

고전압 비율 정밀 측정기술

김규태, 이상화
한국표준과학연구원, 전기자기그룹

Precision Measurement Technique of High Voltage Ratio

Kyu-Tae Kim, Sang-Hwa Lee
Korea Research Institute of Standards and Science

Abstract - 직류 100 kV 까지 고전압의 국가 측정표준을 확립하기 위하여 저항형 분압기의 비율을 정밀 측정하는 방법을 고안하였다. 일반적으로 저항형 분압기의 비율은 사용 전압에 따라 변하므로 저항과 전압비율을 동시에 측정하는 기술이 요구된다. 본 발표에서는 고안된 binary step-up 방법의 원리를 설명하고 실제 적용시 예상되는 불확도를 계산하고자 한다.

1. 서 론

국가측정표준 대표기관으로서 전기 및 자기분야 국가 표준을 유지하고 있는 본 연구그룹에서는 1 kV 미만의 직류 저전압 표준을 국제 수준의 정확도로 확립 유지 공급하고 있으나 100 kV 수준의 고전압의 표준은 자체 확립된 표준이 없어 해외표준에 의존하고 있었으며 최대 100 kV 전압의 정확도는 0.1 % 수준에 머물고 있었다. 최근 의료용 X-ray 기기, 정전기 측정기 등의 교정 수요의 증가와 아울러 전력산업 개편에 따른 고전압 전력측정의 필요성이 대두됨에 따라 고전압의 보다 정확한 국가 표준을 확립할 필요가 증대되고 있다. 일반적으로 100 kV 까지의 직류 고전압 표준을 정확히 국가 표준으로 소급 구현하기 위해 저항형 분압기가 사용된다. 그러나 저항형 분압기의 비율은 사용 전압이 높아짐에 따라 변할 수 있으므로 전압과 저항비율을 동시에 측정해야 한다. 현재까지 사용된 일반적인 방법은 동종의 다른 분압기를 이용하여 분압 비율의 가능한 최대 전압계수를 구하여 해당 정확도의 한계로 평가하는 방법이다.^{(1), (2), (3)} 보다 명확한 전압-저항비율 관계를 측정하기 위한 방법으로 분압기에 10개 정도의 균일한 tap을 삽입하여 1/10의 전압에서 각 구간의 저항 비율을 측정하여 사용전압에서의 비율을 구하는 방법⁽⁴⁾ 등이 발표되었다. 그러나 이 방법에서는 부가 tap 설치를 위해 분압기에 삽입된 구조물들이 높은 사용 전압에서 코로나 누설을 일으키지 않도록 설계하는 기술이 요구된다. 본 논문에서는 분압기의 원래 구조를 변경하지 않고 2개 분압기의 직/병렬 조합에 의해 고전압 저항비율을 간단히 측정하기 위해 고안된 이진 승단 (binary step-up) 방법을 기술하고 예상되는 불확도 수준을 분석하고자 한다.

2. Binary Step Up

2.1 측정기기

본 실험에 사용된 분압기는 Park type⁽⁵⁾으로 총 100 MΩ의 저항이 실린더형 기둥 주위에 나선형으로 배열된 것이다. 분압 출력을 측정하기 위해 10 kΩ (Vishey type) 정밀저항을 직렬로 덧붙였다. (분압비 약 10000:1) 본 실험에서는 이런 종류의 분압기를 2개 사용하여 측정전압이 증가됨에 따라 분압비가 변화하는 것을 측정할 수 있음을 확인하였다. 고전압원으로는 Spellman 사의 직류 고전압 공급기를, 분압전압 측정기로는 8½ 디지털 멀티미터를(HP) 사용하였다.

2.2 Binary step up 측정방법

이미 알고 있는 임의 전압값(V_1) 및 V_1 에서의 두 분압기의 비율을 기준으로 그 2배에 해당하는 전압(V_2) 및 V_2 에서의 두 분압기 비율을 측정하는 방법이다. 먼저 그림 1(a)와 같이 두 개의 분압기($R_1+R_2=100\text{ M}\Omega \times 2$) 및 10 kΩ(r) 탭을 모두 직렬로 연결한 후 고전압 공급기로부터 V_2 의 전압을 공급하고 분압 출력(m_s)을 측정한다. 각 분압기에는 대략 V_2 의 1/2인 V_1 의 전압이 인가되므로 이미 알고 있는 분압비율을 사용하여 V_2 의 값을 결정할 수 있게 된다. 즉

$$V_2 = m_s \{1 + \Gamma_1(V_1) + \Gamma_2(V_1)\} \quad (1)$$

여기서 Γ_i 는 R_i/r 을 의미한다. 다음으로 그림 1(b)와 같이 두 분압기를 분리하고 각각에 이렇게 구해진 V_2 를 인가한 후 각각의 출력 분압(m_1, m_2)을 전압계로 측정하면 V_2 에서의 각 분압비 $\Gamma_1(V_2)$ 및 $\Gamma_2(V_2)$ 도 얻게 된다. 즉

$$\Gamma_1(V_2) = \frac{V_2}{m_1}, \quad \Gamma_2(V_2) = \frac{V_2}{m_2} \quad (2)$$

이와 같은 두 과정을 통해 $V_2=2V_1$ 및 V_2 에서 두 분압기의 분압비를 얻게된다. 이와 같은 과정을 N 번 반복하여 $V_N = 2^N V_1$ 의 전압과 V_N 에서의 분압비를 구하는 것이 본 측정의 원리이다. 따라서 이미 표준이 확립되어 있는 1 kV 근방의 직류전압 및 그때의 분압비를 기준으로 100 kV의 전압을 측정하려면, 대략 1.25 kV→2.5 kV, 2.5 kV→5 kV, 5 kV→10 kV, 12.5 kV→25 kV, 25 kV→50 kV, 50 kV→100 kV의 6 단계의 측정을 반복해야 한다. 이 중 1.25 kV→10 kV까지의 과정에서는 전압원 및 분압기의 안정도가 비교적 높아 매우 정확히 측정할 수 있으나 12.5 kV→100 kV까지의 과정에서는 전압원 및 분압기의 안정도가 측정 정확도를 좌우한다.

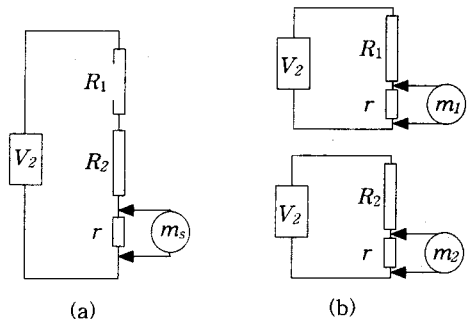


그림 1. Binary step-up 측정방법

2.3 측정 실험 결과

전압비 측정에 사용할 전압원과 분할기의 안정도를 조사하기 위하여 그림 1 (a)와 같은 회로에 전압을 인가한 후 시간에 따라 분할전압을 측정하였다. 측정된 결과를 공칭값에 대한 상대편차로 나타내면 그림 2와 같다. 전압 인가후 보이는 완만한 증가는 주로 분압기의 온도가 조금씩 상승됨에 따라 저항이 감소하기 때문이다. 약 25 kV 이하에서는 전압 인가후 약 5시간 후에는 약 20×10^{-6} 의 범위 내에서 안정화되는 모습을 보인다. 그러나 50 kV 이상에서는 5시간 이후에도 계속 조금씩 증가하는 모습을 보인다. 따라서 현재의 분압기로는 50 kV 이상의 측정이 곤란할 것으로 보이나, 50 kV 이하의 전압에 대해서는 binary step up 방법으로 비교적 정확한 측정이 가능할 것으로 보인다. 그림 3은 고전압 공급기의 on/off 에 따른 분압기 출력의 재현성을 10 kV에서 측정한 것이다. 이 실험 결과는 고전압 공급기의 전압이 on/off 반복 시에도 설정한 전압에 정확히 회복됨을 보여준다. 단 출력전압이 그림 2에서와는 달리 계속 변화하는 모습을 보이는 이유는 이 경우 저전압 단 저항으로 안정도가 좋지 않은 1 k Ω 일반 부품 저항을 사용하였기 때문에 나타난 현상이다.

3. 예상불확도

3.1 불확도 요인

본 실험의 측정불확도에 영향을 주는 요인으로서는 고전압 공급기 공급 전압의 측정중 drift, 분압기의 저항값 측정 중 drift, 분압 출력 측정의 불확도 등이 있다. 식 (1)로부터 V_2 의 상대불확도 $u(V_2)$ 는

$$u(V_2) \approx \sqrt{u(m_s)^2 + u(\Gamma_1)^2/4 + u(\Gamma_2)^2/4}. \quad (3)$$

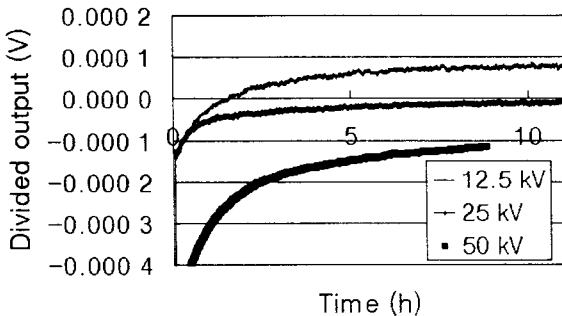


그림 2. 고전압 분할기의 출력전압의 상대편차를 시간에 따라 측정한 결과

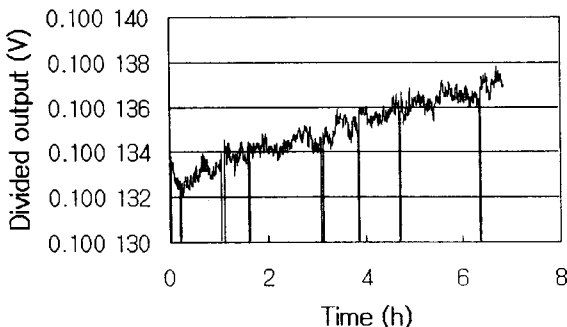


그림 3. 10 kV 인가 전압 on/off 시의 분압기 출력전압의 재현성.

이것은 $\Gamma_1 \approx \Gamma_2$ 의 관계를 이용한 근사식이다. 여기서 $u(m_s)$, $u(\Gamma_1)$, $u(\Gamma_2)$ 는 모두 해당변수의 상대불확도이다. 다음 식 (2)로부터

$$u(\Gamma_1) = \sqrt{u(V_2)^2 + u(m_1)^2}, u(\Gamma_2) = \sqrt{u(V_2)^2 + u(m_2)^2} \quad (4)$$

의 관계식을 얻는다. 12.5 kV \rightarrow 25 kV, 25 kV \rightarrow 50 kV의 과정에 대해서는 분압기의 안정도가 비슷하므로 측정 불확도 수준이 동일하다. 이 범위에서 1회 step up의 불확도는 식 (3), (4)로부터 추정할 수 있다. 측정에 사용한 전압계의 경우 1 V \sim 5 V의 범위에서 정확도는 10^{-5} 정도이므로 $u(m_s) \approx 10 \times 10^{-6}$ 로 놓을 수 있고, 그림 2에서 보듯이 5시간 안정화 후 $u(\Gamma_1) \approx u(\Gamma_2) \approx 10 \times 10^{-6}$ 정도이다. 따라서 $u(V_2) \approx 12 \times 10^{-6}$ 이고, $u(\Gamma_1) \approx u(\Gamma_2) \approx 15 \times 10^{-6}$ 정도가 예상된다. 만일 이러한 과정 2회 반복하여 12.5 kV \rightarrow 50 kV의 측정을 한다면 50 kV는 약 15×10^{-6} , 50 kV에서 분압비는 20×10^{-6} 의 정확도로 측정이 가능할 것이다. 그러나 이 불확도에는 2회 측정시의 분압비의 재현정도가 포함되지 않았다. 앞으로 실제 1단계 binary step up 과정을 반복측정하여 분압비의 안정도가 가려진 후에 종합적인 분석이 가능할 것이다.

4. 결 론

직류 100 kV 까지 고전압의 국가 측정표준을 확립하기 위하여 고안된 binary step up 방법의 타당성 조사를 위해 측정기 들의 안정도 성능과 예상되는 측정 불확도를 분석하였다. 1회 binary step up의 경우 외상의 경우 약 20×10^{-6} 수준의 분압비 측정이 가능할 것으로 보이며 연속적인 binary step up 측정과정을 통한 분압비의 안정도 조사가 계속 수행될 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] R.B.D. Knight and P. Martin, "A high voltage divider having an uncertainty of 5 ppm," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.42, pp. 568-570, Apr. 1993.
- [2] Yi Li, J. Rungis, K.-T. Kim, Y.M. Cho, T.R. McCumber, J.G. Dunn, L.V.D. Zwan and D. Hoffman, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.48, pp. 158-161, Apr. 1999.
- [3] R. Marx, "New concept of PTBs standard divider for direct voltage up to 100 kV," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.50, pp. 426-429, Apr. 2001.
- [4] T-H. Su, I-P. Chen, H.Tsao, "Automated calibration methods for a high-voltage Park divider," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.44, pp. 318-321, Apr. 1995.
- [5] J. Park, "Special shielded resistor for high-voltage dc measurement," J. Res. Nat. Fur. Stand., vol.66C, pp. 19-24, 1962.