論 文
51B-10-4

정밀전압, 전류, 전력측정 다기능전력계

Multi-function Wattmeter for Voltage, Current, and Power Measurement

朴 榮 泰* · 柳 勸 相** · 張 錫 明***
(Young-Tae Park · Kwon-Sang Ryu · Seok-Myeong Jang)

Abstract - High precision voltages, currents, and electrical power measurements in wide range of frequency can be achieved by using the thermo-elements(thermal converters). This paper describes a development wattmeter, based on a thermal principle. The instrument has been performed measurement in the range of currents from 0 to 50 A, voltages up to 480 V, power factor 0.5 (lag, lead), 1 and frequencies from 60 Hz to 3 kHz. It is intended to be used by electric utilities, standard laboratories, testing laboratories, and applications where high measurement accuracy are attractive consideration.

Key Words : thermo-elements, thermal converter, wattmeter, instrument, measurement

1. 서 론

시간에 따라 변하는 AC 전기량을 정밀하게 측정하는 방법은 크게 기계식 방법과 전자식 방법이 있지만 근래에는 대부분 전자식으로 바뀌어가고 있다. 기계식과 달리 전자식은 전자소자의 발달로 연산이 가능하며 간단하고 여러 기능을 동시에 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다.

전자식일 경우라도 사용하는 전자소자의 종류에 따라 정확도, 측정범위, 기능 등이 다르다. A/D변환기는 고속화와 분해능의 개선으로 AC 전기량의 측정에 많이 활용되고 있다. 그러나 아직까지 전기량 측정의 정확도와 기기의 성능과는 미흡한 점이 있다.

AC 전기량을 정밀 정확하게 측정하기 위하여 교류를 열기전력으로 변환하는 기능을 가진 서미스터와 같은 열전형 변환기(Thermal converter)를 사용한다. 열전형 변환기를 사용하여 제작한 AC 전기량 측정기는 대부분 고정도의 성능을 가진 전력계를 교정해주는 표준기급 전력계로 사용한다[1-4]. 그런데 열전형 변환기를 이용하여 전압, 전류, 전력, 역률 등을 측정할 경우 제작이 까다롭고 열전형 변환기의 특성을 보상해 주어야하는 기술적인 어려움이 있다. 그리고 측정 주파수가 전원 주파수로 한정되어 있는 단점을 가지고 있다[5].

본 연구에서는 열전형 변환기를 기본으로 하여 전압, 전류, 전력을 정밀하게 측정할 수 있는 다기능 전력계를 개발하였으며 전력계를 구성하고 있는 전압, 전류, 전력에 대한 측정 방법의 개발과 특성 시험 등을 기술하였다.

입력전압을 저전압으로 변환하는 소자는 정확도가 높은 정밀 변압기(a precision voltage transformer: 변환비 오차 0.002 %)를 사용하였고 입력전류를 저전류로 변환하는 소자로 전자적으로 보상된 2단 변류기(a two stage current transformer)를 사용하였으며 변화비 오차는 0.005 %의 특성을 가지고 있다. 전압측정의 경우 측정범위 15 V에서 480 V, 주파수 60 Hz에서 3 kHz, 정확도 ±0.05 %의 특성을 나타내었으며 전류는 측정범위 0.5 A에서 50 A, 주파수 60 Hz에서 3 kHz, 정확도 ±0.08 %의 특성을 나타내었다. 전력인 경우 입력전압과 전류의 주파수가 1 kHz 까지 측정이 가능하며 60 Hz에서 100 Hz, 역률 1에서 정확도는 ±0.05%, 역률 0.5(지상, 진상)에서 ±0.08 %의 성능을 나타내었다.

2. 다기능 전력계의 구성

2.1 열전형 변환기

열전달 소자로 사용되는 열전형 변환기는 교류를 측정하기 위한 소자로 활용되며 히터와 열전대로 구성되어 있다. 그림 1에 구조와 동작 원리를 나타내었다. 열전형 변환기의 입력으로부터 공급되는 전류는 고 저항선으로 구성된 히터에서 열이 발생된다. 히터에 발생된 열은 히터 중간 지점에 전기적 절연을 유지하면서 부착된 열전대에 열기전력을 발생시킨다. 이 발생된 기전력을 그림 1(a)와 같이 연결하여 전압계로 측정하면 그림 1(b)와 같은 전기적 출력 특성을 나타낸다.

그림 1(b)는 히터에 공급되는 전류에 의해 출력되어지는 열전형 변환기의 출력 형태를 나타내었다. 열전형 변환기

* 正 會 員 : 韓國標準科學研究院 電磁氣標準部 博士
** 正 會 員 : 韓國標準科學研究院 電磁氣標準部 博士
*** 正 會 員 : 忠南大學校工大 電氣工學科敎授 · 博士
接受日字 : 2002年 8月 7日
最終完了 : 2002年 8月 26日

출력 e는

$$e = nI_{heater}^{2} \tag{1}$$

로 나타낸다. 여기서 n은 열전형 변환기의 열 변환 상수이고 I_{heater}는 히터에 흐르는 전류를 나타낸다.

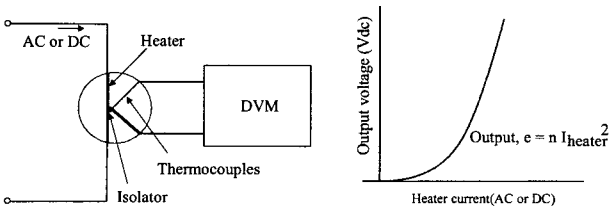

그림 1 열전형변환기의 구조와 출력 (a) 구조, (b) 출력

Fig. 1 Construction and output of thermal converter
(a) Construction, (b) Output

따라서 열전형 변환기의 출력은 히터 전류의 제곱에 비례하는 특성을 가지고 있다.

한 개의 열전대를 이용하는 단일접합 열전형 변환기는 많은 수의 열전대를 사용하는 다중접합 열전형 변환기에 비해 출력 열기전력이 작고 열 전달 오차가 크기 때문에 본 연구에서는 다중접합 열전형 변환기를 사용하였다. 열전형 변환기는 러시아의 표준기관으로부터 구입한 TEM-6을 사용하였다. 이 열전형변환기는 다중접합으로 구성된 2개의 히터를 가지고 있으며 히터의 저항은 100 Ω, 교류와 전류의 변환오차는 5×10^{-3} %의 특성을 가지고 있다.

2.2 교류 실효전압과 전류 측정 원리

여러 가지 파형이 섞여 있는 교류신호를 가장 정확한 값으로 측정하려면 실효값(root mean square value, r.m.s)으로 읽어야한다. 교류의 실효값, $Irms$는

$$Irms = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt} \tag{2}$$

로 정의하고 있으며 전류자승 평균값의 평방근과 같기 때문에 열전형 변환기의 출력 특성을 사용할 수 있다.

그림 2는 열전형 변환기를 사용하여 입력전압과 전류를 측정하는 원리를 나타내었다. 변압기, 혹은 변류기를 통하여 변환된 저전압, 혹은 저전류 신호(Vac)는 증폭기 A1를 통하여 열전형 변환기 TC1에 공급된다. 이때 증폭기 A1은 열전형 변환기와 변압기, 혹은 변류기 사이의 버퍼 구실을 하면서 입력전압의 주파수가 빠른 경우 신속한 응답을 위하여 광대역 특성을 가져야한다. 증폭기 A2는 직류증폭기이지만 증폭기 A1과 같은 성능을 가져야 한다. 두 증폭기 모두 게인을 같게하여 신호측정용 열전형 변환기 TC1과 밸런스용 열전형 변환기 TC2의 출력이 동일하도록 해야 한다. 직류증폭기 A3은 저 드리프트 특성을 가지면서 성능이 우수한 직류 증폭특성을 요구하며 열전형 변환기의 출력 전압이 저전압이므로 이 신호를 높은 수 V의 신호로 증폭하여 피드백 시키기 위하여 게인은 10^6 이상이 되어야한다.

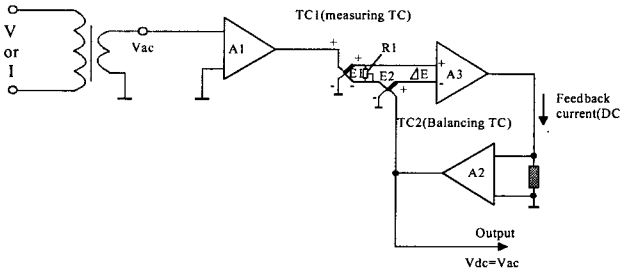

그림 2 AC 실효 전압 및 전류의 측정 원리

Fig. 2 Measurement principle of ac rms voltage & current

출력전압 E_1는 증폭기 A3의 비반전 입력단에 연결되고 E_2는 피드백되어 반전 입력단에 연결된다. 전압 E_2는 정확히 전압 E_1의 크기와 같게된다. 만약 E_2가 E_1보다 적다면 증폭기 A3의 출력이 증가되고, TC2의 히터전류가 증가되어 E_1전압의 크기와 같게된다. 반대로 E_2가 E_1보다 크다면 증폭기 A3의 출력이 감소되고, TC2의 히터전류가 동시에 감소되어 E_1전압의 크기와 같게된다. 즉 증폭기 A1을 통과한 변환된 전압과 전류신호(Vac)는 열전형 변환기 TC1과 TC2에서 다음과 같은 출력을 가진다.

$$\begin{aligned} E_1 &= n_1 V_{ac}^{2} \\ E_2 &= n_2 V_{dc}^{2} \end{aligned} \tag{3}$$

만약 증폭기 A3의 게인이 매우 높다면

$$\Delta E = E_1 - E_2 \rightarrow 0 \tag{4}$$

으로 되며 이 과정에서

$$V_{ac}^{2} = V_{dc}^{2}\frac{n_2}{n_1}, \quad V_{ac} = V_{dc}\sqrt{\frac{n_2}{n_1}} \tag{5}$$

가 된다. 여기서 n_1, n_2는 열전형 변환기의 변환상수를 나타낸다. 만약 $n_2 \neq n_1$가 되지 않으면 R1를 조정함으로써 이룰 수 있다. 그러므로 A2의 출력직류전압 V_{dc}은 입력 교류전압 Vac에 비례한 실효값을 얻을 수 있다. 전압과 전류의 두 경우 모두 동일한 측정 원리를 나타내며 입력변환시의 사용 소자인 변압기와 변류기의 사용이 다를 뿐이다.

2.3 전력 측정 원리

열전형변환기를 사용한 전력측정은 기본적인 수학법칙을 이용한 원리를 적용한다. 수학적으로 두 변수의 곱은 식(6)과 같이 합과 차에 각각 자승한 항으로 나누어 나타낼 수 있으며 두 변수를 전기적 신호인 전압과 전류의 항으로 바꾸어 나타낼 수 있다.

$$A \cdot B = \frac{1}{4}[(A+B)^2-(A-B)^2]$$
$$U_u \cdot U_i = \frac{1}{4}[(U_u+Ui)^2-(U_u-U_i)^2] \quad (6)$$

여기서 A= U_u, B= U_i로 대치하여 나타낼 수 있는데 U_u는 변압기를 통하여 변환된 신호전압, U_i는 변류기에 의하여 변환된 신호전류를 각각 나타낸다. 식(6)에 나타낸 바와 같이 전력으로 표현되는 두 신호의 승산인 $U_u \cdot U_i = Vp$는 열전형 변환기를 이용하여 전력 값으로 나타나는데 원리는 그림 3과 같다.

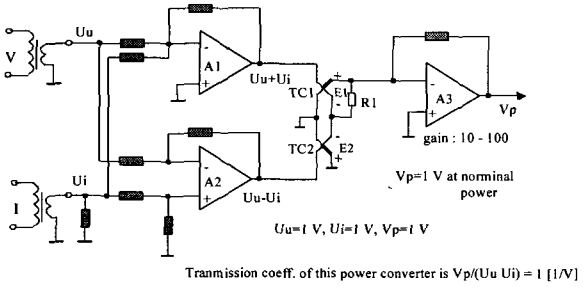

그림 3 전력측정의 원리
Fig. 3 Power measurement principle

식(6)의 첫째 항은 Uu와 Ui 신호를 가산회로(Sum. Amp) A1에서 합하여 TC1의 열전형 변환기에 공급함으로써 $(Uu+Ui)^2$가 실현되고 두 번 째 항은 Uu와 Ui 신호를 감산회로(Diff. Amp) A2에서 감하여 TC2의 열전형 변환기에 공급함으로써 $(Uu-Ui)^2$을 실현한다. 그리고 두 개의 열전형 변환기 출력 극성을 서로 반대로 연결함으로써 첫째 항에서 둘째 항의 값을 감하는 값으로 된다. 이렇게 하여 얻어진 증폭기 A3의 출력 $Vp = Uu \cdot Ui$로 나타나는 전력 값으로 표현된다.

2.4 전압, 전류, 전력 측정회로의 실현

그림 4는 전압, 전류, 전력측정을 실현한 전자회로의 다이어그램을 나타내었다. 측정의 정확도를 높이기 위하여 입력측정 범위를 선택할 수 있게 제작한 변압기와 변류기를 사용하였다. 변환된 전압과 전류신호는 스위치 S1를 통하여 회로에 공급되며 스위치 S1은 측정(measurement)과 교정(calibration)기능을 선택할 수 있도록 하였다. 변압기의 측정범위 선택을 15, 30, 60. 120, 240, 480 V등 6 범위로 하여 측정하고자하는 값을 측정할 때 선택하게 하였다. 변류기의 경우 0.5, 1, 2, 2.5, 5, 10, 25, 50 A의 측정범위를 두었다. 이 때 변압기와 변류기 입력단에서 선택한 측정범위에 따라 변환된 최대 신호 크기를 1 V가 되게 하였다. 교정 기능을 선택할 경우 측정회로의 교정이 이루어진다. 교정에 사용되는 1 V 공급 직류전압원(DC Ref.V, 1V)과 0에서 1 V까지 조정이 가능한 calibrator는 Fluke 5520A를 사용하였다. 공급 직류전압원으로 사용된 Fluke 5520A는 직류 1 V에서 0.001 %의 불확도 특성을 가지고 있다. 측정회로가 완전히 조정되었을 때 이 기능은 없어도 되며 차후 회로의 교정을 위하여 측정 기능만 유지하게 한다.

전압을 측정할 경우, 스위치 S1은 "measurement", S2는 "V" 위치에 둔다. 측정전압 신호는 스위치 S2/1를 거쳐 증폭기 A1에서 열전형 변환기 TC1에 연결된다. 이때 교류신호가 직류신호로 변환되며 증폭기 A3과 트랜지스터를 거쳐 피드백 된다. 이 신호는 스위치 S2/2와 S2/4를 거쳐 다른 열전형 변환기 TC2에 연결된다. 그리고 출력은 증폭기 A3를 통하여 입력 교류전압에 비례한 값을 얻게된다. 전류측정의 경우도 전압의 경우와 같으며 이때 사용되는 스위치 S2의 위치를 "I"에 두는 것이 다를 뿐이다.

전력측정의 경우, 입력전압과 입력전류를 변압기와 변류기에 공급한다. 스위치 S2 모두 "P"의 위치에 둔다. 증폭기 A3의 출력전압은 전력으로 환산되며 전력으로 측정되어진 값은 입력전압과 입력전류, 그리고 입력전압과 전류 사이의 위상에 비례하여 출력되어진다.

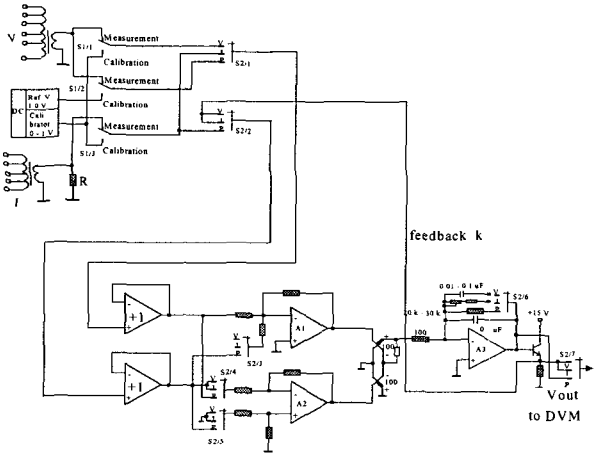

그림 4 전압, 전류, 전력의 측정회로
Fig. 4 Measurement Circuit of voltage, current and power

3. 실험 및 고찰

3.1 전 압

입력전압을 15, 30, 60. 120, 240, 480 V에서 주파수 60,

100, 400, 1000, 3000 Hz을 공급하여 각각을 측정하였다. 입력전압은 정밀전압변압기(변환비 오차: 0.005 %)를 사용하여 저전압으로 변환하였다. 시험을 위하여 사용한 전압 공급원은 ROTEK 8000(15-600 V 범위에서 정확도: 0.02 %)를 사용하였으며 출력은 디지털전압계 Keithley 182(정확도: 0.001 %)로 읽었다. 출력의 상대오차는 전 범위의 주파수에 걸쳐 상대오차가 ±0.05 %보다 좋은 특성을 얻었다. 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

3.2 전 류

측정 전류는 0.5 A에서 50 A 까지 측정하였으며 0.5, 1, 2, 2.5, 5, 10, 25, 50 A에서 측정되었다. 그리고 주파수는 전압과 동일하게 60, 100, 400, 1000, 3000 Hz을 공급하여 각각을 측정하였다.

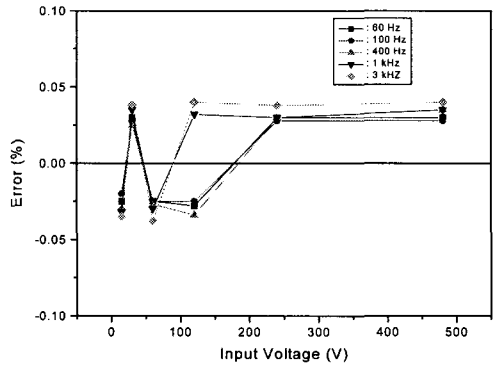

그림 5 전압측정의 결과
Fig. 5 Results of voltage measurement

전류는 전자적으로 보상된 정밀 변류기(precision current transformer : 변류비 오차 : ±0.005 %)를 사용하였다. 시험을 위하여 사용한 전압 공급원은 ROTEK 8000(0.5~50 A, 범위에서 정확도: 0.02 %)를 사용하였으며 출력은 디지털전압계 Keithley 182(정확도: 0.001 %)로 측정하였다. 측정의 결과를 그림 6에 나타내었다.

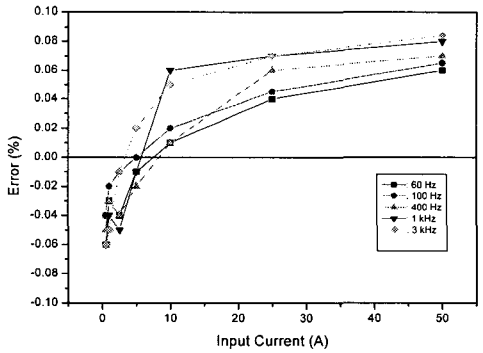

그림 6 전류측정의 결과
Fig. 6 Results of current measurement

3.3 전 력

그림 7은 전력 측정의 결과 중 입력전압을 240 V에 고정하고, 전류 0.5 A에서 50 A 까지 측정한 결과를 나타내었다. 역률은 1, 0.5(지상), 0.5(진상)에서 측정하였으며 주파수는 전압과 동일하게 60, 100, 400, 1000 Hz을 공급하여 각각에 대한 전력 값을 측정하였다. 측정의 결과를 보면 입

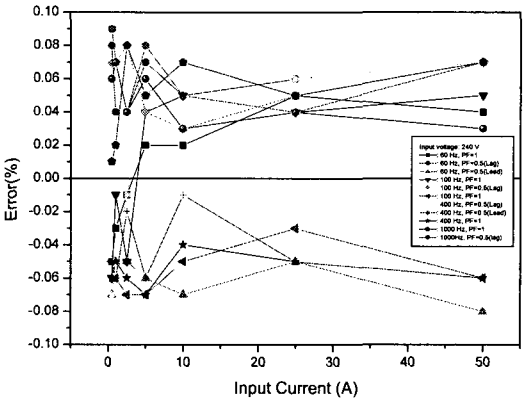

그림 7 전력의 측정결과
Fig. 7 Results of power measurement

력전압과 전류 주파수가 1 kHz 까지 측정이 가능하며 60 Hz에서 100 Hz, 역률 1에서 정확도는 ±0.05 %, 역률 0.5 (지상, 진상)에서 ±0.08 %의 성능을 나타내었다.

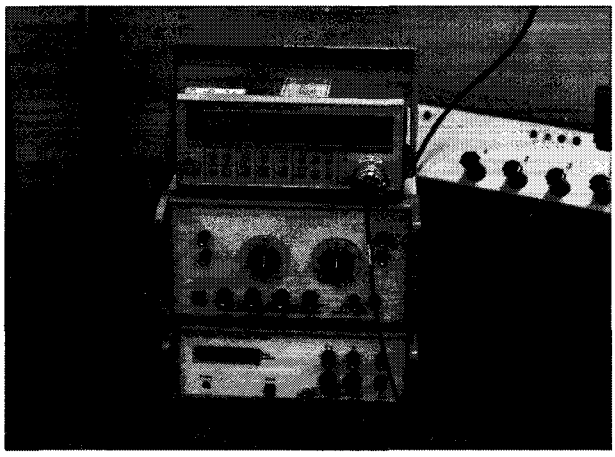

그림 8 제작된 전력계와 DVM
Fig. 8 The constructed wattmeter and a DVM

결과에 의하면 역률이 1보다 작은 경우, 특성이 조금 나쁨을 알 수 있다. 그림 8은 제작한 전력계와 특성을 측정하는 전압계(DVM)를 나타내었다.

4. 결 론

열전형 변환기를 기본으로 하여 전압, 전류, 전력을 정밀하게 측정할 수 있는 전력계를 개발하였다. 이상적인 열전형 변환기는 교류와 직류에 대한 반응 특성이 동일하며 출력 열기전력이 입력 신호에 비례한 자승출력을 가지므로 이 특성을 이용하여 전압, 전류, 전력을 측정할 수 있는 기술을 개발하였다. 전력의 경우 측정 주파수 범위를 1 kHz까지 측정이 가능한 전력계를 제작하여 그 특성을 평가하였다. 전력 이외에 전압, 전류를 정밀하게 측정할 수 있으며 주파수 범위도 3 kHz까지 측정이 가능하다.

참 고 문 헌

[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 fop 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] 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

[5] G.Schuster, "Thermal instrument for measurement of voltage, current, power, and energy at power frequency", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. IM-29, pp.153-157,1980

저 자 소 개

박 영 태 (朴 榮 泰)

1952년 10월 31일생. 1997년 충남대학교 대학원 전기공학과졸업 박사. 1982년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹 책임연구원

Tel : 042-868-5158,

Fax : 042-868-5018

E-mail : pyt@kriss.re.kr

유 권 상 (柳 權 相)

1956년 9월 27일생.

2000년 한남대 대학원 물리학과 졸업 박사. 1988년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹 선임연구원

Tel : 042-868-5164

Fax : 042-868-5018

E-mail : ryuks@kriss.re.kr

장 석 명 (張 錫 明)

1949년 7월 3일생. 1986년 한양대 대학원 전기공학과졸업 박사.

현재 충남대 공대 전기공학과 교수.

Tel : 042-821-5658