

정밀전력계와 적산전력량계의 시험을 위한 기준시스템

박영태, 유광민, 장석명\*  
한국표준과학연구원, \*충남대학교

The Reference System For The Test of Precision Power Meter And Watthour Meter

Y.T.Park, G.M.Yu, S.M.Jang\*  
KRISS, \*Chungnam University

**Abstract** - 교류전력을 측정하기 위하여 알고 있는 직류전력과 동시에 비교할 수 있는 전력비교기를 개발하였으며 이 비교기를 기본으로 하여 정밀 전력계와 전자식 전력량계를 교정하거나 시험검사 할 수 있는 기준시스템인 전력표준기를 개발하였다. 특히 push-pull 기술을 이용한 전력비교기는 간단하며 정확도가 매우 높은 것으로 평가되었으며 전력비교기의 전체 불확도는 30 μW/VA로 평가되었다.

변환시켜 나타내고 큰 전압  $v$ 를 신호전압  $v_1$ 으로 표시한다면 두 신호를 승산하여 적분하면 전력의 값으로 나타낼 수 있다. 특히 열적인 변화를 사용한 승산인 경우 다음과 같은 등식을 사용할 수 있다.

$$u_1 \cdot u_2 = \frac{1}{4} [(u_1 + u_2)^2 - (u_1 - u_2)^2] \quad (1)$$

1. 서 론

정밀급 전력계, 전자식 전력량계와 같은 전기 에너지 측정하는 기기는 주기적으로 높은 등급의 정확도를 가진 기기와 상호비교를 통하여 그 특성을 평가받는다. 이때 사용되는 높은 등급의 정확도를 가진 기기를 기준장치, 혹은 표준기라고 하는데 구성하는 방법과 측정기술에 따라 정확도의 차가 있다. 현재 대부분의 전력표준기는 전기의 양을 열로 변환시켜 다시 전기량으로 변환하여 교류와 직류를 비교하는 측정방법을 사용하고 있다 [1-4]. 교류전력의 값은 교류전압  $U$ , 교류전류  $I$ , 그리고 교류전압과 전류 사이의 위상  $\cos\theta$ 의 관계로 이루어져 있다. 여기서 100 W의 값은 [100 V · 1 A], [10 V · 10 A], 혹은 [100 V · 10 A · 0.1 (cosθ)]로 표현할 수 있다. 이와 같이 전력계는 항상 다른 조건에서 동작되고 있으며 그러한 조건에서의 정확도는 각각 다르다. 따라서 전력계의 출력신호는 복합함수  $Y = F(P, U, I, \cos\theta)$ 로 표현된다. 이 관계에서 측정결과에 대한 전력에 미치는 영향을 제거하기는 어렵다.

이 식의 우변 항의  $(u_1 + u_2)$ 은 전자회로의 합으로,  $(u_1 - u_2)$ 은 차 회로로 만들 수 있다. 그리고 자승은 각각의 합과 차 회로를 통과한 신호를 두 개의 열전형변환기로 각각 통과시키면 자승특성을 얻을 수 있다. 두 개의 열전형변환기의 출력을 서로 감하는 방향으로 연결하면 위의 식(1)을 실현시킬 수 있다.

우리는 식(1)을 기본으로 하여 push-pull type의 열전형 전력비교기를 설명한다. 그림 1은 개발한 push-pull 기술을 사용한 전력비교기의 전회로를 나타내었다. 이 비교기는 아날로그 스위치, 인스트루멘테이션 증폭기, 열전형변환기, 열전형변환기의 히터에 흐르는 전류를 조절하기 위한 저항들로 구성되어 있다. 교류전압신호  $V_{ac}$ , 교류전류신호  $I_{ac}$ , 직류전압신호  $V_{dc}$ , 직류전류신호  $I_{dc}$ 가 동시에 공급된다. 스위치 조작은 측정 단계에 따라 입력의 연결을 결정하는데, 이 신호들 (S1 - S8)은 컴퓨터의 신호에 따라 제어된다. 쌍으로 구성된 인스트루멘테이션 증폭기(U5-U7, U6-U8, U9-U11, U10-U12)들은 각각 push-pull 알고리즘에 의하여 합과 차의 증폭기 역할을 번갈아 가면서 수행한다. 이때 증폭기의 게인은 1이다. 쌍으로 이루어진 증폭기들의 출력은 두 입력전압 (ac 혹은 dc)의 차와 합에 비례하는 값을 얻는다. 이 신호가 직접 다중접합 열전형 변환기 T1, T2의 히터(TC/A, TC/B 혹은 TC/C, TC/D)에 흐른다. 여기에서 사용되는 다중접합 열전형 변환기는 2개의 히터를 가지고 있다.

전력측정의 일반적인 원리는 거의 같지만 방법과 적절한 수단에 의하여 정확도, 분해도, 안정도 등을 개선할 수 있다. 측정하려고 하는 교류전력은 알고 있는 직류전력을 비교함으로써 얻어지는데 이러한 비교는 전력비교기를 통하여 실현할 수 있다 [1-3]. 일반적으로 전력비교기의 전자회로는 많은 저항, 비퍼, inverters, 합과 차회로, 열전형변환기 등으로 복잡하게 구성되어 있다. 본 연구에서는 구조가 간단하며 합(sum)과 차(difference) 회로를 push-pull type으로 동작하는 전력비교기를 개발하였다. 이 전력비교기는 40 Hz에서 1 kHz 까지의 범위에서 전력계를 교정할 수 있는 특성을 가진다. 본 연구는 정밀 전력계와 전자식 전력량계를 교정해 줄 수 있는 기준장치로 사용되는 국가전력표준기를 개발하는 과정을 나타내었다.

교류입력 (Vac, Iac)은 전력비교기의 입력에 공급되고 동시에 기준 직류신호(Vdc, Idc)도 전력비교기에 공급되어 서로 비교 과정을 거쳐게 된다. 이러한 측정과정은 콘트롤신호(CH1/2, REV.V, REV.A)에 의하여 8번 수행되는데 이렇게 하는 이유는 교류와 직류를 비교하는 과정에서 다음과 같은 오차를 줄이기 위해서이다.

1) 열전형변환기의 구조적 불일치에서 오는 오차  $\gamma_n$ : 실제의 열전형변환기의 출력은 교류신호와 직류신호의 변환 과정에서 직류/교류 오차를 가지게 되는데 대부분 열전형변환기의 히터에서 발생된다. 히터에서의 열 전달 과정을 보면 히터전류의 자승 ( $I_h^2$ )에 비례한다는 것을 안다. 그런데 히터의 온도 상승과 열기전력은  $I_h^2$ 에 선형적인 관계를 가지지 못하는 포물선 형태를 가진다. 이러한 것을 개선하기 위하여 2개의 히터를 가진 열전형 변환기를 사용하여 번갈아 가면서 교류와 직류를 히터에 가하므로 열전형변환기의 구조적 불일치에서 오는 오차

2. 전력표준기의 동작원리

2.1 전력비교기의 원리

일반적으로 교류전력의 측정은 두 전기적인 양, 전압  $v$ , 전류  $I$ 의 승산과 이것의 적분  $p = \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i dt$ 로 나타낸다. 저항에 의하여 전류  $i$ 는 어떤 신호전압  $v_2$ 로

$\gamma_n$ 를 제거할 수 있다.

2)각(angular)오차  $\gamma_\phi$ 와 드리프트오차  $\gamma_{dr}$ : 전력비교기에서의 각오차  $\gamma_\phi$ 의 중요한 발생 원인은 측정하고자 하는 교류전압과 전류 사이의 위상각  $\phi$ 가 이상적인 경우와 차이가 나기 때문이다. 전력비교기에서의 각오차  $\gamma_\phi$ 는 실질적인 문제를 일으키는 성분 중의 하나이며 제거하기 어려운 성분이다. 이 성분을 줄이기 위하여 회로에 사용되는 저항들은 교류/직류 차가 작은 메탈필름 저항을 사용하고 증폭기들은 위상 특성이 좋은 것을 사용하였다.

드리프트오차  $\gamma_{dr}$ 는 측정 경과에서 발생하는 교유의 오차 요인으로 증폭기의 성능에 좌우된다. 그러나 측정하고자 하는 신호를 변조신호에 의하여 컨트롤 하므로서 이러한 문제는 해결할 수 있다.

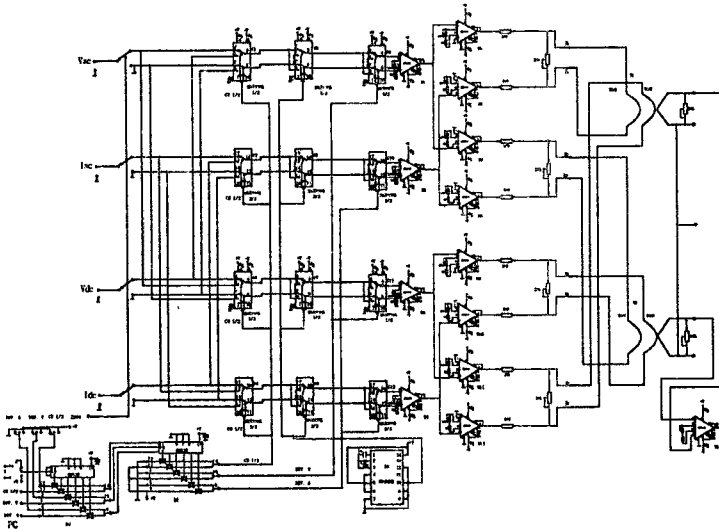


그림 1. Push-pull 기술을 이용한 전력비교기의 전체회로

### 2.2. 기준기용 전력표준장치

개발된 전력비교기란 중심으로 제작한 전력표준장치의 기본회로를 그림 2에 나타내었다. 전력표준장치는 직류원, 컨트롤스위치, 저항분압기, 저항선트, 그리고 전력비교기로 구성된다. 직류전압원  $V_{dc}$ 는 저항분압기 VD를 거쳐 전력비교기의 전압입력 단에 연결된다. VD는 기준전압  $V_u$ (약 1 V)으로 낮추며 이 전압은 매우 정밀한 디지털볼트미터 DVM( $V_o$ )와 Kelvin Varley Divider(VDo)에 의하여 측정되어진다. DVM( $V_o$ )의 reading 결과는 교류/직류 전력비교 측정의 불확도에 결정적인 역할을 한다.

직류전압원에 의하여 컨트롤되는 직류전류원  $I_{dc}$ 는 전력비교기의 입력전류단에 연결된다. 이 전류는 기준전도  $R_o$  양단에 전압  $I_o$ 를 발생시키고,  $I_{ac}/dc$  스위치를 통해 전류선트 SH에서 발생된 전압  $V_i$ 으로 변환되어 전력비교기의 입력전류단에 연결된다. DVM( $I_o$ )의 reading 값 또한 전력측정 불확도 결정에 결정적인 역할을 한다. 따라서 디지털볼트미터들, Kelvin Varley Divider(VDo), 기준선트  $R_o$ 들은 계속적인 교정에 의하여 불확도 평가가 이루어져야한다. 높은 정확도를 얻기 위하여 전력측정 과정의 사이사이에 체너표준기의 출

력에 볼트미터들을 연결하여 그 특성을 항상 확인하여야 한다.

전력비교기는  $P = V \cdot I \cdot \cos \phi = V_o \cdot I_o = P_o$ 로 확립할 수 있다. 이 경우에 미터에 의하여 읽혀진 직류전압  $V_o$ 와 직류전류  $I_o$ 는 교류전력원의 출력전압과 출력전류 단에서 읽혀진 교류전력  $P$ 의 값과 같다. 왜냐하면 직류전압  $V_o$ 와 직류전류  $I_o$ 는 직류전력  $P_o$ 를 결정할 수 있는 직류전압과 직류전류 표준기에 의하여 교정되어 있기 때문이다. 따라서 우리는 전력비교기가 직류전력으로 부터 교류전력을 전달해 주는 교류/직류전달 장치라고 말할 수 있다.

저항분압기와 저항선트는 명목전압(nominal voltage)과 전류를 1 V 신호로 변환해 주는 소자로 각각 사용된다. 저항분압기 VD는 10 k $\Omega$  정밀급 메탈필름저항(1 W, 0.01% Vishay)13개를 직렬로 연결하고 500  $\Omega$ 를 통하여 낮은 전압을 얻었다. 공급되고 있는 명목전압 120 V, 240 V를 1/120, 1/240으로 각각 변환하였다.

전력측정에서 가장 민감한 소자 중의 하나는 선트 저항이다. 넓은 주파수 범위에 걸쳐 위상변화가 매우 적은 특성을 가지도록 설계하는 것이 중요하다. 선트의 성능은 전력표준시스템의 불확도에 큰 영향을 미친다. 현재 본 연구에서는 0.2  $\Omega$ 의 값을 가지며 공급전류 5 A에 대해 1 V의 값을 가지도록 하였다. 가장 많이 사용되는 정밀 선트 저항은 coaxial type으로 과도나 넓은 대역에 우수한 특성을 보인다. 여기에서는 인덕티브효과를 줄일 수 있는 형태의 선트저항을 제작하여 특성을 시험하였다. 이 선트는 squirrel-cage type의 구조로 둥근 구리판 사이에 절연이된 pcb판을 사용하였다. 두 둥근 판 사이에 정밀 메탈필름 저항 50개(10  $\Omega$ , 1 W, 0.1%)를 병렬로 연결하였다. 선트에 사용되어진 저항들은  $\pm 0.6$  ppm/ $^{\circ}C$ 의 온도계수를 가지고 있다.

### 3. 시스템의 불확도

만약 VD에 2 mA의 전류를 흘리면 각 저항들에서 소모되는 전력은 40 mW를 넘지 않는다. 1 W의 허용 전력을 가지고 있는 저항의 경우 25배가 넘는 허용전력을 가지고 있으므로 자기가열에 의한 불확도는 무시가 가능하다. 온도에 대한 불확도는 20 ~ 30 $^{\circ}C$  범위에서 VD의 온도계수를 분산하는 방법에 따라 결정된다. VD의 진폭과 위상오차는 Sullivan F9200 precision inductive voltage divider와 비교하여 측정하였다. 위상의 상대표준불확도는 6.9  $\mu rad$ 보다 좋았고 진폭의 상대표준불확도는 2.9  $\mu V/V$ 보다 우수하였다.

전류선트의 위상손실은 53 Hz에서 수행되었으며 호주의 표준기관인 NML에서 유지하고 있는 계로 역률표준기와 비교하였다. 제작된 전류선트 SH와  $R_o$ 의 위상 손실은 4.8  $\mu rad$ 의 특성을 나타내었다. DC mode에서 선트의 저항 불확도는 3  $\mu \Omega/\Omega$ 로 나타났다. 선트의 저항 변화는 5 A의 연속적인 공급 상태에서 2시간이 지난 후 측정된 결과는 1 ppm이 변하지 않았다. 이러한 결과는 저항 각각의 온도계수가 매우 낮고 전력소비에 대한 열적 용량이 큰 것을 사용함으로써 이룰 수 있었다. 또 선트의 교류/직류 오차는 1 kHz 까지 6 ppm의 특성을 가지는 것으로 평가되었다.

따라서 정밀 전력계와 전자식 전력량계의 교정과 시험을 위한 기준시스템으로 사용되는 전력표준기의 전체 오

차는  $30 \mu\text{W}/\text{VA}$ 로 평가되었다. 그림 3은 제작된 전력 표준기의 전체를 나타내었으며 표 1은 전력표준기의 전

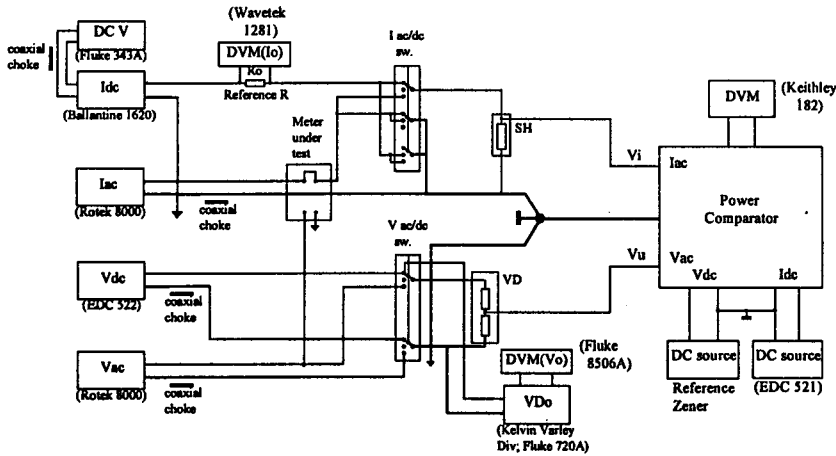


그림 2. 전력계, 전력량계의 교정과 시험을 위한 전력표준시스템

채오차를 평가하기 위하여 각 부분의 특성들을 평가한 결과를 나타내었다.

표 1. 전력표준시스템의 불확도

Quantity	Uncertainty	Remark
1. DVM(Io)	$3(\mu\text{V}/\text{V})$	range 1 V range 1 V  Coefficient 0.0083333
2. DVM(Vo)	$3(\mu\text{V}/\text{V})$	
3. Reference Resistor (Ro)	$5(\mu\Omega/\Omega)$	
4. Reference Voltage Divider (VDo)	$5(\mu\text{V}/\text{V})$	
5. Phase Angle of Voltage Divider (VD)	$0 - 7(\mu\text{rad})$	
6. Frequency of Voltage Divider (VD)	1(ppm)	
7. Phase Angle of Current Shunt (SH)	$0 - 6(\mu\text{rad})$	
8. Frequency of Current Shunt (SH)	1(ppm)	
9. AC/DC of Power Comparator	$<20(\mu\text{W}/\text{VA})$	
10. DC Indicator of Power Comparator	$5(\mu\text{V}/\text{V})$	
11. DC Voltage Standard (Vdc)	$2(\mu\text{V}/\text{V})$	

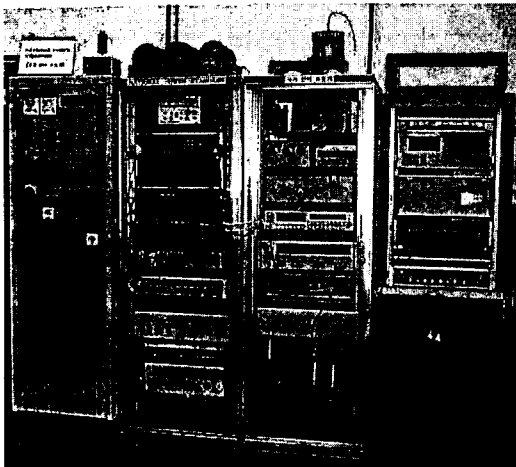


그림 3. 실제의 전력표준장치

#### 4. 결 론

교류전력을 측정하기 위하여 알고 있는 직류전력과 동시에 비교할 수 있는 전력비교기를 개발하였으며 이 비교기를 기본으로 하여 정밀 전력계와 전자식 전력량계를 교정하거나 시험검사 할 수 있는 기준시스템인 전력표준기를 개발하였다. 특히 push-pull 기술을 이용한 전력비교기는 간단하며 정확도가 매우 높은 것으로 평가되었으며 전력비교기의 전체 불확도는  $30 \mu\text{W}/\text{VA}$ 로 평가되었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] E.Z. Shapiro, and I. Budovsky, "Thermal watt-transfer standard", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.44, no.2, p.399-402.
- [2] E.Z. Shapiro, Y.T. Park, I. Budovsky, and A.M. Gibbes, "A New Power Transfer Standard, Its Investigation and Intercomparison", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.46, no.2, p.412-415, 1995
- [3] I. Budovsky, A.M. Gibbes, and D.C. Arthur, "A High-Frequency Thermal Power Comparator", CPEM, TH4A, p.544-545, Washington DC, 1998
- [4] S. Svensson, A Wattmeter Standard for the Audio Frequency Range, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.48, no.2, p.431-433, 1999