

직류 전압/저항 비율 초정밀 측정기술

김규태, 유광민
한국표준과학연구원, 전기자기그룹

Precision Measurement Technique of DC Voltage/Resistance Ratio

Kyu-Tae Kim, Kwang Min Yu
Korea Research Institute of Standards and Science

Abstract - 직렬 저항형 직류전압 분할기의 비율측정용으로 1:1 저항비를 정밀 측정장치가 개발되었다. 능동가드 및 교환방법을 이용하여 분할기 측정 시 가장 큰 장애 요인인 하나인 누설효과를 성공적으로 제거할 수 있었다. 새로 개발한 측정장치는 10 kΩ 또는 100 kΩ 저항에 대하여 약 10⁻⁸의 정확도가 가능한 것으로 분석되었다.

1. 서 론

많은 국가측정기관에서 저항형 분할기는 SI(국제단위계(1))에 소급되는 조셉슨 전압 표준기의 1 V 표준과 대략 1000 V 범위까지 확장표준 간의 가장 정확한 연결 수단으로 활용되고 있다. 이 경우 확장 범위의 SI 소급 정확도는 분할기 비율의 정확도에 의해 결정된다. 저항비를 측정 방법 가운데 가장 정확한 방법은 전류비교기를 이용하는 방식이다. 그러나 10 kΩ 이상의 저항범위에 대해서는 사용 전류의 크기가 작아지므로 전류 비교기 등에서 사용되는 전류감지 방식보다는 potentiometry 등에서 사용되는 전압 감지방식이 더 정확하다. 본 연구에서는 비교적 높은 전압까지도 활용할 수 있도록 10 kΩ 이상의 저항범위에 대해서 잘 알려진 potentiometry^{[2],[3]} 원리를 적용하였다. 즉 공칭값이 같은 2개 저항 R_m과 R₁을 적절로 연결한 상태에서 동일한 전류를 흘릴 때 각 저항의 전압강하의 비율, V_m/V₁을 구하는데, 정확도를 높이기 위해 해당 강하 전압 근방의 전압 V₀를 갖는 더미(dummy) 기준전압기를 이용하여 각 전압강하의 차전압을 측정한다. 이 측정 원리를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_m/V_1 &= 1 + (V_m - V_1)/V_1 \\ &= 1 + (\Delta V_m - \Delta V_1)/V_1 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 ΔV_m은 V_m-V₀를 의미한다. 두 전압강하를 직접 측정하는 대신 더미에 대한 차전압을 측정하는 이유는 μV 이하 몇 자리까지 정확히 측정하기 위해서이다. 예컨대 10 kΩ에 대해 1 mA를 사용할 경우 V_m은 10 V 근처이므로 직접 측정할 경우 μV 이하 자리까지 정확히 측정하기가 어렵다. 그러나 10 V 더미를 사용할 경우 작은 차전압만을 측정하면 되므로 μV 이하 자리까지 정확히 측정하기가 용이하다. (ΔV_m-ΔV₁)/V₁의 크기가 대략 10⁻⁵이므로 V₁의 측정은 대략 0.01 % 정도면 충분하다. 따라서 ΔV_m, ΔV₁만 정확히 측정하면 정확한 1:1 비율을 구할 수 있게 된다. 식 (1)의 분자에 더미 전압 V₀는 서로 상쇄되므로 V₀의 정확한 값은 알 필요 없고 대신 측정하는 동안 안정도만 충분히 보장되면 된다. 그런데 이러한 저항 비율 측정에서 누설효과는 10 kΩ 이상의 범위에서 매우 중요하게 된다. 개발된 측정장치는 새로운 교환측정 기술 및 능동가드 기술을 적용하여 누설영향을 원천적으로 제거할 수 있었으며 잡음이 매우 적어 짧은 시간 안에 매우 정확한 측정값을 얻을 수 있었다.

2. 개발된 비율 측정 장치

2.1 측정장치

본 장치에서 사용되는 주요 장비에는 전류공급기, 더미 기준기, 전압계 등이 있으며 측정 회로는 스텝모터로 구동되는 고전압 스위치들로 구성된다(그림 1). 본 실험에서는 전류공급기로는 직류전압조정기를, 더미기준기로는 제너전압표준기 또는 또 다른 직류전압조정기를, 전압계로는 8½ 디지털 멀티미터를 사용하였다. 그림 2는 교환방식을 적용한 비율 측정과정을 나타내고 있다. 모든 측정과정은 PC를 통해 자동으로 이루어지도록 프로그램되었다. 교환 측정방법 및 능동가드를 사용하기 전의 측정시스템에서는 각 전압강하의 차전압 ΔV_m과 ΔV₁ 측정을 위해 그림 2 (b)의 전압계(D) 1번 도체와 8번 도체가 R_m과 R₁ 사이를 평행 이동하는 방식이어서 다음과 같은 문제가 있었다.

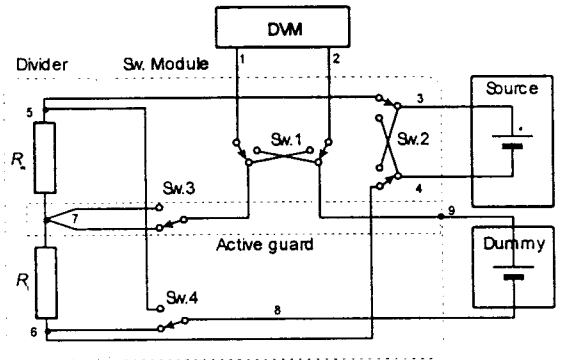


그림 1 개발된 비율 측정장치의 회로도

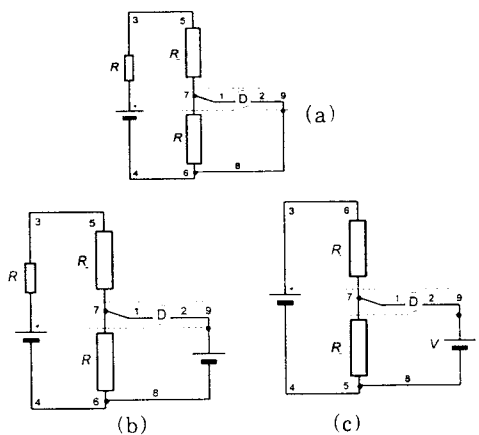


그림 2. 비율 측정과정

- ΔV_m 및 ΔV_1 측정에 따라 등가회로가 달라지므로 누설효과를 정확히 평가하기가 어려웠다.
- ΔV_m 및 ΔV_1 측정에 따라 전압계가 보는 접지구성이 달라지며 일반적인 방식대로 R_1 의 하단을 접지로 사용할 경우 ΔV_m 측정시 common mode potential에 기인한 잡음이 증가한다.
- 100 V 이상의 고전압에서 측정시 전압계의 입력 하단과 전압계 케이스 단자 사이의 허용전압 이상이 걸려 전압계가 손상될 가능성이 있다.

다음은 이러한 문제를 해결하기 위해 새로 개발된 장치에서 사용한 두 가지 핵심 기술인 교환 측정방법 및 능동가드에 대해서 기술한다.

2.2 교환측정방법

교환측정에서는 ΔV_m 및 ΔV_1 을 동일한 회로에서 측정할 수 있도록 R_m 및 R_1 의 위치를 교환하여 측정한다. 교환과정은 그림 1의 두 스위치 sw.2 및 sw.3를 동시에 작동시킴으로써 이루어진다. 교환 측정 방식은 단지 R_m 및 R_1 만 위치가 바뀌는 것외에는 ΔV_m 및 ΔV_1 을 동일한 회로에서 측정하므로 측정회로에 누설이 있어도 그 영향이 ΔV_m 및 ΔV_1 측정시 동일하게 작용하므로 상쇄되는 경향이 있을 뿐 만 아니라 접지구성이 측정과정중 바뀌는 일이 없어 최종 접지구성이 용이하다. 본 장치에서 접지점은 더미 출력 상단으로 선정하였으며 모든 shield 및 케이스가 이곳에 연결된다. 이러한 접지구성에서는 전압계의 입력하단과 케이스간의 전압이 항상 측정하는 차전압 수준을 유지하므로 100 V 이상에서 측정하더라도 과전압이 걸리는 일이 없어 안심하고 사용할 수 있다. 그러나 이러한 교환 측정 방식에서는 그림 1의 sw.2의 두 선택 위치간 접촉저항 차이로 인한 오차가 발생하며 정확한 보상이 필요하다. 다행히 이러한 영향은 10 k Ω 이상의 저항 측정에 대해서는 충분히 작다. 여기에 대해서는 불확도 분석에서 자세히 논의할 것이다.

2.3 능동가드

교환 측정방식이 모든 누설을 제거할 수 있는 것은 아니다. 즉 그림 2에서 도체 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9은 교환 측정과정 중 변하지 않으므로 이들간의 누설은 제거된다. 그러나 피측정 저항에 붙어있는 도체 5, 6 번은 교환과정에 따라 위치가 변하므로 이들을 포함한 누설경로의 효과는 다른 방법으로 제거해야한다. 이를 위해 누설경로들을 살펴 볼 필요가 있다. 먼저 도체 5, 6 중 하나와 도체 3, 4, 8 들간의 누설은 측정에 영향을 미치지 않음을 쉽게 알 수 있다. 왜냐하면 누설 병렬저항은 최악의 경우 100 G Ω 정도이며 전류원의 출력저항 및 연결도선으로 이루어진 직렬 등가 저항은 1 Ω 이하에 대해 최대 10^{-11} 정도의 상대오차를 유발할 뿐이기 때문이다. 따라서 문제가 되는 누설 경로는 도체 5 또는 6과 도체 1, 2, 7, 9 사이의 누설이다. 즉도체 1, 2, 7, 9를 누설취약 도체라고 부를 수 있다. 이들 문제의 누설 경로들은 그림 1 및 그림 2에서 점선 상자로 나타난 능동가드를 사용함으로써 완전히 차단된다. 즉 이들 누설 취약도체들을 완전히 둘러싸고 있는 가드가 전술한 접지점에 연결됨으로써 그 전위가 이들 도체와 동일하게 되고 따라서 누설전류는 실제로 0이 되는 것이다. 단 측정 회로 내에 비교적 넓은 면적의 가드 전극이 삽입됨으로 가드와 각 도체간의 누설이 발생할 수 있으나 이들 누설은 능동가드에 의해 차단된다. 단, 더미 출력 하단과 가드 사이의 누설은 능동 가드로도 차단이 안될 것이다. 그러나 이 누설 저항은 최악의 경우 100 G Ω 정도로서 더미의 출력저항 및 연결도선으로 이루어진 직렬 등가 저항 1 Ω 이하에 대해 최대 10^{-11} 정도의 상대오차를 유발할 뿐이다.

3. 측정 결과

새로 개발된 측정 장치의 능동 가드의 효과를 시험해 보기 위해 고의로 100 G Ω 의 누설 저항 2개를 삽입하여 100 k Ω 저항의 1:1 비율을 측정해 보았다. 삽입 위치는 누설 취약 도체 7과 능동가드 사이 및 능동가드와 도체 6 사이이다. 그림 3에서 마름모는 고의 누설을 연결하기 전 능동가드를 작동시킨 정상상태의 측정결과이며, 정사각형은 고의 누설을 삽입하고 가드를 접지와 연결함으로써 능동가드를 작동시켰을 때의 측정 결과이며 삼각형은 고의 누설을 삽입하고 능동 가드를 사용하지 않았을 때의 측정 결과이다. 능동가드를 사용했을 때 고의 누설의 존재 유무에 따른 두 측정 결과사이의 차이는 0.01×10^{-6} 이하로서 표준편차 약 0.03×10^{-6} 이내에서 매우 잘 일치하였다. 반면 능동가드를 사용하지 않았을 때(가드를 접지와 분리) 고의 누설로 인해 1:1 비율 측정값은 약 $+0.26 \times 10^{-6}$ 만큼 증가한 모습을 보여준다. 따라서 능동 가드는 매우 효과적으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 고의 누설에 의한 오차가 + 방향으로 나타난 것은 고의 누설이 주로 그림 2의 R_1 에 병렬누설로 작용한 때문이다. 측정 회로에 고의 누설 외의 다른 누설이 없다고 가정하였을 때 예상된 비율 증가분은 $+0.5 \times 10^{-6}$ 이었다. 누설 회로 분석 결과 $+0.26 \times 10^{-6}$ 만큼 증가분을 만들기 위해서는 능동가드를 사용하지 않았을 때 실제로 측정회로에는 약 수 백 G Ω ~ 수 T Ω 의 균일한 누설이 내재하는 것으로 추정되었다. 능동가드를 사용할 때 이러한 누설의 영향은 완벽히 배제됨이 실험을 통해 확인된 셈이다. 그림 4는 비슷한 실험을 10 k Ω 표준저항 (ESI SR104)에 대해서 수행한 결과이다. 역시 능동 가드를 사용했을 때 고의 누설의 영향은 표준편차 약 0.03×10^{-6} 이내에서 전혀 발견되지 않았으나 능동가드를 사용하지 않았을 때 약 $+0.03 \times 10^{-6}$ 의

100kohm 1:1 ratio - 1 (in 10⁻⁶)

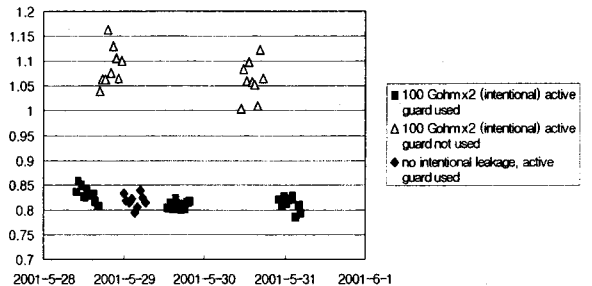


그림 3. 여러 가지 누설조건에 측정한 100 k Ω 표준저항 (Datron 4902S) 1:1 비율의 1에 대한 편차. 측정전류는 0.3 mA.

10 k(ESI)

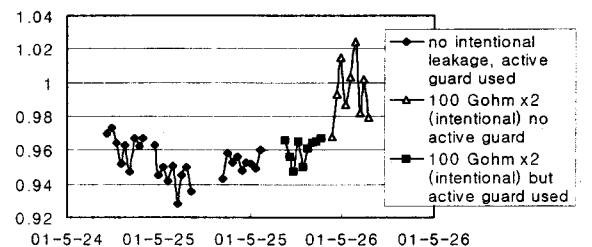


그림 4. 10 k Ω 표준저항에 대해 그림 3과 동일한 측정결과

누설효과가 나타났다. 예상했던 대로 100 kΩ에 대해서 얻은 결과에 비해 약 10배 적은 효과이다.

그림 5는 100 kΩ 표준저항에 대해 표준기급 상용 전류비교기(DCC: Guildline 6675) 및 본 측정장치(DCVR)로 각기 1:1 비율을 측정된 결과이다. 두 측정값 평균의 차이는 약 0.07×10^{-6} 으로서 DCC 측정의 표준편차 약 0.43×10^{-6} ($n=25$) 이내에서 잘 일치하였다.

4. 측정 장치의 불확도

본 실험에서 불확도에 영향을 주는 요인으로는 전류공급기, 더미, 전압계 등의 측정 중 안정도, 전술한 sw.2의 접촉저항 차이, 전압계 offset의 측정중 변화, 측정회로 및 스위치의 열기전력 offset 등이 있다. 여기서 측정회로의 누설효과는 무시가능하므로 고려하지 않기로 한다. 이들 여러 요인중 안정도에 관한 불확도는 이상적인 피 측정 저항에 대해 반복 측정한 A형 불확도로 평가하기로 하고 (이 A형 불확도에는 측정 장치의 안정도 뿐 아니라 피 측정 저항의 안정도도 포함되어 있으나 본 실험에서 사용한 표준기급 저항의 경우 그 안정도 영향은 매우 작다.) 나머지는 B형 불확도로 평가하기로 한다.^[5]

4.1 A형 불확도, u_A

반복측정의 표준편차는 총 9회의 측정에 대하여 100 kΩ 및 10 kΩ 공히 약 0.03×10^{-6} 으로서 A형 불확도는 약 $0.03 \times 10^{-6} / \sqrt{9} = 0.01 \times 10^{-6}$ 정도이다.

4.2 B형 불확도-접촉저항, u_{B1}

sw.2의 접촉저항 차이는 교환측정과정에서 두 직렬 저항에 공급되는 전류의 차이를 유발하여 비율오차를 일으킨다. 측정된 접촉저항의 차이는 약 0.4 mΩ ~ 0.8 mΩ으로서 10 kΩ 측정시 약 $+0.02 \times 10^{-6} \sim +0.04 \times 10^{-6}$ 의 오차를, 100 kΩ 측정시 약 $+0.002 \times 10^{-6} \sim +0.004 \times 10^{-6}$ 의 오차를 유발한다. 이것을 보상하는 과정에서 접촉저항 측정의 불확실성으로 인한 불확도를 u_{B1} 으로 둔다. 접촉저항 측정값의 확률분포를 중앙값이 0.6 mΩ 이고 반 범위가 0.4 mΩ 인 균일한 직각 확률분포로 가정하면 해당 표준 불확도는 반범위 나누기 $\sqrt{3}$ 이므로 100 kΩ 측정의 경우 $u_{B1} = 0.012 \times 10^{-6}$, 10 kΩ 측정의 경우 $u_{B1} = 0.0012 \times 10^{-6}$ 이 된다.

4.3 B형 불확도-전압계 offset, u_{B2}

ΔV_m 및 ΔV_1 측정값에 각기 포함되어 있는 전압계의 offset은 식 (1)에서 알 수 있듯이 서로 상쇄되므로 문제가 안되나 측정중 offset이 변하면 오차를 유발하게 된다. 측정 중 최대 offset 변화는 약 0.1 μV 로서 이를 직각확률분포의 반범위로 가정하면 100 kΩ 측정의 경우 전압강하 30 V 에 대하여 $u_{B2} = 0.002 \times 10^{-6}$, 10 kΩ 측정의 경우 전압강하 3 V 에 대하여 $u_{B2} = 0.02 \times 10^{-6}$ 이 된다.

4.4 B형 불확도-열기전력 offset, u_{B3}

측정회로 및 스위치 접점에서 발생하는 접촉전위인 열기전력의 재현성이 오차를 유발한다. 그 재현 범위는 본 장치에 사용한 스위치의 경우 최대 약 ±20 nV에 불과하다. 3개 스위치가 사용되고 식 (1)에는 두 개의 차전압이 포함되므로 총 $20 \text{ nV} \times \sqrt{3} \times \sqrt{2}$ 의 범위에 해당된다. 이것을 직각확률분포의 반범위로 놓으면 100 kΩ 측정의 경우 전압강하 30 V 에 대하여 $u_{B3} = 0.001 \times 10^{-6}$, 10 kΩ 측정의 경우 전압강하 3 V 에 대하여 $u_{B3} = 0.01 \times 10^{-6}$ 이 된다.

이상의 불확도를 종합정리하면 최종불확도($k=1$)는

X=Fluke 100 kohm; S=L&N 100 kohm
(in 10^{-6})

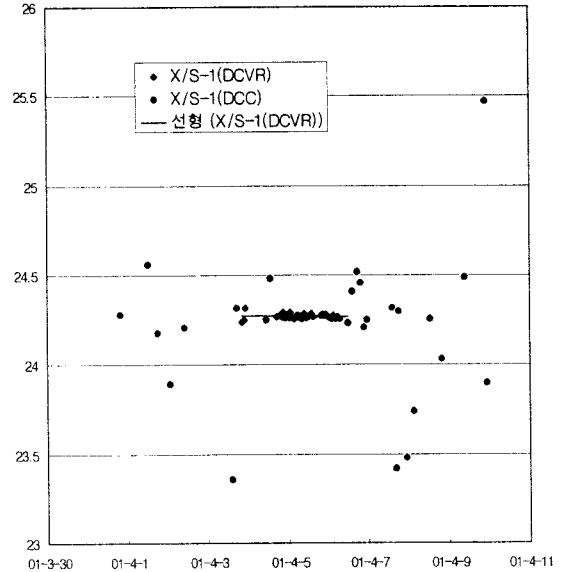


그림 5. 100 kΩ 표준저항의 1:1 비율 측정 결과. DCC는 직류전류비교기, DCVR은 본 연구에서 개발한 장치를 표시한다. 측정전류는 0.3 mA 이다.

100 kΩ 측정의 경우 $u_c = 0.016 \times 10^{-6}$, 10 kΩ 측정의 경우 $u_c = 0.025 \times 10^{-6}$ 이 된다.

5. 결론

1 kV까지의 직류 전압 표준의 SI 소급성을 확보하기 위해 필수적인 전압/저항 비율 측정 장치를 새로 개발하였다. 교환측정법과 능동가드를 사용함으로써 과거에 비해 신뢰성있는 측정이 가능해졌으며 불확도 분석이 단순 명료해 질 수 있었다. 본 측정 장치의 성능을 시험해 보기 위해 고의 누설을 삽입해서 측정해본 결과 능동가드의 작동이 매우 효과적임을 확인하였다. 또한 표준기급 직류전류비교기와 비교측정을 수행한 결과, 100 kΩ의 고저항 영역에서 본 장치는 탁월한 성능을 발휘함을 확인할 수 있었다.

(참고 문헌)

- [1] 法律 第5,930號 국가표준기본법, 1999. 7. 1; 국제단위계, 제7 개정판, KRISS-99-101-SP, 1999.
- [2] T.J. Witt, D. Reymann and D. Avrons, "An accurate 10-kΩ resistance measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.40, pp.271-273, Apr. 1991.
- [3] L. Bliet et al., "Measurements of the quantized Hall resistance h/e^2 with a reproducibility of 10^{-8} and its application for a novel determination of the ohm," *PTB-Mitt.*, vol.93, pp.19-20 and pp.44-45, 1988.
- [4] K.-T. Kim, S.I. Park, Y.M. Cho and S.-W. Kwon, "Common error sources in using a series-resistors type voltage divider below level of 0.01 ppm," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.44, pp. 318-321, Apr. 1995.
- [5] ISO "Guide to the expression of uncertainty in measurements," 1993.