확립에 대한 기초연구로서 전압변성기의

기본원리와 전압변성기의 2차측에 외부부담이 있을 때 전압 변성기의 비오차와 위상각 오차에 미치는 효과에 대한 이론적인 결과를 실험결과와 비교하였다. 또한 한국표준과학연구원에서 수행하고 있는 고전압 변성기의 정밀측정 방법과 원리를 설명하였다.

2. 전압변성기

2.1 기본원리

전압변성기는 철심에 1차코일과 2차코일을 감은 변압기의 일종으로서, 1차측에는 고전압 V_p 가 인가될때, 2차측의 저전압 V_s 를 정밀측정하여 1차측 전압을 환산할 수 있으며, 이들 사이의 관계는 아래와 같다[1-2].

$$N = \frac{n_1}{n_2} = \frac{V_p}{V_s} \quad (1)$$

여기서 N 은 전압변성기의 정격변환비(nominal ratio 또는 turn ratio)이고, n_1 과 n_2 는 각각 1차측과 2차측의 권선수이다.

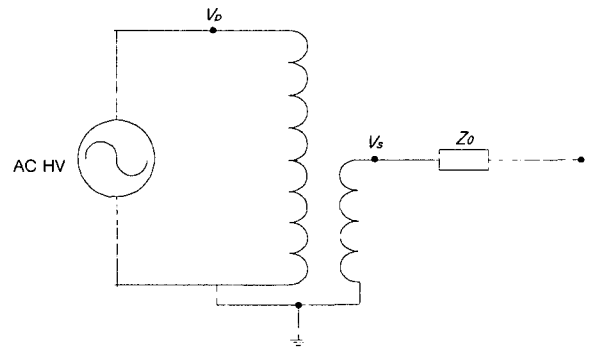


그림 1 전압변성기의 등가회로

Fig. 1 An equivalent circuit for the voltage transformer with zero burden

** 正 會 員 : 韓國標準科學研究院 電磁氣標準部 電氣磁氣그룹 先任研究員

** 正 會 員 : 韓國標準科學研究院 電磁氣標準部 電氣磁氣그룹 責任研究員

*** 正 會 員 : 韓國標準科學研究院 電磁氣標準部長

接受日字 : 2003年 9月 19日

最終完了 : 2004年 1月 17日

외부부담이 없을 때 즉 영부담(zero burden)일 때 전압변성기의 등가회로는 그림 1과 같다.

여기서 Z_0 는 영부담 일때 전압변성기의 2차측에 잔류하는 등가임피던스이고, 전압 변성기의 1차측(V_p)과 2차측(V_s)의 전압벡터는 아래와 같이 복소수로 표시가능하다.

$$V_p = |V_p| e^{j\Gamma_p} \quad (2)$$

$$V_s = |V_s| e^{j\Gamma_s} \quad (3)$$

여기서 Γ_p 와 Γ_s 는 각각 1차측과 2차측의 전압벡터의 위상이다. 전압변성기의 2차측에 대한 1차측의 전압벡터의 복소비는 아래와 같다.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{|V_p|}{|V_s|} e^{-j(\Gamma_s - \Gamma_p)} = \frac{|V_p|}{|V_s|} e^{-j\Gamma_0} = NRCF_0 e^{-j\Gamma_0} \quad (4)$$

여기서 $\Gamma_0 \equiv \Gamma_s - \Gamma_p$ 로 정의되는 위상각 차이로서, 180° 회전된 2차측에 대한 1차측 전압벡터사이의 위상각의 차이이고, 2차측 전압의 위상이 1차측 전압의 위상보다 빠를 때 정(+: lead)이고 반대일때는 부(-: lag)이다. $\frac{|V_p|}{|V_s|}$ 는 2차측전압에 대한 1차측전압의 비이고, $NRCF_0$ 이다. 실제 전압 변성기는 1차측과 2차측에 누설임피던스가 생겨 전압강하가 일어나기 때문에 비오차와 위상각 오차를 가지고 있다. RCF_0 는 영부담 일때의 아래와 같이 주어지는 비보정인자(ratio correction factor)로서 전압변성기의 실제비 변환인자(true ratio correction factor) 이다. 비오차를

$$\text{비오차}(\%) \equiv 100 \cdot \left[\frac{(NV_s - V_p)}{V_p} \right] \quad (5)$$

으로 정의할 때 비보정인자와 비오차와의 관계는 아래와 같다.

$$RCF_0 = 1 - [\text{비오차}(\%)/100] \quad (6)$$

2.2 외부부담이 전압변성기의 비오차와 위상각 오차에 미치는 영향

임피던스 Z_b 인 부담 b 가 전압변성기에 연결될 때의 등가회로는 아래 그림 2와 같다.

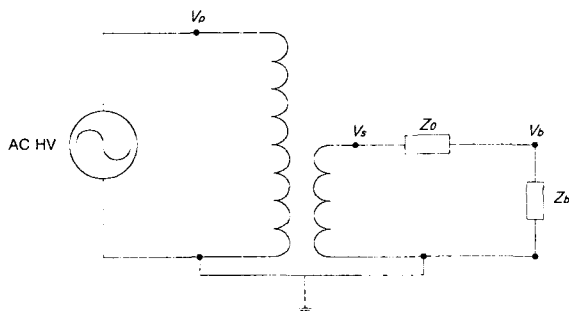


그림 2. 부담 Z_b 가 있을때의 전압변성기의 등가회로

Fig. 2. An equivalent circuit for the voltage transformer with external burden Z_b

그림 2의 전압변성기의 2차측에 대한 1차측의 전압벡터의 복소비는 식 (4)와 유사하게 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{V_p}{V_b} = \frac{|V_p|}{|V_b|} e^{-j\Gamma_b} = NRCF_b e^{-j\Gamma_b} \quad (7)$$

여기서 Γ_b 는 부담 b 가 있을 때 2차측에 대한 1차측 전압벡터의 위상각의 차이이고 $NRCF_b$ 는 부담 b 가 있을 때의 비보정인자이다. 그림 2 에서 Z_0 와 Z_b 로 호르는 전류는 같으므로

$$\frac{V_s - V_b}{Z_0} = \frac{V_b}{Z_b}, \quad \frac{1}{V_b} = \frac{Z_0 + Z_b}{V_s Z_b} \quad (8)$$

이고, 식 (8)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{V_p}{V_b} = \frac{V_p}{V_s} \left(1 + \frac{Z_0}{Z_b} \right) \quad (9)$$

여기서 임피던스 Z_0 와 Z_b 는 각각 $Z_0 = R_0 + jX_0$ 와 $Z_b = R_b + jX_b$ 이다. 따라서 식 (9)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{V_p}{V_b} = \frac{V_p}{V_s} \left(1 + \frac{R_0 + jX_0}{R_b + jX_b} \right) \quad (10)$$

그림 2의 외부부담(Z_b)에 의한 전압변성기의 위상각 오차(Γ_b)와 비보정인자(RCF_b)는 다음과 같이 주어진다(부록 참조).

$$\Gamma_b \approx \Gamma_0 - \frac{(X_0 R_b - X_b R_0)}{R_b^2 + X_b^2} + \frac{\Gamma_0 (R_0 R_b + X_0 X_b)}{R_b^2 + X_b^2} \quad (11)$$

$$RCF_b = RCF_0 \left[1 + \frac{(R_0 R_b + X_0 X_b)}{R_b^2 + X_b^2} + \frac{\Gamma_0 (X_0 R_b - R_0 X_b)}{R_b^2 + X_b^2} \right] \quad (12)$$

그림 1과 2의 전압변성기에 잔류하는 임피던스 Z_0 는 임의의 부담 t 와 영부담에서 비오차와 위상각오차를 측정하므로 알 수 있다. 임피던스 Z_0 와 임의의 다른 부담 t 에서의 임피던스 Z_t 의 관계는 식 (9)에서 첨자 b 대신 t 로 대체하면 아래와 같다.

$$Z_0 = Z_t \left(\frac{V_p/V_t}{V_p/V_s} - 1 \right) = \frac{Z_t [RCF_t e^{-j(\Gamma_t - \Gamma_0)} - RCF_0]}{RCF_0} \quad (13)$$

($\Gamma_t - \Gamma_0$)는 매우 작으므로 $e^{-j(\Gamma_t - \Gamma_0)}$ 의 급수전개에서 2 차항 이상을 무시하면

$$Z_0 \equiv \frac{Z_t [RCF_t - RCF_0 + j(\Gamma_0 - \Gamma_t)]}{RCF_0} \quad (14)$$

이 된다. 여기서 임피던스 $Z_t = R_t + jX_t$ 와 $Z_0 = R_0 + jX_0$ 이다. 따라서 식 (14)에서 R_0 와 X_0 는 아래와 같다.

$$R_0 \equiv \frac{[(RCF_t - RCF_0)R_t + (\Gamma_t - \Gamma_0)X_t]}{RCF_0} \quad (15)$$

$$X_0 \equiv \frac{[(\Gamma_0 - \Gamma_t)R_t + (RCF_t - RCF_0)X_t]}{RCF_0} \quad (16)$$

영부담에서 위상각 차이(Γ_0)와 비보정인자(RCF_0)와, 임의의 부담 t 에서의 위상각 차이(Γ_t)와 비보정인자(RCF_t)와 R_t , X_t 를 실험적으로 구하면 영부담에서의 R_0 와 X_0 을 식 (15)와 (16)을 이용하여 구할 수 있다. 이렇게 얻어진 R_0 와 X_0 을 이용하여 부담 b 에서의 위상각(Γ_b)과 비보정인자(RCF_b)를 식 (11)과 (12)을 이용하여 이론적으로 구할 수 있다.

2.3. 부담 b 에서의 계산된 위상각 오차/비오차와 실험 결과와의 비교

전압변성기의 1차측 전압 6600 V 인 경우 영부담, 부담 t , 부담 b 에서의 비오차와 위상각 오차에 대한 실험결과들을 표 1에 정리해 놓았다. 표 1의 부담 t 에서의 R_t , X_t 는 전력계(YEW model 2531)로 역률($PF = \cos \theta$)과 t 부담상자에 흐르는 전류(I), 전압(V)을 측정함으로써 구해진다. 그 관계는 다음과 같다.

$$Z = \frac{V}{I}, R_t = \cos \theta \cdot Z, X_t = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (17)$$

식 (17)을 이용하여 구한 R_t , X_t 를 표 1의 8, 9 번째 열에 나타내었다. 영부담에서 측정된 비오차, 위상각 오차와 부담 t 에서 측정된 비오차, 위상각 오차, R_t 및 X_t 와 식 (15), (16)을 이용하여 영부담에서의 R_0 , X_0 를 구하였다(표 1의 4, 5번째 열). 다음은 부담 b 에서의 비오차와 위상각 오차의 값을 식 (11), (12) 및 (6)을 이용하여 구한 계산값을 표 1의 마지막 두 열에 나타내었고 이 값을 실험값(표 1의 10, 11 번째 열)을 나타내었다.

표 1 1차측전압(Vp) 6600 V에서 이론값과 실험결과와의 비교

Table 1 Comparison of theoretical and experimental values at primary voltage of 6600 V

2차 전압 (V)	영부담				부담 t				부담 b (실험값)				부담 b (계산값)	
	비오차 (%)	위상각 오차 (min)	Ro (Ω)	Xo (Ω)	비오차 (%)	위상각 오차 (min)	Rt (Ω)	Xt (Ω)	비오차 (%)	위상각 오차 (min)	Rb+(Ω)	Xb+(Ω)	비오차 (%)	위상각 오차 (min)
30	-0.038	+1.7	1.17	0.91	-0.228	+0.25	685.8	326.3	-0.120	+4.9	115.2	1146.2	-0.127	+4.89
70	-0.032	+1.5	1.20	0.81	-0.214	+0.60	710.5	343.1	-0.110	+4.9	115.2	1146.2	-0.113	+4.83
110	-0.030	+1.7	1.21	0.86	-0.210	+0.75	726.9	368.2	-0.110	+4.9	115.2	1146.2	-0.115	+5.03
120	-0.030	+1.7	1.22	0.88	-0.210	+0.80	731.7	380.5	-0.110	+4.9	115.2	1146.2	-0.116	+5.06

+는 전압변성기의 메뉴얼의 사양서에서 취한값이다.

실험결과와 계산값을 비교하여 그림 3에 나타내었으며 비오차의 경우 0.007 %, 위상각 오차의 경우 0.16 min 이내에서 잘 일치한다.

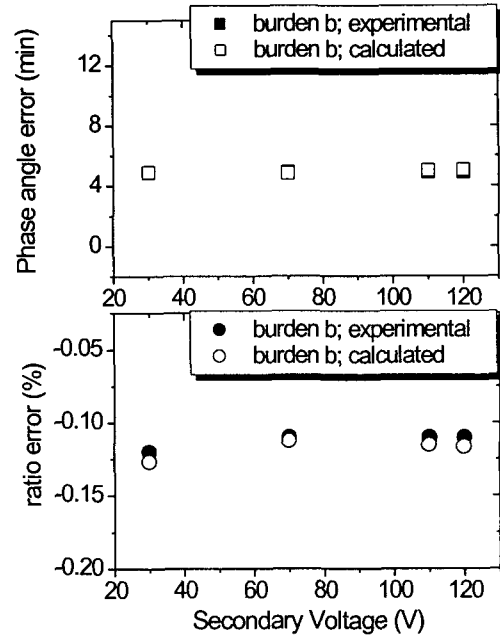


그림 3. 1차측전압 6600 V에서 이론값과 실험결과와의 비교
Fig. 3. Comparison of theoretical and experimental values at primary voltage of 6600 V

또한 전압변성기의 1차측 전압 3300 V 인 경우에도 앞의 6600 V 와 동일하게 진행하여 이론값과 실험값을 비교한 결과 매우 잘 일치하였다.(표 2의 10, 11 번째 열과 마지막 두 열의 비교). 계산값과 실험값을 그림 4에 비교하여 나타내었다.

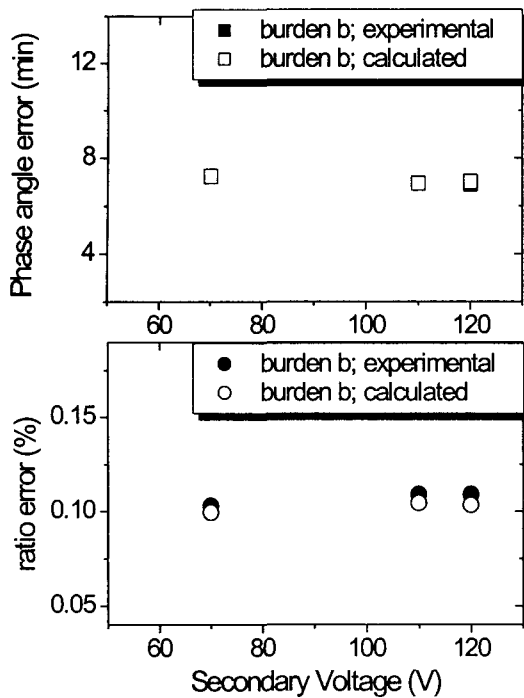


그림 4 1차측전압 3300 V에서 이론값과 실험결과의 비교
 Fig. 4 Comparison of theoretical and experimental values at primary voltage of 3300 V

3. 한국표준과학연구원의 전압변성기 측정시스템

한국표준과학연구원의 전압변성기 측정시스템은 기준 전압 변성기(reference voltage transformer)와 피측정 전압변성기(test voltage transformer)에 동일한 1차측전압을 병렬로 가하고 두 전압변성기의 2차측 전압을 비교함으로써 피측정기의 비오차와 위상각 오차를 측정하는 comparative null method를 이용한다. 전압변성기 측정시스템 회로의 구성과, 1차측 전압과 2차측 전압의 벡터다이아그램은 아래 그림 5와 같다.

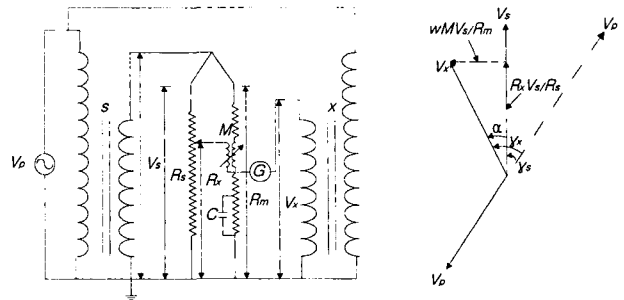


그림 5. 한국표준과학연구원의 전압변성기 측정시스템 회로와 벡터다이아그램
 Fig. 5. A circuit and vector diagram for voltage transformer measurement system in KRISS.

위의 회로에서 검류계 G의 평형(null balance)은 R_x 와 M 을 조정함으로써 이루어지고 평형 일때 그림 4의 벡터다이아그램으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tan \alpha = \frac{\frac{wM}{R_m} V_s}{\frac{R_x}{R_s} V_s} = \frac{wMR_s}{R_x R_m} \tag{18}$$

$$\cos \alpha = \frac{\frac{R_x}{R_s} V_s}{V_x} = \frac{V_s}{V_x} \frac{R_x}{R_s} \tag{19}$$

여기서 α 는 기준 전압변성기와 피측정 전압변성기의 2차측 전압사이의 위상각의 차이이다. 기준 전압변성기 변환비는 $N_s = V_p/V_s$ 이고 피측정 전압변성기의 변환비는 $N_x = V_p/V_x$ 이다. 따라서

$$N_x = N_s \frac{V_s}{V_x} = N_s \frac{R_s}{R_x} \cos \alpha \tag{20}$$

이다. $\gamma_x - \gamma_s = \alpha$ 이고 α 는 아주 작으므로 식 (18)의 $\tan \alpha \approx \alpha$ 이다. 따라서

표 2. 1차측전압(V_p) 3300 V에서 이론값과 실험결과의 비교
 Table 2. Comparison of theoretical and experimental values at primary voltage of 3300 V

2차 전압 (V)	영부담				부담 t				부담 b (실험값)				부담 b (계산값)	
	비오차 (%)	위상각 오차 (min)	R0(Ω)	X0(Ω)	비오차 (%)	위상각 오차 (min)	Rt(Ω)	Xt(Ω)	비오차 (%)	위상각 오차 (min)	Rb+(Ω)	Xb+(Ω)	비오차(%)	위상각 오차 (min)
70	0.157	2.23	1.74	0.49	0.068	3.60	710.5	343.1	0.103	7.25	115.2	1146.2	0.100	7.25
110	0.160	1.85	1.76	0.47	0.058	3.45	726.9	368.2	0.109	6.95	115.2	1146.2	0.105	6.94
120	0.162	1.85	1.79	0.50	0.058	3.45	731.7	380.5	0.109	6.90	115.2	1146.2	0.104	7.02

* 는 이론값이고 +는 전압변성기의 사양서에서 취한값이다.

$$\gamma_x = \gamma_s + \frac{wMR_s}{R_x R_m} \quad (21)$$

이다. 여기서 γ_x 와 γ_s 는 각각 기준 전압변성기와 피측정 전압변성기의 2차측 전압에 대한 1차측 전압의 위상각 차이이다.

또, $R_m = R_s$ 이므로 식 (21)은 아래와 같다.

$$\gamma_x = \gamma_s + \frac{wM}{R_x} \quad (22)$$

1 rad=3438 min 이므로 식 (22)을 분(min)의 단위로 환산하면 아래와 같다.

$$\gamma_x = \gamma_s + 3438 \frac{wM}{R_x} \quad (23)$$

식 (20)과 (22)로부터 알수 있듯이 피측정 전압변성기의 변환비와 위상각차이의 값은 기준전압변성기의 변환비와 위상각 차이의 값에 의존한다. 또한 평형조건은 $V_x \leq V_s$ 인 경우에만 성립하므로 식 (20)으로부터 기준전압변성기의 변환비가 피측정 전압변성기의 변환비보다 같거나 작아야 한다는 제한이 있다. 이러한 제한을 해결하기 위해서 기준전압변성기의 변환비가 외부고객이 사용하는 전압변성기의 변환비보다 2 % 작은 값에 맞춘다. 지금까지 한국표준과학연구원서 전압변성기의 측정방법으로서 사용되고 있는 comparative null method를 살펴보고 이 방법외에도 Deflection Methods, Direct Null Method, Resistance Method, Capacitance Method 등의 많은 방법이 있는데 외국 선진기관에서는 측정정밀도가 높은 Capacitance Bridge Method[3-6]를 이용하여 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 측정하고 있다.

4. 결 론

고전압 표준을 확립하기 위한 필수장비인 고전압 변성기의 2차측에 연결된 임의의 부담에서의 비오차/위상각 오차와 영부담에서의 비오차/위상각 오차와의 관계는 식 (11)과 (12)와 같다. 결론적으로 임의의 부담에서의 비오차와 위상각 오차는 임의의 부담의 임피던스값(R, X)과 전압변성기의 내부 임피던스값(R_0, X_0)에 영향을 받는다. 영부담을 포함한 두 개의 부담에서 비오차와 위상각 오차를 알 때 임의의 제 3의 부담에서의 비오차와 위상각 오차를 실험없이 이론적으로 알수 있다. 이 방법을 이용하게 되면 국제비교나 산업체간의 비교 시험시 서로다른 부담에서 측정된 값을 동일한 부담값에서 측정된 값으로 이론적으로 보정하여 서로 비교가 가능하다. 또한 이론값과 실제 실험결과와 비교한 결과 1차측 전압이 6600 V 인 경우 계산값과 실험결과가 비오차의 경우 0.007 %, 위상각 오차의 경우 0.16 min 이내에서 일치한다. 또 1차측 전압이 3300 V 인 경우는 계산값과 실험결과가 비오차의 경우 0.005 %, 위상각 오차의 경우 0.12 min 이내에서 일치한다. 이는 외국선진표준기관의 측정정밀도와 대등한 일치도이고, 한국표준과학연구원의 전압변성기 측정시스템의 측정정

밀도보다 10배 정도로 좋다. 추후에 전압변성기의 국제비교 측정에 대비하기 위해서는 한국표준과학연구원에서도 측정정확도가 높은 capacitance bridge 방법을 이용한 전압변성기 측정시스템을 확보해야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] J. L. Settles, W. R. Farber, and E. E. Connor, "The analytical and graphical determination of complete potential transformer characteristics" IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 79, No. 51, pp. 1213-1218, 1961.
- [2] IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers, American National Standards Institute, ANSI/IEEE vol. C57, No. 13, pp. 45-46, 1978.
- [3] W. J. M. Moore, P. N. Miljanic "The current comparator", Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1988.
- [4] William E. Anderson "A Calibration Service for Voltage Transformers and High-Voltage Capacitors" NBS Measurement Services Special Publication 250-33, 1988.
- [5] G. Jones, "The Traceable Calibration of Voltage Transformers" NPL Special Publication, 1994.
- [6] Eddy So, Hans-Georg Latzel, "NRC-PTB Intercomparison of Voltage Transformer Calibration Systems for High Voltage at 60 Hz, 50 Hz, and 16.66 Hz" IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 50, No. 2, pp. 419-421, 2001.

감사의 글

본 연구는 KASTO 3차년도(2003. 1. 1~2003. 12. 31) 과제인 "고전압 비율 국가표준확립" 과제의 지원으로 이루어졌고 지원에 감사드립니다.

부 록

식 (10)을 식 (4) 와 (7)을 이용하여 다시 쓰면

$$\begin{aligned} \frac{|V_p|}{|V_b|} e^{-j\Gamma_b} &= \frac{|V_p|}{|V_s|} e^{j\Gamma_0} \left[1 + \frac{(R_0 + jX_0)(R_b - jX_b)}{R_b^2 + X_b^2} \right] \\ &= \frac{|V_p|}{|V_s|} e^{-j\Gamma_0} \left[1 + \frac{(R_0 R_b + X_0 X_b - jR_0 X_b + jX_0 R_b)}{R_b^2 + X_b^2} \right] \end{aligned} \quad (10-a)$$

여기서 $e^{j\Gamma} = 1 - j\Gamma - (\Gamma^2/2) + \dots$, 이고 Γ_0 와 Γ_b 는 매우 작으므로 $e^{j\Gamma_0}$ 와 $e^{-j\Gamma_b}$ 의 급수전개에서 2차항 이상은 무시할 수 있으므로 식 (10-a)을 다시 쓰면

$$\begin{aligned} \frac{|V_p|}{|V_b|} (1 - j\Gamma_b) &\approx \frac{|V_p|}{|V_s|} (1 - j\Gamma_0) \\ &\left[1 + \frac{(R_0 R_b + X_0 X_b - jR_0 X_b + jX_0 R_b)}{R_b^2 + X_b^2} \right] \end{aligned} \quad (10-b)$$

이 된다. 식 (9) 에서 $Z_0 \ll Z_b$ 이므로 식 (10-b)는

$$\frac{|V_p|}{|V_s|} |1 - j\Gamma_b| \approx \frac{|V_p|}{|V_s|} (1 - j\Gamma_0) \left[1 + \frac{(R_0 R_b + X_0 X_b - jR_0 X_b + jX_0 R_b)}{R_b^2 + X_b^2} \right] \quad (10-c)$$

이 되고 식 (10-c) 에서 허수부를 택하면

$$\Gamma_b \approx \Gamma_0 - \frac{(X_0 R_b - X_b R_0)}{R_b^2 + X_b^2} + \frac{\Gamma_0 (R_0 R_b + X_0 X_b)}{R_b^2 + X_b^2} \quad (11)$$

이다. 반면 식 (10-b)는 식 (4)와 (7)을 이용하여 다시 쓰면

$$NRCF_b(1 - j\Gamma_b) = NRCF_0(1 - j\Gamma_0) \left[1 + \frac{(R_0 R_b + X_0 X_b - jR_0 X_b + jX_0 R_b)}{R_b^2 + X_b^2} \right] \quad (11-a)$$

이 되고 식 (11-a)에서 실수부만을 취하면

$$RCF_b = RCF_0 \left[1 + \frac{(R_0 R_b + X_0 X_b)}{R_b^2 + X_b^2} + \frac{\Gamma_0 (X_0 R_b - R_0 X_b)}{R_b^2 + X_b^2} \right] \quad (12)$$

이 된다.

저 자 소 개



정재갑(鄭在甲)

1965년 7월 4일생. 1998년 고려대 물리학과 졸업 박사. 2001년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹 선임연구원.

Tel : 042-868-5152, Fax : 042-868-5018
E-mail : jkjung@kriss.re.kr



권성원(權聖遠)

1952년 1월 19일생. 1974년 한국항공대 전자공학과. 1978년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹 책임연구원.

Tel : 042-868-5155, Fax : 042-868-5018
E-mail : swkwon@riss.re.kr



김규태(金奎泰)

1960년 4월 5일생. 1989년 KAIST 물리학과 졸업 박사. 1989년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹 책임연구원.

Tel : 042-868-5157, Fax : 042-868-5018
E-mail : ktkim@kriss.re.kr



김명수(金明壽)

1954년 8월 26일생. 1977년 서울공대 화공과 졸업. 1986년 미국 미주리대(공학박사). 1977년~1982년 국방과학연구소. 1987년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부장

Tel : 042-868-5015, Fax : 042-860-5018
E-mail : mkim@kriss.re.kr