

대전류 측정용 마이크로-옴 분류기의 교정에 관한 연구

김민규, 김익균, 정주영, 김익수  
한국전기연구원

Calibration of micro-ohm shunt used for large current measurement

M.K.Kim, I.K.Kim, J.Y.Jeong, I.S.Kim  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - In this study, micro-ohm shunts with rated ac current of 2, 20, 80kA intended for use as an approved system for ac current measurement were calibrated according to IEC 60060. The scale factor and linearity were determined by comparison with the reference measuring system. Measurements of temperature rise due to the rated current was also investigated to analyze a temperature effect. One of the main goals was the determination of the measurement uncertainty of the shunt. The expanded uncertainty of the scale factor for the complete measuring system was satisfied with the STL(Short-circuit Testing Liaison) guide recognized tentatively.

1. 서 론

고전압·대전력 전기기기는 계측에 의존하는 부분이 현저하게 많은 기술이라고 할 수 있다. 소재의 특성에서부터 완성품에 대한 내전압 시험, 실 사용중 기기의 열화 판정 및 대전류 특성평가 등 일련의 계측기술과 밀접한 관계를 가지고 있다. 그러므로 보다 정밀하고 확장된 스케일의 계측 및 표준기술은 기기의 설계, 제작, 시험의 안전, 공정한 전력 무역 및 연구개발에 필요한 기초기술이 된다.

중전기기는 일반 제조업과는 달리 국제적 규정에 따라 반드시 성능평가를 한 후 사용하여야 하며, 성능평가를 하지 않거나 성능평가에서 실패하는 경우 제품으로서 가치가 완전히 상실되어 전혀 사용할 수 없기 때문에 중전기기를 생산하고자 하는 국가는 중전기기산업의 공통기반 설비인 성능평가설비를 우선적으로 구축하여야 하며, 또 한국 이를 정확하게 교정할 수 있는 고전압·대전류 측정의 국가 표준장비가 필요하다. 오늘날 고전압·대전력 분야의 계측에서는 전력설비의 고전압화·대용량화에 따라 설비 평가시험이 다양화되고, 설계를 위한 데이터에 높은 정밀도가 요구되고 절연파괴의 메커니즘 규명을 위한 연구추진 등을 배경으로 새로운 기술개발이 추진되고 있지만, 측정표준을 확립하는 것이 가장 선행되어야 할 중요한 과제이다.

우리나라의 경우 고전압과 대전류 측정표준은 아직 확립되어 있지 못하고 한국전기연구원이 고전압 측정분야 중 충격 전압에 대해서만 수회의 국제비교시험을 통해서 국제표준과의 소급성 확보에 노력하고 있다. 고전압과 대전류의 측정에 대해서는 그 특성으로 인해 국제표준 및 국가표준을 정하는 것이 어렵기 때문에 과거 10여 년간 유럽국가 및 IEC (International Electrotechnical Commission) 등 국제기구를 중심으로 측정표준의 제정

을 위해 노력해 왔다. 고전압 측정표준에 대해서는 1999년부터 적용할 수 있게 되었으나, 대전류 측정표준에 대해서는 아직 IEC 규격이 제안되지 않은 상태이며, 국제대전력 협의체인 STL(Short-circuit Testing Liaison)이 1999년 잠정적으로 제안한 상태이다.

본 연구에서는 대전류 측정시스템의 측정 불확도 평가 절차에 따라 대전력 시험소에서 이용되는 대전류 측정용 분류기(shunt)의 소급성 유지를 위한 교정의 방법 및 기준 분류기와의 비교시험에 의한 결과를 토대로 측정시스템의 불확도를 평가하였다.

2. 본 론

2.1 전류 측정계의 교정

가. Scale factor 결정

분류기를 이용한 전류 측정계의 구성은 그림 1과 같다. 입력단자 aa'를 통해서 흐르는 전류 파고치를 분류회로의 출력단자 dd'에 나타나는 전압 파고치로 나눈 것을 전류비라고 말하고 그 역수를 분류비라고 한다. 분류기를 이용해서 전류를 측정하는 것은 분류기중의 전압강하를 분류회로에 의해서 오실로스코프에 도달하도록 하고 그 측정전압에 전류비를 곱함으로써 시료에 흐르는 전류를 구한다. 분류회로의 전류비는 저항측정에 의한 방법, 또는 입력력 단자의 전류, 전압측정에 의한 방법 등에 의해 결정된다.

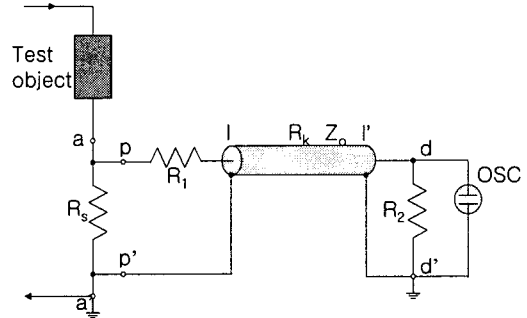


Fig. 1. Construction of measuring circuit using shunt. ( $R_s$ : shunt, aa': input of measuring system, pp': input of shunt circuit, ll': measuring cable,  $R_1, R_2$ : matching impedance,  $R_k$ : impedance of cable,  $Z_o$ : surge impedance of cable, pp'-dd': circuit of measuring cable, dd': output of shunt circuit, OSC: oscilloscope.)

저항에 의한 방법은 분류기, 정합저항 및 측정 케이블의 저항치를  $\pm 1\%$  이내의 정확도를 갖는 톰슨 브리지를 이용해서 측정하고, 다음 식에 의해서 전류비를 구한다. 측정케이블의 저항치는  $R_k \approx 0$ 이므로 전류비  $m_i$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$m_i = \frac{R_s + R_1 + R_2}{R_s R_2}$$

일반적으로  $R_s \ll R_1 + R_2$ ,  $R_1 \approx R_2$  이므로

$$m_i \approx \frac{2}{R_s}$$

이 된다.

또한, 입출력 단자의 전류, 전압의 측정에 의한 방법으로서의 분류회로의 입력단자 aa'를 통해서 전류를 흘리고 이것을 출력단자 dd'에 나타나는 전압을  $\pm 0.5\%$  이내의 정확도로 측정해서 양자의 비로부터 전류비를 구하는 것으로 한다.

나. 선형성 시험

선형성 시험은 사용범위(Operating Range)의 최소전류, 최대전류 값 사이를 대략적으로 3등분한 값에서 측정 한 5개의 값에 대한 배율의 평균값으로부터 각 측정치의 편차를 구하고, 이 중에서 최대값을 불확도 기여성분으로 채택한다.

다. 단기 안정성 시험

변환장치의 정격전류 실효치를 규정된 시간동안 인가하여야 한다. 규정된 일련의 전류를 인가하기 전과 직후(10분 이내)에 배율을 측정하고 이 값이 0.5% 이상 달라지는 안 된다.

라. 온도 효과

주위온도의 변화 때문에 발생하는 변환장치 배율 또는 대개변수(예를 들어 저항 또는 커패시턴스)의 변화는 각각의 온도계수(coefficient)를 사용하여 계산하거나 다른 온도에서 측정하여 결정할 수 있다. 주위온도가 넓은 범위에 걸쳐 변화하는 경우에는 온도보정인자를 사용할 수도 있다. 이 경우 사용한 어떠한 온도보정도 시험성적서에 기록하여야 한다. 각각의 경우에서 어떤 온도보정을 고려하여도 배율은 0.5% 이내 이어야 한다.

마. 근접 효과

변환기 자체의 전류단자가 개로되어 있는 상태에서 변환기에 가까이 있는 도체를 통해 전류를 흘려서 근접효과를 결정할 수 있다.

규정된 거리만큼 떨어져 있는 도체에 전류를 흘리면서 관련된 변환기의 출력에서 측정한 전압은 그 전류로 인한 전압의 0.5%(상용주파전류의 경우) 또는 2.0%(고주파전류의 경우) 보다 작아야 한다.

2.2 대전류 측정시스템의 불확도

대전류 측정표준에 대해서는 아직 IEC 규격이 제안되지 않았으며, STL 소속의 유럽 7개 기관이 참여하여 1995년부터 1997년까지 각 국의 대전력 시험소가 보유한 측정시스템과 순환했던 기준 분류기를 비교 시험하여 발생한 최대값을 근간으로 대전류 측정시스템에 허용될 종합 불확도의 잠정적 요구조건을 제안하였다. 승인 대전력 시험소의 대전류 측정시스템에 대한 요구조건은 표 1과 같다.

Table 1. Expanded uncertainty required for the approved measuring system

Current shape	Overall measurement uncertainty in %
Power frequency (symmetrical & asymmetrical) peak rms	$\pm 5$ $\pm 3$
High frequency (63 Hz - 5 kHz) peak	$\pm 10$

3. 교정 불확도 평가

3.1 A-type의 불확도 평가

일련의 반복 측정으로부터 통계 해석에 의해 얻어지는 인자에 대한 불확도를 우연 인자 (random factor) 또는 A-type 불확도라고 부르며 전류측정시스템의 배율은 여기에 속하며 통계적 계산에 의해서 결정된다.

승인 대전류 측정시스템으로 이용될 정격전류 2 kA, 20 kA, 80 kA 분류기를 기준 분류기에 비교시험을 통해 교정하였다. 각 분류기의 배율을 결정하기 위해 톰슨 브리지를 이용하여 분류기의 저항을 10회 측정 한 값의 표준편차는 최대 0.432 %이며 신뢰 수준, P = 95 %, n=10의 A-type 불확도는 다음과 같이 계산된다.

$$U_A = \frac{2.26 \times 0.432}{\sqrt{10}} = 0.309\%$$

여기서, 2.26은 자유도 9일 때의 95% 신뢰수준의 t-분포의 값이다.

3.2 B-type의 불확도 평가

통계적으로 구해지지는 않지만, 다른 수단에 의해서 평가되는 인자를 계통 인자(systematic factor) 또는 B-type라고 하며 직선성, 단기안정도, 온도의 영향, 근접 효과 등이 여기에 속한다. 20 kA 측정용 분류기를 100 kA급 기준분류기에 대해서 직선성 시험을 한 결과를 그림 2에 나타내었다. 이 결과로부터 측정시스템의 직선성이 정격전류까지 0.17 %이내에 있다는 것을 알 수 있다.

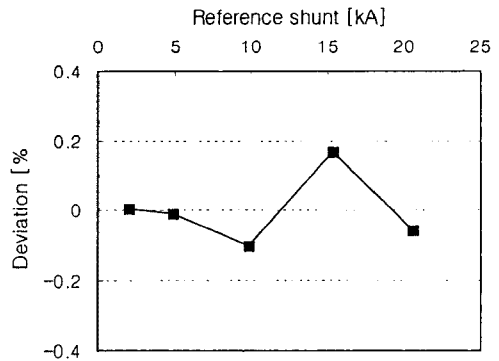


Fig. 2 Linearity test result

저항체에 대전류가 흐르는 경우 주울 열에 의한 열이 발생하므로 분류기의 이용에 있어서는 운전 사이클에 따른 온도상승시험을 하는 것이 분류기의 특성을 파악하는 데 필요하다. 그림 3은 정격 2 kA 분류기에 대한 운전 사이클에 따른 온도상승을 측정한 결과이다. 이러한 온도상승 시험결과로부터 대전류 인가 직전과 10분 후의 온도로부터 저항재료의 온도계수를 이용하여 저항값의 변화를 계산함으로써 대전류 통전에 따른 분류기의 단기안정성에 대한 불확도의 기여성분은 표 2와 같이 얻어졌다.

Table 2. Uncertainty contribution of short term stability corresponding to the change of resistance due to the temperature rise after 10 minutes.

Class	Temperature difference(°C)	Uncertainty contribution in %
2 kA	9.8	0.108
20 kA	13.8	0.152
80 kA	37.1	0.335

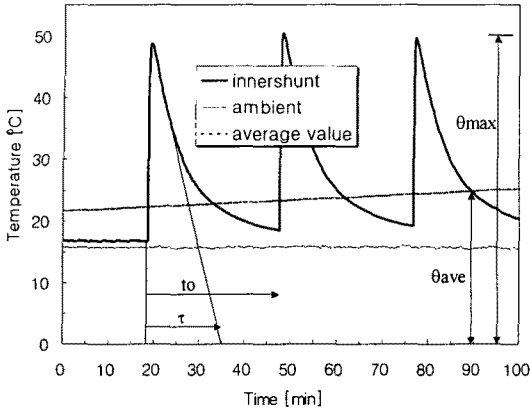


Fig. 3 Thermal cycles on the shunt rated 2 kA.

그림 3에서 평균온도  $\theta_{ave}$  및 최대온도  $\theta_{max}$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{\theta_{ave}}{\theta_{max}} = \frac{\tau}{t_0} [1 - \exp(-t_0/\tau)]$$

여기서  $t_0$ 는 운전 사이클(1s on, 30 min off)의 반복률이고  $\tau$ 는 공기의 흐름속도에 의존하는 냉각 시스템의 시정수이다. 분류기의 정확도는 저항의 기준 온도에 대한 최대 과열 온도의 함수가 된다. 온도 사이클 시험에 따라 각 분류기에 대해서 얻어진 냉각 시정수는 다음과 같다.

Table 3. Cooling constants corresponding to each shunt

Class	Cooling constant, $\tau$ (min)
2 kA	17
20 kA	50
80 kA	70

표 2에서 보는 바와 같이 정격 80 kA 분류기의 경우 운전 사이클에 따른 온도상승에 의한 저항의 변화가 크므로, 이러한 경우 자연 대류에 의한 냉각방식보다는 분류기 내부 공기의 흐름 속도를 증가시키는 강제대류 냉각의 채택을 추천하고 있으나, 뒷 식에서 보는 바와 같이 냉각 시정수를 낮추게 되면 평균온도  $\theta_{ave}$ 는 낮아지는 결과를 얻게 되지만,  $\theta_{ave}$ 와  $\theta_{max}$ 간의 차이는 증가하게 되어 정상상태의 정확도에는 손해를 가져오게 되므로 이러한 관점에서 측정 불확도를 개선하는 방안으로 공기 속도를 최적화하는 것이 필요하다.

온도상승 시험으로부터 전류인가에 의한 최대온도변화에 따른 저항의 변화로부터 계산한 온도효과에 대한 불확도 기여성분과 그 외 B-type 불확도 요소에 대한 기여성분들의 최대값을 표 4에 정리하였다. 근접효과에 대한 기여성분은 제작사가 제시한 값을 참고로 하였다. 결과적으로 B-type의 표준편차는

$$s_B = \sqrt{0.372} = 0.61$$

이고, B-type의 측정 불확도는 보정계수  $k=2$ 에 대해서

$$U_B = k \cdot s_B = 1.22$$

로 계산된다.

따라서 종합 측정 불확도  $U$ 는 A-type의 불확도  $U_A$ 와

B-type 불확도  $U_B$ 의 rss(root-sum-of-squares) 방식에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = 1.26\% \approx 1.3\%$$

Table 4. Contribution to B-type uncertainty

Source of uncertainty	Value in %	Standard deviation in %	Variance in (%) <sup>2</sup>
Calibration uncertainty of RSS	$U=1.0$	$s_m=1.0/2=0.5$	$s_m^2=0.25$
Linearity of MS	$a_1=0.2$	$s_{a1}=0.2/\sqrt{3}=0.115$	$s_{a1}^2=0.013$
Short-term stability	$a_2=0.33$	$s_{a2}=0.33/\sqrt{3}=0.191$	$s_{a2}^2=0.036$
Temperature effect	$a_3=0.42$	$s_{a3}=0.42/\sqrt{3}=0.242$	$s_{a3}^2=0.059$
Proximity effect	$a_4=0.2$	$s_{a4}=0.2/\sqrt{3}=0.115$	$s_{a4}^2=0.013$
Sum of variance			$\Sigma s^2 = 0.37$

RSS; reference system

MS; measurement system

#### 4. 결 론

본 연구에서는 ac 대전류 측정용 분류기의 교정시험 방법과 시험결과를 토대로 대전류 측정 시스템의 종합불확도를 평가하였다. 기준시스템과의 비교시험을 통한 측정시스템의 종합불확도는 최대 1.3%로 계산되며 이 값은 STL에서 잠정적으로 제한한 승인 측정시스템의 요구조건을 만족하고 있음을 확인하였다. 특히, 운전사이클에 의한 온도상승 시험 결과, 전체측정시스템의 불확도를 저감시킬 수 방안으로 냉각방식에 대한 최적조건을 유지한다면 측정의 정확도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] STL TC ad-hoc WG.000411, "Intercomparison of High Current Measuring Systems"
- [2] E. Rinaldi et al., "High energy shunt", 4th ISH, 61.09 (1983).
- [3] "고전압계측의 Traceability", 일본전기학회 기술보고 제 840호, (2001).
- [4] 신영준, 김익수, 김민규, "대전류측정시스템에 대한 잠정적 교정절차", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, 440, (2001).
- [5] 김민규, 김익균, 정주영, 김익수, "대전류 측정용 분류기의 교정", 대한전기학회 고전압 및 방전용융기술연구회 춘계학술대회 논문집 A, 58, (2002).