

On-Site Calibration Technology of Burden using Voltage Transformer Comparator

鄭在甲[†] · 權聖遠^{*} · 朴榮泰^{*} · 金明壽^{**}
 (Jae Kap Jung · Sung Won Kwon · Young Tae Park · Myung Soo Kim)

Abstract - Both ratio error and phase angle error in voltage transformer(VT) depend on values of VT burden used. Thus, precise measurement of burden is very important for the evaluation of VT. A method of evaluation for VT burden has been developed by employing the portable decade resistor, with AC-DC resistance difference less than 10-3. The burden value(value and power factor) can be obtained by conductance and susceptance, obtained by measuring the change of ratio error and phase angle error caused by the resistance change of decade resistor. The burden value and power factor obtained by the method are consistent with those obtained using power analyzer within corresponding uncertainties.

Key Words: Voltage Transformer, Ratio Error, Phase Angle Error, Burden Value, Power Factor, Voltage Transformer Comparator

1. 서 론

전압변성기(voltage transformer, VT)를 생산하는 산업체나 교정시험기관에서는 VT의 특성을 평가 또는 교정하기 위하여 전압변성기 비교기를 사용하여 피 측정 전압변성기의 비 오차(ratio error)와 위상각 오차(phase angle error)를 측정한다. VT의 주요특성인 비 오차와 위상각 오차는 VT의 2차 측에 연결되는 부하의 임피던스와 동일한 조건의 부담(burden)을 병렬로 연결한 상태로 측정되며, 부담의 부담 값과 역률에 따라 달라진다.[1-3] 따라서 부담의 부담 값과 역률의 측정은 VT의 비 오차 및 위상각 오차의 정밀측정을 위하여 매우 중요하다.

본 연구에서 피 측정 VT의 2차 측에 걸리는 부담의 부담 값과 역률을 전압변성기 비교기를 이용하여 측정할 수 있는 새로운 기술을 개발했다. 이 방법은 정밀계단식 저항기를 피 교정 VT의 2차 측에 직렬로 연결하여 저항값의 변화에 대한 비오차와 위상각의 변화율을 측정함으로써 부담의 부담 값과 역률을 얻을 수 있다. 또한 이러한 방법으로 얻은 측정값에 대한 불확도도 같이 분석하였다. 본 연구실에서 구축한 전력 측정기를 이용한 부담특성 자동평가 시스템으로 직접 측정한 값과 비교하여 불확도 내에서 측정값들의 일치도를 확인함으로써 본 측정기술의 유효성을 검증하였다.

한편 VT 비교기를 이용한 부담의 평가기술은 산업체에서는 VT 비교기에 연결되어 있는 부담을 분해하지 않고 직접 연결된 상태로 현장조건에 맞는 부담의 특성을 평가할 수 있고, 또한 이동이 간편한 소형의 정밀 계단식 저항기를 산업체로 가져가서 현장에서 수시로 부담을 평가할 수 있는 장점이 있다.

2. 부담의 정의 및 부담의 측정원리

2-1. 부담의 정의

부담은 VT의 2차 측 단자 사이에 병렬로 연결되는 부하로 정의한다. VT의 경우 2차 측에 연결할 부하의 크기에 따라 규정된 조건하에서 KS 규격에 정한 특성을 보증할 수 있는 정격부담(rated burden)이 정해진다. VT 부담은 일반적으로 전압계 및 전력량계 전압단자의 입력 임피던스가 부하로 작용하는데, 정격주파수 및 2차 정격전압의 조건에서 부하에서 소비되는 피상전력(VA)과 그 부하의 역률로 표시한다.[4] VT의 부담은 표준용(0.1~0.2 급)의 경우는 10, 15, 25 VA가 있으며, 일반계기용(0.5, 1.0, 3.0 급)의 경우에는 15, 50, 100, 200, 500 VA가 있다. VT의 시험은 정격부담의 25% 및 100%에서 시험하되, 표준용 VT는 역률 1에 서, 일반계기용 VT는 역률 0.8 (지전류)에서 시험한다.[4]

[†] 교신저자, 正會員 : 한국표준과학연구원 선임연구원
 E-mail : jkjung@kriss.re.kr

^{*} 正會員 : 한국표준과학연구원 책임연구원

^{**} 正會員 : 한국표준과학연구원 전자기표준부장

接受日字 : 2005年 8月 1日

最終完了 : 2005年 10月 10日



그림 1. 전압변성기용 부담 Zb의 회로도.
 Fig. 1. Circuit of a burden Zb for voltage transformer.

그림 1은 역률이 1이 아닌 일반계기용 VT 부담의 회로도 로써, 저항(R)과 인덕터(L)가 직렬로 연결된 구조이다. 물론 역률이 1인 부담을 사용해야하는 표준기급 VT의 부담은 순수한 직류 저항만으로 만들어야 한다.

2-2. 부담의 측정원리

임피던스 Zb인 부담 b가 전압변성기에 연결될 때의 등가회로는 아래 그림 2과 같다.

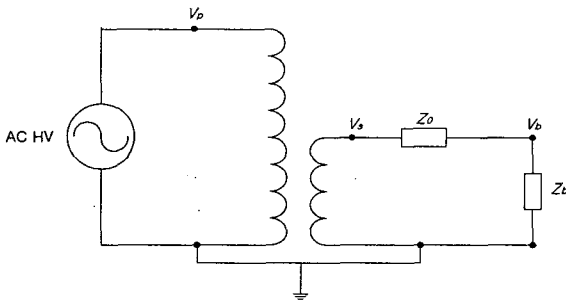


그림 2. 부담 Zb가 있을 때의 전압변성기의 등가회로
Fig. 2. An equivalent circuit for the voltage transformer with burden Zb

전압변성기 2차 측에 병렬로 연결되는 부담에 따라서 전압 변성기의 비 오차와 위상각 오차는 변하고, 그 관계는 식 (1)과 (2)와 같다.[2-3]

$$RE_b = RE_0 + (RE_0 - 1) \cdot \left(\frac{R_0 R_b + X_0 X_b}{R_b^2 + X_b^2} \right) = RE_0 + (RE_0 - 1)(G_b R_0 + B_b X_0) \quad (1)$$

$$\Gamma_b = \Gamma_0 - \frac{(X_0 R_b - X_b R_0)}{R_b^2 + X_b^2} = \Gamma_0 - G_b X_0 + B_b R_0 \quad (2)$$

식 (1), (2)의 각 인자들은 아래와 같다.

- RE_0 : 부담이 없을 때의 비오차,
- RE_b : 부담 Zb가 있을 때의 비오차,
- Γ_0 : 부담이 없을 때의 위상각 오차,
- Γ_b : 부담 Zb가 있을 때의 위상각 오차,
- $Z_0 = R_0 + jX_0$: 전압변성기의 누설 출력 임피던스 (leakage output impedance),
- $Z_b = R_b + jX_b$: 외부 부담의 임피던스.
- $G_b = \frac{R_b}{R_b^2 + X_b^2}$: 부담의 컨덕턴스(conductance)
- $B_b = \frac{X_b}{R_b^2 + X_b^2}$: 부담의 서셉턴스(susceptance)

식 (1)과 (2)에서와 같이 부담이 있을 때의 비 오차와 위

상각 오차는 부담 값에 따라 변한다. 부담 값 ($Z_b = R_b + jX_b$)의 측정에서 1% 오차는 비 오차와 위상각 오차에서 1% 오차를 야기한다. 따라서 서론에서 언급한 부담 값의 정확한 측정은 VT의 정확한 비 오차와 위상각 오차를 얻기 위하여 중요하다.

식 (1)과 (2)에서 직류-교류 차이가 0.1% 이하인 즉 $\frac{X_s}{R_s} \ll 10^{-3}$ 인 계단식 저항기(R_s)를 피 시험 VT의 2차 측에 직렬로 연결하면(그림 2의 Z0 옆에 직렬연결) 식 (1)과 (2)에서 R_0 는 $R_0 + R_s$ 로 대체되어 아래와 같이 각각 쓸 수 있다.

$$RE_b(R_0 + R_s) = RE_0 + (RE_0 - 1)[G_b(R_0 + R_s) + B_b X_0] = RE_b + (RE_0 - 1)G_b R_s \quad (3)$$

$$\Gamma_b(R_0 + R_s) = \Gamma_0 - G_b X_0 + B_b(R_0 + R_s) = \Gamma_b + B_b R_s \quad (4)$$

어떤 특정한 부담과 무 부담에서 식 (3)과 (4)의 RE_0 , RE_b , Γ_b 가 상수이므로, 식 (3)의 비 오차, $RE_b(R_0 + R_s)$ 와 식 (4)의 위상각 오차, $\Gamma_b(R_0 + R_s)$ 는 모두 계단식 저항기의 저항값(R_s)에 비례한다. 따라서 R_s 의 값을 변화시켜 가면서 측정된 $RE_b(R_0 + R_s)$ 와 $\Gamma_b(R_0 + R_s)$ 를 R_s 의 1차 함수로 프라팅하여 기울기를 얻으면 부담의 $(RE_0 - 1)G_b$ 와 서셉턴스(B_b)가 된다. 이렇게 얻어진 컨덕턴스(G_b)와 서셉턴스(B_b)로부터 부담의 부담 값과 역률은 아래의 관계에 의해 얻어진다.

$$Y_b = \sqrt{G_b^2 + B_b^2} \quad Z_b = \frac{1}{Y_b}$$

$$\text{부담 값} = V \cdot A = \frac{V_b^2}{Z_b}, \quad \text{부담의 역률} = \frac{G_b}{Y_b} \quad (5)$$

여기서 V_b 는 멀티미터를 이용하여 부담 양단의 전압을 측정하여 얻고 일반적으로 110 V이다.

3. 부담측정 시스템 구성 및 부담 측정 결과

전압변성기 비교기를 이용한 부담측정 장치의 구성도를 그림 3에 나타내었다. 전압비가 동일한 기준 전압변성기(reference voltage transformer)와 피 측정 전압변성기(test voltage transformer)의 1차 측에 동일한 전압을 공급하고, 두 전압변성기의 2차 측 전압을 전압 변성기 비교기(voltage transformer comparator)를 이용하여 비 오차와 위상각 오차를 측정한다. 여기서 기준 전압변성기와 비교기는 미국 Knopp 사의 제품으로 모델은 각각 WP-14000-4와 Knopp KVTs이다. 사용한 피 측정 전압변성기는 일본 Yokogawa 사의 모델 2261를 사용하였고, 1차측 전압이 440 V이고, 2차측 전압은 110 V로 유지하면서 측정하였다. 그림 3에서와 같이 외부부담 Zb는 전압변성기 2차측에 병렬로, R_s 로 표기한 계단식 저항기가(Gen Rad 사) 전압변성기 2차측에 직렬로 연결되어 있다.

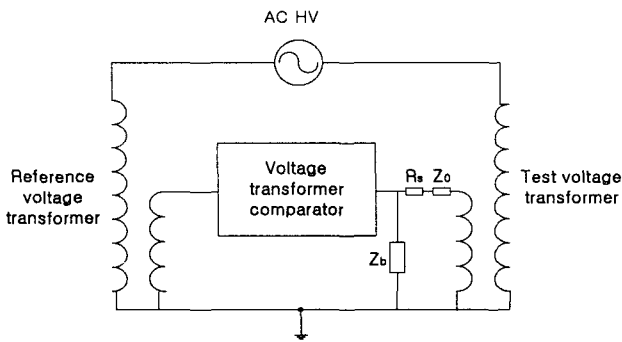


그림 3. 전압변성기 비교기 시스템의 구성
Fig. 3. Constitution of voltage transformer comparator system

직렬로 연결된 계단식 저항기의 저항을 변화시키면서(1 Ω에서 100 Ω 사이) 피 측정 전압변성기의 비 오차와 위상각 오차를 측정한다. 부담 값 15 VA, 역률 0.8, 60 Hz, 110 V에서의 비 오차와 위상각 오차의 측정결과를 예로 각각 그림 4 (a) 와 (b)에 나타내었다.

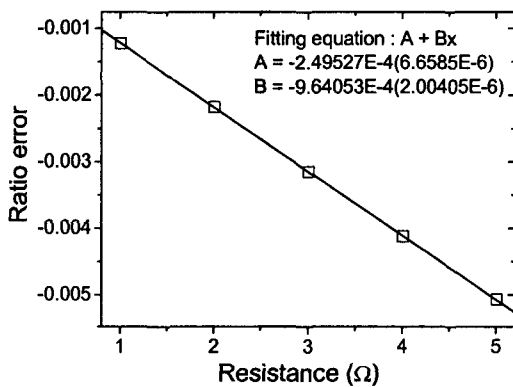


그림 4 (a). 계단식 저항기의 저항값의 변화에 따른 전압변성기의 비 오차의 측정결과.

Fig. 4 (a). Measurement results for ratio error of voltage transformer as a function of the resistance of decade resistor.

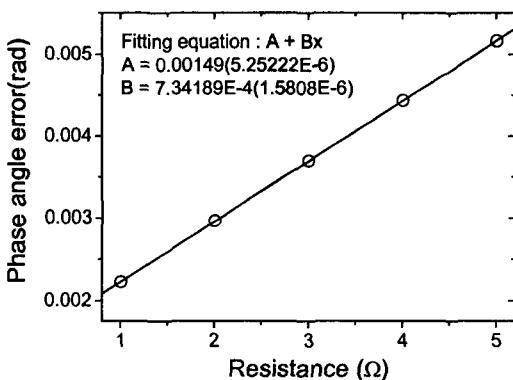


그림 4 (b). 계단식 저항기의 저항값의 변화에 따른 전압변성기의 위상각 오차의 측정결과.

Fig. 4 (b). Measurement results for phase angle error of voltage transformer as a function of resistance of the decade resistor.

여기서 2차 측이 개방되어있는 무 부담일때 측정된 피 측정 전압변성기의 비 오차 $RE_0 = 0.178\%$ 이고, 그림 4 (a)에서 피팅한 직선 $A + Bx$ 에서 기울기는 식 (3)에 의해 $B = (RE_0 - 1)G_b$ 이다. 따라서 부담의 컨덕턴스를 구할 수 있다. 식 (4)에 따라 그림 4 (b)에서 피팅된 직선 $A + Bx$ 에서 기울기 B 가 부담의 서셉턴스(B_b)임을 알 수 있다. 위와 같은 방법으로 부담 값 1.25 VA, 2.5 VA, 5 VA, 10 VA에서 측정된 부담의 컨덕턴스(G_b)와 서셉턴스(B_b)의 측정결과를 정리하여 15 VA의 결과와 함께 표 1의 두 번째와 세 번째 열에 각각 나타내었다. 부담의 부담 값과 역률은 식 (5)에 의해 구할 수 있고, 상기범위에서 구한 부담 값과 역률을 정리하여 표 1의 마지막 두 열에 나타내었다.

표 1. 부담의 컨덕턴스(G_b)와 서셉턴스(B_b)로부터 식 (5)에 의해 계산된 부담 값과 역률

Table 1. Burden value and power factor calculated according to eq. (5) from conductance and susceptance of the burden

부담의 정격/역률	컨덕턴스(G_b)	서셉턴스(B_b)	부담값	역률
1.25 VA/0.8	0.0000795	0.0000627	1.226 VA	0.785
2.5 VA/0.8	0.0001605	0.0001233	2.449 VA	0.793
5 VA/0.8	0.0003263	0.0002421	4.917 VA	0.803
10 VA/0.8	0.0006575	0.0004917	9.934 VA	0.801
15 VA/0.8	0.0009658	0.0007342	14.679 VA	0.796

4. 불확도 평가 및 측정 방법의 유효성 검증

불확도의 평가는 불확도 요인을 찾아 요인별 표준불확도 (u_1, u_2, \dots)와 자유도를 구하고 이로부터 상대 합성 표준불확도와 유효 자유도를 구한다. 유효 자유도와 신뢰수준에 따른 포함인자를 찾아 상대 합성 표준불확도에 곱하면 상대 확장 불확도(U)가 된다.[3] 여기서 포함인자는 2 이므로 상대 확장 불확도(U)는 아래와 같이 표현된다.[5]

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \dots} \quad (6)$$

전압변성기 비교측정 장치를 이용하여 전압변성기용 부담의 부담 값과 역률의 불확도 요인을 정리하여 각각 표 2 (a) 와 (b) 첫 째 열에 나타내었다. 각종 부담(1.25 VA ~ 15 VA)의 부담 값과 역률에 대해 평가된 상대 합성 표준불확도와 상대 확장 불확도를 각각 표 2 (a) 와 (b)의 마지막 두 열에 나타내었다. 부담 값에 대한 상대 확장 불확도는 약 3% 정도이고, 역률에 대한 상대 확장 불확도는 0.52% ~ 2.40%의 범위에 있다.

표 2 (a). 전압변성기용 부담의 부담 값에 대한 불확도 총괄표.

Table 2 (a). Uncertainty budget of burden value for voltage transformer. 단위 %

불확도 요인	1.25	2.5	5	10	15
	VA/0.8	VA/0.8	VA/0.8	VA/0.8	VA/0.8
수식의 fitting, u1	0.20	0.34	0.19	0.18	0.21
계단식 저항기, u2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
직-교류 변환오차, u3	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
수식 근사, u4	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
전압 측정, u5	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
상대 합성 표준불확도	1.52	1.55	1.52	1.52	1.52
상대 확장 불확도, U (k=2)	3.04	3.09	3.04	3.03	3.04

표 2 (b). 전압변성기용 부담의 역률에 대한 불확도 총괄표.

Table 2 (b). Uncertainty budget of power factor for voltage transformer. 단위 %

불확도 요인	1.25	2.5	5	10	15
	VA/0.8	VA/0.8	VA/0.8	VA/0.8	VA/0.8
수식의 fitting	0.70	1.19	0.57	0.74	0.22
계단식 저항기	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
직-교류 변환오차	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
수식 근사	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
상대 합성 표준불확도	0.72	1.20	0.59	0.76	0.26
상대 확장 불확도, U (k=2)	1.43	2.40	1.17	1.51	0.52

한편 전압변성기 비교기를 이용한 부담의 부담 값과 역률을 측정할 수 있는 기술의 유효성을 검증하기 위해 본 연구실에서 구축한 전력 측정기를 이용한 부담 특성 자동 평가 시스템으로 직접 측정한 값과 비교 하였다(그림 5). 그림 5 (a)와 (b) y축의 값은 아래와 같이 정의되는 상대오차 (relative error)이다.

$$\text{Relative error} = \frac{\text{measured value} - \text{rated value}}{\text{rated value}} \times 100 \quad [\%] \quad (7)$$

세로막대는 상측측정 방법에 대한 불확도이고 서로의 불확도에서 측정 결과가 일치함을 알 수 있다(그림 5).

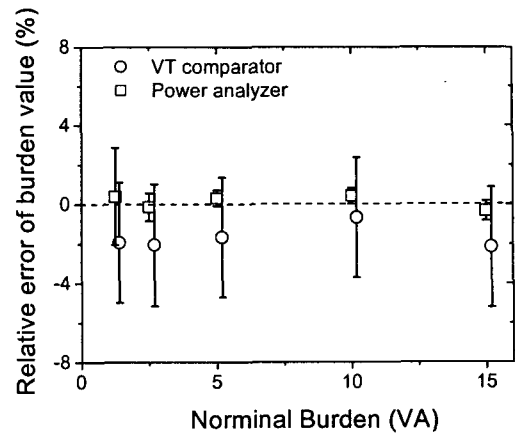


그림 5 (a). 전압변성기 비교기와 전력측정기로 직접 측정 한 부담 값의 상대오차의 비교.

Fig. 5 (a). Comparison of relative errors of burden values measured using VT comparator and power analyzer.

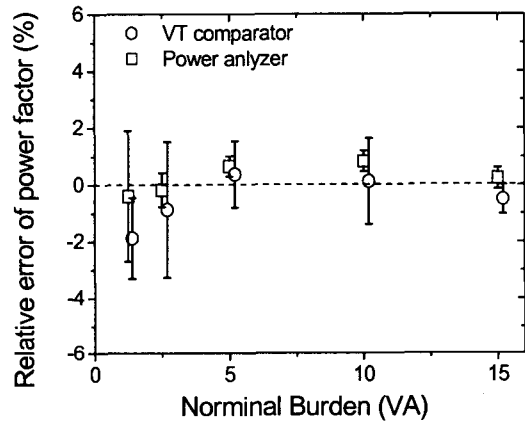


그림 5 (b). 전압변성기 비교기와 전력측정기로 직접 측정 한 역률의 상대오차의 비교.

Fig. 5 (b). Comparison of relative errors of power factors measured using VT comparator and power analyzer.

5. 결 론

본 연구에서는 피 측정 전압변성기의 2차 측에 걸리는 전압변성기용 부담의 부담 값과 역률을 전압변성기 비교기를 이용하여 측정할 수 있는 새로운 기술을 개발했다. 이 방법은 정밀계단식 저항기를 피 교정 VT의 2차 측에 직렬로 연결하여 저항값의 변화에 대한 비 오차와 위상각 오차의 변화율을 측정함으로써 부담의 부담 값과 역률을 얻을 수 있다. 이 방법에 대한 불확도를 평가한 결과 부담 값에 대한 상대 확장 불확도는 약 3 % 정도이고, 역률에 대한 상대 확장 불확도는 0.52 % ~ 2.40 % 의 범위에 있다. 이러한 상

대적으로 큰 불확도는 부담 양단의 전압측정에 대한 불확도가 커서 생기는 결과이고, 정밀 멀티미터를 이용하여 전압을 정밀측정하면 현재보다 불확도를 크게 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 또한 본 연구실에서 구축한 전력 측정기를 이용한 부담 특성 자동 평가 시스템을 이용하여 측정한 값과 비교한 결과 불확도 내에서 측정값이 일치함을 확인할 수 있었다.

본 기술의 장점은 산업현장의 전압변성기 비교기에 연결되어 있는 부담을 분해하지 않고, 정밀 계단식 저항기만을 사용하여 현장에서 수시로 부담을 평가할 수 있는 것과 동시에, 전압변성기 비교기의 평가가 가능하다는 점이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업인프라구축지원사업의 “연구시험설비구축사업”의 지원으로 이루어진 것입니다.

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] William E. Anderson "A Calibration Service for Voltage Transformers and High-Voltage Capacitors" NBS Measurement Services Special Publication 250-33, 1988.
- [3] 정재갑, 권성원, 김규태, 김명수, "외부부담이 전압변성기의 비오차와 위상각오차에 미치는 영향에 대한 연구" 대한전기학회지, vol. 53C, No. 3, pp.137-142, 2004.
- [4] 한국표준협회, "계기용변성기(표준용 및 일반계기용)", KS C 1706, 1982.
- [5] ISO "Guide to the expression of uncertainty in measurements," 1991.

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



박영태 (朴榮泰)

1952년 10월 31일생. 1997년 국립충남대학교 전기공학과 졸업 박사. 1983년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹 책임연구원

Tel : 042-868-5158, Fax : 042-868-5018

E-mail : pyt@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 : 042-868-5018

E-mail : mkim@kriss.re.kr