

# 대전류 분류기 저항의 정밀측정

## Precise Measurement of High Current Shunt Resistance

金奎泰<sup>†</sup> · 韓權洙<sup>\*</sup> · 權聖遠<sup>\*</sup> · 金紋奭<sup>\*</sup> · 鄭周榮<sup>\*\*</sup> · 金益秀<sup>\*\*</sup>  
 (K.-T. Kim · K.-S. Han · S.-W. Kwon · M.-S. Kim · J.Y. Jeong · I.S. Kim)

**Abstract** - Precise measurement of extremely low resistance shunt is important for characterization and calibration of high current instruments. We tested resistance measurement method for extremely high current shunt (up to 140 kA), where resistance is determined by precise measurement of voltage drop at 10 A test current in the frequency range of 40 Hz to 10 kHz. For the extremely low ac voltage to be precisely measured, a verification of the measurement method was also carried, where the inherent noise is systematically evaluated. The measurement uncertainty was estimated to be 1 % at 95 % confidence level (k=2) for about 50 μΩ.

**Key Words** : 분류기, 저저항, 대전류, 정밀측정, 교류전압

### 1. 서 론

세계적으로 전류의 국가표준은 비교적 낮은 100 A 이하의 영역에서 유지되고 있으며, 이들 영역의 전류 측정은 국제단위계 (SI: Le Système International d'unités)[1]에서 정의한 기본 단위 암페어(A)를 이용해 표현되고 있다. 전류측정의 국가표준소급체계를 좀더 자세히 살펴보면, 직류전류의 경우 표준저항에 미지의 직류전류를 흘릴 때 발생하는 전압을 표준전압과 비교 측정하여 전류크기를 결정하는 전위차계(potentiometer) 방식으로 표준소급체계가 구축되며 1 mA 수준의 직류전류의 경우 약 10<sup>-7</sup>의 상대불확도로 측정할 수 있다. 한편 교류전류의 경우 thermal converter 기술을 이용하여, 해당 교류전류와 열적 효과가 동등한 직류전류값을 해당 교류전류의 실효치로 부여하는 방식으로 표준소급체계가 구축되며 5 mA~20 mA 전류의 경우 40 Hz~10 kHz의 주파수 범위에서 약 6x10<sup>-5</sup>의 상대불확도로 측정할 수 있다. 또한 선진표준기관의 경우 100 A 이상 10 kA 까지의 대전류도 정확히 측정할 수 있는 기술을 갖고 있는데 예를 들어 직류전류의 경우 전류비교기술을 이용하여, 또 교류전류의 경우 전류변성기(current transformer)를 이용해 상대불확도 10<sup>-5</sup> 내지 10<sup>-4</sup> 수준으로 국가표준에 소급시키고 있다. 그러나 그 이상의 초대전류 영역에서는 측정이 용이하지 않으며, 측정결과를 국가표준에 소급시키는 기술이 아직 잘 확립되어 있지 못하다. 10 kA 이상의 교류

초대전류를 측정하는 데 흔히 사용되는 초대전류 분류기(shunt)의 경우도 마찬가지이다. 이를 위해 세계적으로 소급성을 갖기 위하여 STL(Short-circuit Testing Liaison : 단락시험협의회)에서는 140 kA 분류기의 국제순회 비교시험을 행하고 있다[2]. STL에 따르면 대칭 또는 비대칭 상용주파 전류의 실효치 또는 피크치에 대해 전체 측정불확도 1 % (신뢰수준 95 %, k=2)이 요구되고 있다. 분류기를 이용해 초대전류를 측정하기 위해서는 우선 분류기의 저항값을 정확히 측정해야 하는데, 분류기 저항을 사용전류에서 측정하는 것은 불가능하기 때문에 낮은 전류에서 측정된 저항값을 기준으로 하되 별도로 평가한 power coefficient를 적용하여 대전류에서 분류기 저항값을 결정하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 낮은 전류에서 저항값을 측정하는 작업에 한정하기로 한다. 전류용량이 클수록 분류기의 저항값이 작아지므로, 초대전류용 분류기의 저항은 급속 도체간 접촉저항 수준으로 매우 낮아진다. 이러한 낮은 저항값을 교류 주파수대역에서 국가표준에 소급되도록 정확히 측정하는 것은 배경잡음과 구별하기 어려운 낮은 교류전압을 측정해야 하므로 쉬운 일이 아니다. 본 논문에서는 140 kA (r.m.s.) 용량의 초대전류 분류기의 약 50 μΩ 저항값을 교류 주파수대역에서 국가표준에 소급하는 측정표준으로 약 1 % 불확도 수준으로 측정하는 방법과 그 측정결과의 검증방법에 대해 살펴보고자한다. 본 측정에 사용한 방법의 기본원리는 이미 알고 있는 최대 10 A의 교류전류를 분류기에 흘려 발생한 전압 약 0.5 mV를 4 단자법으로 측정하는 것이다.

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓國標準科學研究院 電氣·磁氣그룹  
 E-mail : ktkim@kriss.re.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 韓國標準科學研究院 電氣·磁氣그룹

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 韓國電氣研究院

接受日字 : 2005年 5月 2日

最終完了 : 2005年 7月 18日

### 2. 측정 방법

#### 2.1 측정장비

측정대상인 대전류 분류기는 일본 Tokyo Transformer

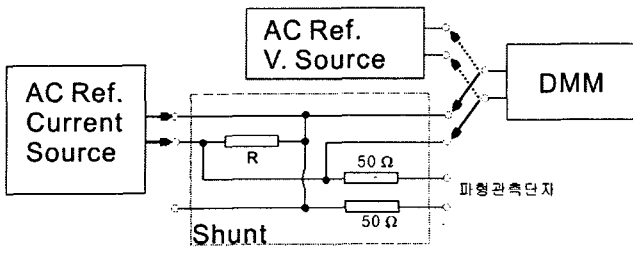


그림 1. 대전류 분류기의 저항값 측정 구성도.  
 Fig. 1. Configuration of resistance measurement for high current shunt.

Co. Ltd. 의 M-95로써 최대 대전류(실효치) 140 kA (r.m.s.), 저항값은 약 51.9  $\mu\Omega$ 이다. 사용된 주요 측정장비는 트랜스컨덕턴스증폭기(Transconductance amplifier: Fluke 5725), 다기능교정기(Multifunction calibrator: Fluke 5700) 및 8½ 디지털 멀티미터 (DMM: Agilent 3458HFL)이다. 그림 1은 그 측정회로를 보여준다. 여기서 기준 교류전압원 (AC reference voltage source)으로는 다기능교정기, 기준 교류전류원 (AC reference current source)로는 트랜스컨덕턴스증폭기를 사용하였다. 시험전류로는 기준 교류전류원의 최대전류인 10 A로 하였고 주파수역시 최대공급 능력인 40 Hz~10 kHz 범위로 하였다. 측정결과와 국가표준 소급성을 확보하기 위해 기준 교류전류원과 기준 교류전압원은 미리 유지하고 있는 교류표준 (thermal converter, ac voltage divider)을 이용하여 교정을 해두었다.

2.2 측정순서

- 구체적인 측정 방법 및 순서는 다음과 같다.
- 모든 측정장비는 미리 4시간 이상 예열해둔다.
  - 대입법에 사용하기 위해 다기능 교정기의 기준 교류전압 (0.5 mV)을 DMM 으로 측정해둔다. ( $V_{r1}$ )
  - 그림 1과 같이 4단자 측정회로를 구성한다.
  - 다기능교정기를 트랜스컨덕턴스에 연결하고 피측정 분류기에 10 A 기준 교류전류( $I$ )를 공급한다.
  - 분류기양단의 전압단자에 발생한 교류전압을 DMM으로 측정한다. ( $V_{r2}$ )
  - 주파수별 분류기 저항을 구하기 위해 다른 주파수에 대해 위 측정을 반복한다.

대입법 측정의 기준전압으로 사용한 다기능교정기 출력의 교정값을  $U$ 라 하면, 위 측정순서에서 얻어지는 분류기의 저항값  $R$ 은 아래 식으로 계산한다.

$$R = \{V_{r2} - (V_{r1} - U)\} / I \tag{1}$$

3. 측정 결과

그림 2에서 검은 원들은 앞의 측정방법에 따라 측정한 분류기 저항의 값을 주파수별로 나타낸 것이다. 40 Hz부터 10 kHz의 범위에서 측정값은 최대상대편차 0.4 % 이내에서 일정한 값을 보여주고 있다. 표 1은 본 측정의 불확도를 ISO 의 불확도 표현지침(통칭 GUM이라 함)[3]에 따라 요소별로 종합하여 계산한 결과이다. 기준 교류전류 공급기의 불확도는 제작사 사양에 따르면 본 측정에 사용된 주파

수에 대해 99 % 신뢰수준에서 0.33 % 로서, 본 측정에서 목표하고 있는 1 % 불확도 (95% 신뢰수준)에 도달하기에 충분하다. 반면 DMM의 경우 전압측정에 직접적인 방식으로 DMM을 사용하는 것이 아니라, 보다 정확한 측정을 위해 다기능교정기 Fluke 5700의 교류전압을 기준값으로 하여 피측정 전압을 대입방식으로 측정하였으므로, DMM의 단기 안정도에 관계하는 매개 불확도만 측정에 영향을 준다. 제작사 사양에 따르면 해당측정의 DMM의 매개 불확도는 0.004 % 정도로서 무시가능하다. 한편 대입법의 기준으로 사용되는 다기능교정기의 제작사 사양에 따르면 0.5 mV 교류전압의 불확도는 99 % 신뢰수준에서 5  $\mu V$ 로 1 %에 해당한다. 결국 기준 교류전압의 불확도가 전체 측정의 불확도를 좌우하는 가장 큰 불확도 요인이 된다. 이외에도 연결선의 누설, 노이즈의 영향 등의 불확도 요인이 있으나, 분류기의 저항이 극히 작으므로 무시할 수 있다고 평가되었다. 그 중 노이즈 영향에 대해서는 다음 장에서 자세히 설명될 것이다.

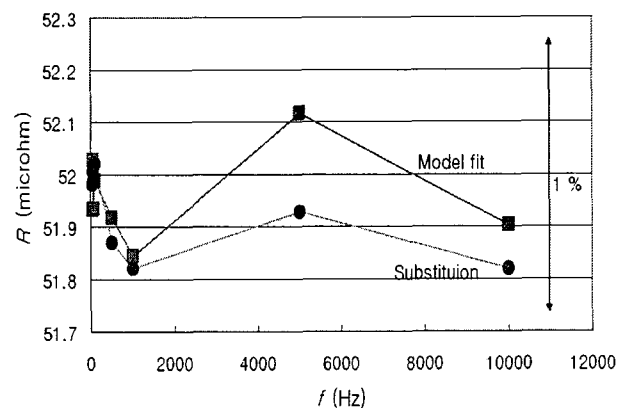


그림 2. 대전류 분류기의 저항값 측정 결과. ●: 대입법에 의한 최종결과, ■: 노이즈 모델 분석법에 의한 검증  
 Fig. 2. Result of resistance measurement for high current shunt. ●: Final result by substitution method, ■: Verification by noise model analysis.

표 1. 주파수 40 Hz~10 kHz 범위에서 분류기 저항 측정의 불확도 표

Table 1. Uncertainty budget for shunt resistance measurement in frequency range of 40 Hz~10 kHz. (C.L.= Confidence Level)

Uncertainty source	Relative uncert. (C.L.)	Rel. standard uncert. (k=1)	Degree of freedom
- AC voltage of calibrator(Fluke5700)	1 % (99 %)	0.38 %	∞
- Current (10 A)	0.33 % (99 %)	0.13 %	∞
- Type A (repeatability)		< 0.22 %	9
Combined std. uncert.		0.46 %	∞
Uncertainty (95 % C.L.k=2)		0.92 %	
Effective deg. of freedom		∞	

4. 측정결과의 검증

본 측정에서 처럼 매우 낮은 교류전압을 측정하는 경우 외부 노이즈에 의한 측정값의 변화가능성에 주의해야한다. 위 측정결과에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여, 노이즈영향을 고려한 독립적인 측정모델을 세워서 이에 입각한 측정을 시도하였다. 일반적으로 피측정 교류신호전압  $V$ 에 이하는 상관 없는 노이즈  $V_N$ 이 포함되어 있을 경우 DMM이 읽는 교류전압  $V_M$ 은 다음 식으로 표현될 수 있다.[4]

$$V_M = (V^2 + V_N^2)^{1/2} \quad (2)$$

표준 전류를 인가하여 전압강하를 읽는 본 측정의 경우에  $V=IR$  ( $R$ 은 피측정 분류기의 저항)이 되므로 식 (2)는 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$V_M = (I^2 R^2 + V_N^2)^{1/2} \quad (3)$$

따라서 표준 전류  $I$ 를 변화시켜가며  $V_M$ 을 측정하여 얻은  $V_M$ 대  $I$ 의 곡선을 분석하면 피측정 분류기 저항  $R$ 을 구할 수 있게 된다. 본 실험에서는 전류  $I$ 를 10 A, 8 A, 6 A, 4 A, 2 A로 변화시켜가며  $V_M$  값들을 측정하고, 선형최소자승법을 적용하기 위해  $V_M^2$ 대  $I^2$ 의 곡선을 fitting하여  $R^2$  값을 구하고 이러한 방식을 각 주파수별로 적용하여 구한  $R$  값들을 앞 2장의 측정결과와 비교하였다. 표 2는 주파수별로 두 가지 방식으로 구한  $R$  값들과 그들의 type A 표준불확도를 보여준다. 여기서 최소자승법으로 구한  $R$ 값의 type A 불확도는 측정된  $V_M^2$  값과 선형최소자승법으로 fitting한  $V_M^2$  곡선의 값의 편차를 전류의 제곱으로 나누고 다시 제곱근을 취하여  $R$ 의 편차 형식으로 구한 값들 중 10 A 및 8 A에 해당하는 두 편차를 평균한 것을 표준편차로 가정하고 이를 해당 자유도인 3 (5개의 측정점으로부터  $R$ 과  $V_N$  두개의 변수를 추출하였으므로 자유도는  $5-2=3$ 이 된다.)의 제곱근으로 나누어 평균표준편차의 형식으로 나타낸 값이다. 그림 2의 흰 정사각형은 최소자승법으로 구한  $R$  값을 보여준다. 표

1과 그림 2에서 보듯이 두 가지 방법으로 구한  $R$ 값이 최대 상대편차 약 0.2 %내에서 잘 일치하고 있다. 0.2 % 편차는 RSS (Root Sum Square) 합성법에 의하면 1 % 목표 불확도에 대해 약  $(0.2 \% / 1 \%)^2 / 2 = 1/50$ 에 해당하는 량으로 무시가가능하다. 이것은 최소자승법에 의해 제거된 노이즈가 이미 대입법을 통해서 효과적으로 제거되었음을 의미하는 것이며, 결국 측정에 영향을 준 노이즈의 주 성분은 대입법으로 제거될 수 있는 성분, 즉 DMM 내부 노이즈 뿐이었음을 의미하는 것이다. 따라서 그림 1과 같은 측정회로구성에서 40 Hz~10 kHz 범위에서는 외부 노이즈의 영향은 무시할 수 있을 정도로 작았음을 알 수 있다.

5. 결 론

140 kA (r.m.s.)용 초대전류 분류기 저항 51.9  $\mu\Omega$ 의 값을 40 Hz~10 kHz 주파수 범위에서 정밀 측정하기위해, 대입법을 적용한 측정방법을 고안하고 시험하였다. 10 A의 시험전류에서 약 1 % (95 % 신뢰수준)의 불확도를 갖는 것으로 분석되었다. 한편 고안된 대입법 측정의 유효성 검증을 위해 노이즈결합 모델을 적용한 측정을 수행해본 결과, 두 측정값이 최대상대편차 0.2 % 내에서 잘 일치하였으며, 본 측정의 주파수 범위에서는 외부 노이즈의 영향이 거의 없음을 확인할 수 있었다. 따라서 대입법에 의한 분류기 저항의 측정은 약 1 % 불확도 범위내에서 충분히 유효한 것으로 평가된다. 그러나 STL의 요구 불확도 수준을 충분히 충족시키기 위해서는 저전압 영역에서 보다 정확한 기준 교류전압 실현기술이 개발되어야 할 것이다.

표 1. 분류기 저항 측정의 결과

Table 1. Result of shunt resistance measurement

Freq.	Noise model fitting method			0.5 mV DMM substitution method		
	Shunt R ( $\mu\Omega$ )	Type A(%)	Abs type A ( $\mu\Omega$ )	Shunt R ( $\mu\Omega$ )	Type A(%)	Abs type A ( $\mu\Omega$ )
40Hz	51.9323	0.61	0.32	51.9814	0.04	0.02
50Hz	52.0275	0.74	0.39	52.0056	0.02	0.01
60Hz	51.9334	0.78	0.41	51.9889	0.04	0.02
100Hz	51.9882	1.49	0.77	52.0201	0.01	0.00
500Hz	51.9169	1.99	0.96	51.8686	0.04	0.02
1000Hz	51.8439	2.09	1.08	51.8208	0.07	0.04
5000Hz	52.1163	2.51	1.31	51.9271	0.11	0.06
10000Hz	51.9024	2.83	1.47	51.8196	0.22	0.11

참 고 문 헌

- [1] 국제단위계, 제7 개정판, KRISS-99-101-SP,1999.
- [2] 정주영 외, "대전류 표준측정시스템의 최종방안의 기술적 배경에 대한 고찰", 2003년도 대한전기학회 전력기술 부문회 추계학술대회 논문집, 2003.11.
- [3] ISO "Guide to the expression of uncertainty in measurements," 1991.
- [4] Agilent Application Note AN 1389-3, "AC Voltage Measurement Errors in Digital Multimeters".

저 자 소 개



김 규 태(金奎泰)

1983 인하대학교 졸업(공학사)  
1985 한국과학기술원 물리학석사  
1989 한국과학기술원 물리학박사  
1993 독일연방물리기술청 박사후 연수  
1989-현재 한국표준과학연구원 근무  
(현 전기자기그룹장)



김 문 석(金紋奭)

1997 충북대학교 물리학 박사  
1997-2001 포항공대초전도연구단연구원  
2001-2003 오하이오 주립대 연구원  
2003-현재 한국표준과학연구원 근무



한 권 수(韓權洙)

1987 대전한밭대학교 졸업(공학사)  
1978-현재 한국표준과학연구원 근무



정 주 영(鄭周榮)

1986 인하대 전기공학과 졸업  
1989 동 대학원 졸업(석사)  
2003 부산대학원 전기공학과 박사과정수료  
1989 - 현재 한국전기연구원 근무



권 성 원(權聖遠)

1974년 한국항공대학교 졸업(공학사)  
1974-1977 공군정밀측정시험소 근무  
1978년-현재 한국표준과학연구원 근무



김 익 수(金益秀)

1981 부산대 전기공학과 졸업  
1983 동 대학원 졸업(석사)  
2000 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)  
1983 - 현재 한국전기연구원 근무