

정밀 열전형변환기를 사용한 기준직교류전력비교기

박영태^{0*}, 장석명^{**}

*한국표준과학연구원, **충남대학교

Reference DC/AC power comparator on the basis of precision thermal converters

Young-Tae Park*, Seok-Myeong Jang**

*KRISS, **ChungNam Univ.

Abstract - The paper describes a dc/ac power comparator for measurement of power. Based on a thermal principle, the instrument performs ac-dc transfer and absolute power and energy measurements in the range of currents from 0 to 5 A, voltages from 60 to 240 V, power factors from 0 to 1 and frequencies from 50 to 1000 Hz. The ac-dc transfer accuracy is better than 20 ppm at unity power factor and better than 50 ppm at 0.5 power factor.

1. 서론

AC 전력의 정밀한 측정을 위하여 여러가지 열전형 변환기(thermal converter)를 사용하여왔고 계속하여 열전형 변환기를 이용한 열전형전력계를 개발하고 있다[1-6]. 그리고 전력표준의 국제비교를 위한 포터블 전력 표준장치를 각국에서 개발하고 있으며 이러한 목적을 위하여 몇몇 나라에서는 특별한 ac전력계를 성공적으로 개발하였다[6-8]. 이러한 장치들은 ac전력을 dc전력으로 직접 변환 시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 ac전력 측정에서는 안정도와 선형도가 우수한 반면 dc전력 측정에는 동작하지 않는다. 따라서 이러한 장치들의 정확한 교정을 위해서는 dc전력으로 교정해야 하는데 이럴 경우 문제가 있다.

본 연구에서 개발된 직교류전력비교기는 위의 문제를 만족시키고 있다. 열전환 원리를 기본으로 ac전력 뿐만 아니고 dc전력도 측정할 수 있다. 측정전류범위 0에서 5 A, 측정전압범위 60에서 240 V, 측정역율범위 0에서 1, 측정주파수 범위 0에서 20 kHz이며 역율 1, 주파수 1 kHz까지 정확도는 20 ppm, 역율 1, 주파수 20 kHz까지 정확도 110 ppm의 특성을 가지고 있다.

2. 전력측정 시스템의 동작원리

2.1 전력측정 시스템

전력비교기는 교류전력과 직류전력을 비교할 수 있는 장치이다. 즉 $P^* = U^* I^* \cos \psi = U_o I_o = P_o$ 로 실현할 수 있다. 여기서 P^* 는 교류전력을, P_o 는 직류전력을 나타낸다. 이것은 직류전압과 직류전류를 곱한 값이 메타에 읽어졌을 경우 그 값은 교류전압과 교류전류를 곱한 값과 같음을 의미한다.

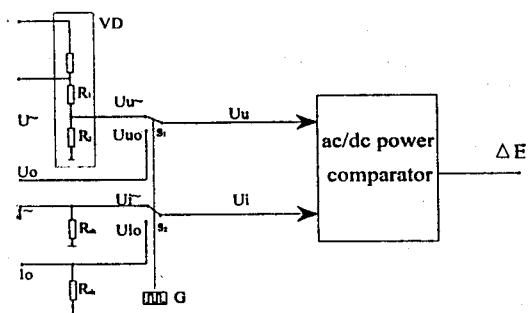


그림 1. 전력측정시스템

그림 1은 직교류전력비교기를 포함한 전력측정시스템을 나타낸다. 입력교류전압 U^* 은 전압분할기(voltage divider)에 의하여 작은 전압신호 U_u -로 변환되고 입력교류전류 I^* 은 분류기(shunt)에 의해 작은 전압신호 U_l -로 변환된다. 입력직류전류 I_o 는 직접 작은 신호전압 U_{io} 로 공급되고 직류입력전류 I_o 는 분류기에 의해 작은 직류신호 U_o 로 변환하여 공급한다. 변환된 작은 신호들은 스위치 위치를 바꾸어 주는 펄스파 G에 의해 전력비교장치에 공급된다. 이때 전력비교기의 출력신호 ΔE 는 P^* 와 P_o 의 차이 전압만 나타난다.

$$\Delta E = N_1 P^* - N_2 P_o \quad (1)$$

$$N_1 C_{vd} Z_{sh} U^* I^* \cos \psi = N_2 C_{vdn} R_{shn} U_o I_o$$

$$\text{혹은 } P^* = P_o \left[\frac{N_2}{N_1} \frac{C_{vdn} R_{shn}}{C_{vd} Z_{sh}} \right] \quad (2)$$

여기서 전압 U_o 를 조정하여 $\Delta E = 0$ 가 되게 조정하면 교류전력과 직류전력의 차이를 알 수 있다. N_1 과 N_2 는 전력비교기의 입력채널에 의한 전력변환 상수를 각각 나타내었다. 그리고 C_{vdn} , C_{vd} 는 직류와 교류 일때의 전압분할기의 값을 나타내었고 R_{shn} , Z_{sh} 는 직류와 교류 일때의 분류기의 값을 각각 나타내었다.

2.2 전력비교기의 원리

그림 2에 입력신호의 합과 차를 승산하는 열전형 전력비교기의 동작원리를 나타내었다. 전력비교기는 3 부분으로 구성되어 있

다. 첫째는 입력신호 U_u 와 U_i 의 합률 변환시키는 회로, 두번째는 입력신호 U_u 와 U_i 의 차률 변환시키는 회로, 세번째는 다중접합 열전형 변환기(multijunction thermal converter) MTC1, MTC2로 구성된 열전형 변환기 블록으로 이루어져 있다.

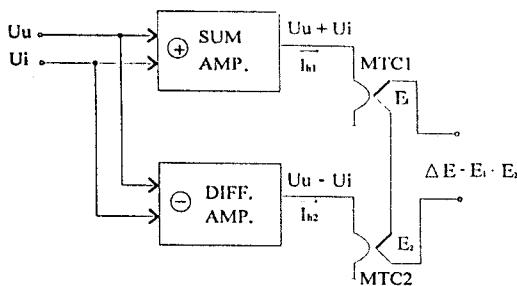


그림 2. 열전형전력비교기의 동작원리

MTC블록의 출력신호는 두 MTC출력 E_1 과 E_2 의 열기전력(emf) 차를 나타낸다. 합과 차의 승산방법은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$4AB = (A+B)^2 + (A-B)^2 \quad (3)$$

여기서 $A=U_u$, $B=U_i$ 로 각각 대치할 수 있다. 따라서 $U_u + U_i$, $U_u - U_i$ 의 신호가 열전형 변환기의 히터에 공급된다. 만약 2개의 열전형 변환기가 동일한 특성을 가지고 있다면 출력은

$$E_1 = nI_{h1}^2, \quad E_2 = nI_{h2}^2 \quad (4)$$

로 나타낼 수 있으며 n 은 MTC의 열변환상수이고 I_h 는 MTC의 히터전류를 나타낸다. 식(3)과 식(4)로부터

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{n}{I_h} (U_u + U_i)^2 - \frac{n}{I_h} (U_u - U_i)^2 = nU_u U_i \quad (5)$$

로 표현할 수 있다. I_h 는 MTC의 히터 저항을 나타낸다. 직류에서 U_u 와 U_i 가 같기 때문에 직류전력 $P_o = C_{vh} R_{sh} U_o I_o$ 로 되고 교류에서 교류전력은 $P^* = C_{vh} Z_{sh} U^* I^* \cos \psi$ 으로 나타낼 수 있다. 그리고 ΔE 는 직류 교류전력에 비례하게 된다. 만약 $\Delta E^* = \Delta E_o$ 가 된다면

$$P^* = P_o (1 + \gamma_{ac/dc}) \quad (6)$$

로 표현된다. 여기서 $\gamma_{ac/dc}$ 는 직류교류전달 불화도를 나타낸다. 실제의 MTC의 출력은 다음과 같이 표현된다.

$$E_1 = n_1(I_{h1}^2)^n, \quad E_2 = n_2(I_{h2}^2)^n \quad (7)$$

이경우 만약 $n_1 \neq n_2$ 이고 $a \neq b \neq 1$ 이면

$$\Delta E = P \pm F (U_u, U_i, \cos \psi) \quad (8)$$

의 관계를 가지게 되므로써 측정의 오차가 커지게된다. 그리고 $n_1 \neq n_2$ 이고 $a = b = 1$ 일 경우

$$\Delta E = 2(n_1 + n_2)U_u U_i + (n_1 - n_2)U_u^2 + (n_1 - n_2)U_i^2 \quad (9)$$

가 된다. MTC의 일변환 상수 n 들이 동일한 특성을 가진다면 식(5)와 같이되어 직류교류에 의한 차이가 제거될 수 있지만 실제 MTC의 특성은 상수 n 들이 동일한 성능을 가지지 못한다. MTC는 열전대(thermocouple)들과 히터(heater) 그리고 열전대와 히터 사이의 절연체로 구성되어 있다. 히터는 높은 저항선으로 만들어졌고 $15 \times 5 \text{ } \mu\text{m}$ 의 사각형으로 갑기였으며 길이는 10 mm이다. 열전대와 히터 사이의 절연체는 얇은 마이카 판(

$5 \text{ } \mu\text{m}$)으로 되어있다. 히터에 전류가 흐르면 히터에 발생되는 열이 절연체를 통하여 열전대의 출력에 열기전력이 발생된다. 발생되는 열기전력은 열의 함수로 선형적인 관계를 가진다. 그리고 발생되는 열기전력은 직류일때와 교류일때 각각 다른 특성을 가지 직류교류전달오차를 발생시킨다. 이러한 직류교류 전달오차를 줄이기 위하여 두 가지를 생각할 수 있다. 하나는 MTC의 성능을 향상시키는 방법이 있고 다른 하나는 전달오차를 줄일 수 있는 측정방법을 개선하는 것이다. 본 연구에서는 직류교류전달오차를 줄이기 위하여 2 개의 히터를 가진 MTC를 두개 사용하고 히터에 발생하는 열을 동일하게 발생시키는 방법을 사용함으로해서 이러한 문제를 해결할 수 있는 기준직류교류전력비교기를 개발하였다.

3. 기준직류교류전력비교기의 제작

그림 3에 개발한 기준직류교류전력비교기를 나타내었다.

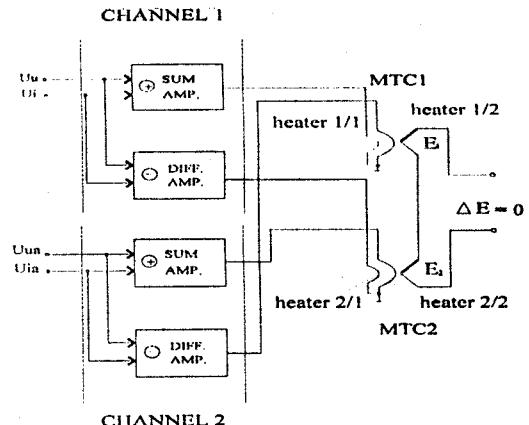


그림 3. 개발한 기준직류교류전력 비교기

MTC₁과 MTC₂의 발생열을 동등하게 하기 위하여 heater 1/1과 heater 2/1를 전력 P^* 혹은 P_o 를 변환하기 위하여 사용하고 heater 1/2와 heater 2/2는 보조전압 U_{in} 과 U_{ia} 를 곱한 전력 P_o 를 변환하기 위하여 사용하였다. MTC₁의 출력 E_1 의 emf는 $(U_u + U_i)$ 와 $(U_{us} - U_{is})$ 의 곱에 의한 값이 출력되고, MTC₂의 출력 E_2 의 emf는 $(U_u - U_i)$ 와 $(U_{us} + U_{is})$ 의 곱에 의한 값이 출력되어진다.

$$E_1 = [n(2U_u U_i + U_u^2 + U_i^2) + m(-2U_{us} U_{is} + U_{us}^2 + U_{is}^2)]^n \quad (9)$$

$$E_2 = [n(-2U_u U_i + U_u^2 + U_i^2) + m(2U_{us} U_{is} + U_{us}^2 + U_{is}^2)]^n \quad (9)$$

전압 U_{in} 을 $\Delta E = E_1 - E_2 = 0$ 혹은 $4n U_u U_i = 4m U_{us} U_{is}$ 가 될 때 까지 조절한다. 따라서 출력전력은

$$P = \frac{m}{n} U_{us} U_{is} \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다. 만약 식(10)에서 P 가 교류전력 P^* 라고하고 직류전력을 $(m/n)U_{us} U_{is}$ 라고하면 측정전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P^* = U^* I^* \cos \psi = (m/n) P_o \quad (11)$$

n 과 m 은 채널 1(교류전력 P^*)과 채널 2(직류전력 P_o)의 변환상수를 나타낸다. m 과 n 이 동일한 특성을 가진다면 정확히 교류

전력과 직류전력이 같지만 실제로 동일한 특성을 가지지 못한다. 따라서 이러한 문제를 줄이기 위하여 채널 1, 채널 2에 번갈아 가면서 교류전력 P^* 와 직류전력 P_{dc} 를 공급하여 열전형변환기의 출력 ΔE 의 평균값을 취하면 m과 n에 특성에 의한 오차를 제거할 수 있다. 이러한 측정의 결과를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$[1] P^* = (m/n) P_{dc} \quad [2] P^* = (n/m) P_{dc}$$

$$\text{혹은 } P = \frac{P_{dc1} + P_{dc2}}{2} = \frac{1}{2} (n/m + m/n) P^* \quad (12)$$

P_{dc1} 과 P_{dc2} 는 교류전력을 채널에 번갈아 공급할 때의 출력직류전력을 나타낸다.

4. 전력측정 시스템의 성능 평가

개발된 전력측정 시스템을 호주의 측정표준연구기관인 NML과 국제비교 측정을 하였으며 그 결과를 표 1에 나타내었다. 측정 입력은 120 V, 1A에서 역율 1과 0.5, 그리고 주파수 53 Hz와 400 Hz에서 호주의 전력표준장치와 비교측정하였다. 역율 1과 주파수 53 Hz에서 비교측정한 결과는 1 ppm의 차이를 나타내었고 역율 0.5에서 15 ppm, 그리고 역율 0에서 5 ppm의 결과를 나타내었다.

표 1. 호주(NML)와 전력측정 시스템의 국제비교측정 결과

Input Voltage (V)	Input Current (A)	Frequency (Hz)	Power Factor	Difference Between Standards (ppm)
120	1	53	1	-1
120	1	53	0.5L(lag)	-5
120	1	53	0.5C(lead)	+14
120	1	400	1	-27
120	1	400	0.5L(lag)	-33
120	1	400	0.5C(lead)	+72
120	1	53	0	+5

표 2는 입력주파수를 변화 시키면서 기준직류교류전력비교기의 직류교류전달오차를 측정하였다. 주파수가 증가함에 따라 전달오차가 증가하는 것을 알 수 있다. 이렇게 나타나는 주된 원인은 교류를 직류로 변환시켜주는 열전형변환기의 특성 때문이다. 열전형변환기의 히터에 직류전류가 흐를 때 발생되는 열 $T_o(t)$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$T_o(t) = T_o [1 - \exp(-t/t_h)] \quad (13)$$

여기서 t_h 는 히터의 시정수를 나타낸다. 또 히터에 교류전류가 흐를 때

$$T(t)^* = T + T_o \sin 2\omega t \quad (14)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 T 는 T_o 의 평균이며 T_o 는 직류가 히터에 흐를 때 발생되는 $T_o(t)$ 의 정상상태의 값을 나타내고 ω 는 교류주파수를 나타낸다. 만약 $\omega \ll 1/t_h$ 의 관계를 가지면 $T(t)^*$ 가 감소하게되고 주파수에 의한 영향이 줄어들게 된다. 또 히터에서 발생되는 표면효과에 의한 영향도 주파수 증가에 따라 크게 나타나고 있는 것으로 생각된다.

표 2. 주파수 변화에 의한 직류교류전달오차 (PF=1)

Freq.(Hz)	60	600	1,000	5,000	10,000	20,000
ac/dc	10	10	20	30	40	110
error(ppm)						

5. 결론

열전형 변환원리를 이용하여 정밀전력측정용 열전형전력계를 개발하였다. 이 열전형전력계는 기준직류전력과 측정교류전력 및 측정직류전력을 비교측정함으로써 측정의 정확도를 향상시킬 수 있는 전력비교기를 중심으로하고 있다. 전력측정시스템의 성능은 호주의 측정표준연구기관인 NML과 국제비교측정을 통하여 평가 하였다.

[참고문헌]

- [1] G.Schuster,"Thermal measurement of AC power in comparison with the electrodynamic method", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-25, pp.529-533, 1976
- [2] L.G.Cox and N.L.Kunsters," A differential thermal wattmeter for the AC/DC transfer of power", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-25, pp.553-557, 1976
- [3] N.L.Kunsters and L.G.Cox,"The development of an automatic reversing differential thermal wattmeter", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-29, pp.426-431, 1980
- [4] L.Erard, R.Knop and R. Sourck,"Improvement in the use of the thermal wattmeter principle: Application to a broad-band device for nonsinusoidal waveform", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-36, no.2, pp.375-380, 1987
- [5] G.O.Tong, Z.T.Qian, X.Y.Xu and L.X.Liu,"A device for audio-frequency power measurement", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-39, no.3, pp.540-544, 1990
- [6] G.Shuster,"Thermal instrument for measurement of voltage,current,power, and energy at power frequency", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-29, pp.153-157, 1980
- [7] P.N.Miljanic, B.Stojanovic and P.Bosniacovic,"The development of a high precision time-division power meter", in Proc. Conf.Prec. Electromagn. Meas., Delft, The Netherlands, pp.67-68, 1984
- [8] P.S.Filipski, R.Arsenau and J.J.Zelle,"Watt and volt-ampere transfer standard", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.42, pp.170-175, 1993