

광대역 주파수를 가진 전력 측정 변환기

박영태, 정재갑, 강전홍, 유권상

A watt-converter for a wideband frequency power measurement

Young TaePark, Jae Kap Jung, Jeon Hong Gang, Kwon Sang Ryu

Abstract - A high bandwidth watt-converter, based on an inexpensive, commercially available, standard IC package, is described that covers a frequency range from DC to 100 kHz. The new resistive shunt for a wide-band frequency current measurement of the watt-converter was developed. The converter will use application in accurate power measurement under distorted and high frequency conditions. The advantages of the watt-converter are its simplicity, low cost and fast response time.

1. 서 론

전력 측정은 전자적인 방법이나 자기적인 방법, 혹은 열적인 방법을 사용하여 두 신호를 곱하여 실현한다. 이 방법들은 제 나름대로의 특성을 가지고 있지만 열적인 방법을 사용하여 알고 있는 DC전력과 측정하고자 하는 AC 전력을 비교하여 전력을 측정하는 기술이 아직까지는 제일 정확도가 높은 방법이다[1-7]. 그러나 열적인 방법을 사용할 경우 전력신호로 변환하는 열전형변환소자의 가격이 높아 쉽게 접근하기는 어려운 실정이다. 최근 들어 직류전력 뿐만 아니고 수백 kHz에서 정밀 전력측정의 요구가 늘고 있다. 또 형광등에 사용되는 전자식 안정기, 스텝다운 컨버터, 그리고 산업체에 많이 이용되는 비선형부하의 사용 증가 때문에 전압과 전류의 신호들이 고주파이면서 비정현파 형태를 가지는 경우가 많이 발생한다. 이러한 형태에서의 정밀한 전력측정은 앞으로 점점 증가할 것이며 전력품질 평가와 실시간 모니터링의 기본측정 파라미터가 된다.

일반적으로 AC신호를 실효값 DC로 변환하는 변환소자들은 상용으로 공급되고 있으며 수 MHz 까지 측정할 수 있는 특성을 가지고 있지만 두 신호의 곱을 실효값 DC로 나타낼 수 없다. 그런데 특별히 고주파 AC 신호를 열적으로 실효값 DC로 변환하면서 두개의 입력채널을 가진 상용 광대역 열전형 RMS-DC 변환소자인 실효치-직류변환 소자[8]는 DC에서 100 MHz의 AC신호를 변환하는 능력을 가지고 있고 crest factor가 50:1인 특성을 가지고 있어서 이를 이용하여 전력을 측정할 수 있는 방법을 개발할 수 있다. 이 소자는 AC신호의 고정도의 정밀도 측정을 위한 전통적인 단일접합 열전형 변환기나 다중접합 열전형 변환기와 같은 형태와 원리를 따르지 않으며 열적으로 실효값 DC로 변환하는 블록으로 구성된 표준 IC 패키지로 되어 있다. 기본적으로 패키지 회로 안에 두 쌍의 히터(heater)와 온도센서를 기본으로 구성하고 있다. AC 신호가 입력블록의 히터를 통과하면 히터에서 열이 발생되고 히터에 발생되는 열에 비례하는 DC 전압이 온도센서의 출력으로 나타난다. 이러한 방법에 따라 AC 전압, 전류의 값을 내부의 기준 DC 전압과 비교하여 결정한다. 이와 같이 이 소자는 전압비교 소자로 사용되는 IC 패키지로 공급되고 있으며 고주파 전압의 실효치-직류(true

rms-DC) 변환소자로 사용되고 있다.

본 연구는 이 소자의 실효치-직류변환 회로를 이용하여 광대역 주파수를 가진 전력을 측정하기 위한 전력변환기(watt-converter)를 개발하였다. 이 변환기의 장점은 측정 주파수 범위가 넓고 저가이면서 간단하고 정확도가 우수하다. 이 변환기는 합 증폭기(sum amplifier), 차 증폭기(difference amplifier), 버퍼(buffer), 그리고 상용으로 사용되는 저렴한 가격의 실효치-직류변환 패키지 IC로 구성하였다.

2. 본 론

2.1 동작원리

전력변환기의 동작은 상용으로 활용되고 있는 실효치-직류변환 패키지 IC를 이용하여 직류에서부터 고주파수에 걸친 신호의 전력을 측정한다. 전력측정은 기본적인 수학적법을 이용한 원리를 이용한다. 수학적으로 두 변수의 곱은 각 변수의 합과 차에 각각 자승한 항으로 나타낼 수 있으며 두 변수를 전기적 신호인 전압과 전류의 값으로 실현 시키면 된다. 기본원리는 식(1)과 같이 표현된다.

$$ab = \frac{1}{4} [(a+b)^2 - (a-b)^2] \quad (1)$$

a와 b를 각각 전압 v 와 전류 i 신호로 바꾸어 표시하면 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$vi = \frac{1}{4} [(v+i)^2 - (v-i)^2] \quad (2)$$

전압 v 와 전류 i 는 일반 저압선로의 전압과 전류를 나타내는데 이들의 값을 직접 측정하기는 어려우며 변압기, 변성기 혹은 분압기, 분류기와 같은 변환소자를 활용한다. 그런데 자성체 코어와 코일을 이용하는 변압기, 변성기는 광대역 주파수를 가진 전력에서의 측정은 어렵다. 또 자성체코어와 홀 소자를 결합하여 사용하는 경우에 홀 소자의 특성 상 저전력 측정에는 선형도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 여기에서는 분압기와 특별히 고안된 분류기를 사용하여 광대역 주파수를 가진 전력측정의 입력단 변환소자로 활용한다. Fig. 1은 식(2)을 실현한 전체 다이어그램을 나타내었다.

전압채널에는 입력전압 240 V에서 출력전압을 1 V로 변환되게 하는 분압기 VD를 사용한다. 분압기는 저항 소자들로 구성된다. 입력 전압에 의하여 저항을 통하여 흐르는 전류는 [전류]²[저항]에 의한 전력을 열로 소모하게 되는데 이 열은 저항의 변화를 가져오며 분압기의 출력 전압을 변화시켜 측정의 정확도를 떨어뜨리는 원인이 된다. 그리고 높은 주파수에서 분압기의 위상 특성을 크게 악화시키는 역할을 한다. 이러한 문제의 개선을 위하여 분압기를 구성하고 있는 저항 소자들의 선택이 중요하다.

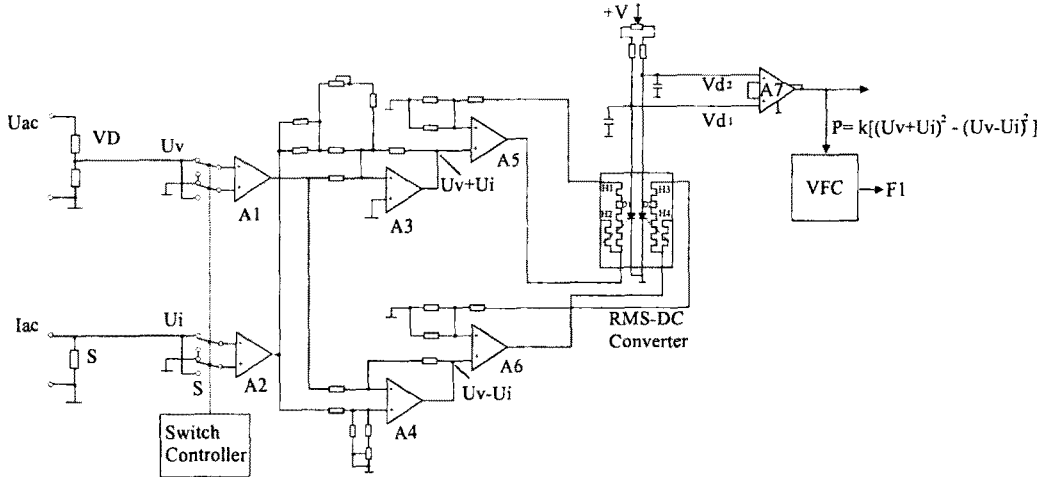


Fig. 1. Schematic diagram of a watt converter using commercially true rms-dc onverter for a wide-band frequency power measurement

분류기 S도 분압기와 마찬가지로 전류가 흐를 때 발생하는 소비 전력을 감안하여 병렬로 여러 개 연결하여 제작함으로써 열에 의하여 발생하는 저항 변화를 최소로 줄일 수 있다. 그리고 저항 내에 존재하는 인덕티브 성분을 제거하기 위한 구조로 설계하였다.

U_v 와 U_i 는 분압기와 분류기의 출력전압 신호를 나타내며 전자증폭기 A1과 A2에 각각 연결된다. 전자증폭기 A1과 A2는 차동증폭기로서 높은 입력임피던스를 가지고 있으며 입력 신호에 대한 버퍼 기능을 가지고 있다. 스위치컨트롤러 S는 입력 U_v 와 U_i 신호의 극성을 바꾸는데 사용하며 여기서 8 Hz로 동작된다. 또 시스템에서 직류를 측정 할 때와 모든 증폭기의 직류에 의한 드리프트를 제거하기 위하여 사용된다. 전자증폭기 A3와 주변 저항들은 식(2)의 첫째항 입력 U_v 와 U_i 신호 합 ($U_v + U_i$)을 실현하는 회로이고 전자증폭기 A4와 주변 저항들은 식(2)의 둘째항 입력 U_v 와 U_i 신호 차 ($U_v - U_i$)를 실현하는 회로로 구성되어있다. 전자증폭기 A5와 A6은 실효치-직류 변환기의 히터에 각각 연결된다. 실효치-직류 변환기는 입력전류의 자승에 비례하여 열을 발생시키는 쌍으로 이루어진 히터저항(H1, H2, H3, H4)들과 열을 감지하는 온도 센서(D1, D2)들로 구성되어 있는 상용 IC이다. 따라서 실효치-직류 변환기에 있는 온도센서 D1과 D2에 발생하는 전압 V_{d1} , V_{d2} 는 다음과 같이 표현된다.

$$V_{d1} = (U_v + U_i)^2, V_{d2} = (U_v - U_i)^2 \quad (3)$$

실효치-직류 변환기에 의하여 전력측정은 히터저항 H1에는 입력의 합 신호가 공급되고 히터저항 H3에는 입력의 차 신호가 공급함으로써 실현된다. 전자증폭기 A7은 인스트루멘테이션 증폭기로 게인이 높은 차동증폭기 역할을 한다. 온도 감지센서인 다이오드 D1과 D2에 의한 전압 $(U_v + U_i)^2$ 과 $(U_v - U_i)^2$ 은 증폭기 A7로부터 차 전압 P가 검출된다. 식(2)에 의하여 전압 P는

$$P = v_i = k [V_{d1} - V_{d2}] = k [(U_v + U_i)^2 - (U_v - U_i)^2] \quad (4)$$

과 같이 표현된다. 여기서 $U_v = U_{ac}/n_1$ 을 나타내며 $U_i = I_{ac}/n_2$ 로 나타낸다. n_1 과 n_2 는 분압기

VD와 분류기 S의 변환상수를 나타내며 k 는 실효치-직류 변환기의 변환상수와 상수 1/4를 포함한 인자로 표현된다. 따라서 출력전압 P는 전력으로 표시된다. 직류 전압으로 나타난 전력 P를 적산전력량으로 표시하기 위하여 전압을 주파수로 변환시켜 사용한다. Fig. 1에는 정밀 전압-주파수 변환기를 사용하여 적산전력량 F1로 출력시켜 고주파 적산전력량계로 활용하게 하였다.

2.2 실험결과 및 고찰

Fig. 1에 나타난 전력변환기의 특성을 평가하기 위하여 입력 단 부분인 분압기와 분류기에 대한 실험과 전력을 감지하는 회로 부분을 나누어 특성을 평가하였다. 분압기 VD의 진폭과 위상오차는 Sullivan F9200 precision voltage divider와 PAR lockin amplifier를 사용하여 측정하였다. 위상의 상대표준불확도는 $200 \mu\text{rad}$ 보다 우수하였으며 진폭의 상대표준불확도는 100 uV/V 의 특성을 나타내었다. 그리고 분류기 S의 위상 상대표준불확도는 $500 \mu\text{rad}$ 보다 우수하였으며 진폭의 상대표준불확도는 $400 \text{ u}\Omega/\Omega$ 의 특성을 나타내었다.

주파수 특성에 대한 실험은 5 Hz에서 100 kHz 까지 수행하였다. 두 실험입력 전압은 분압기와 분류기의 명목값(nominal value) 240 V와 10 A에서 변환된 출력 전압 값이 1 V이므로 실험을 위하여 1 V 값으로 공급하였다. 교류 실험에 사용된 전압공급장치는 위상표준기로 사용되는 Clarke-Hess, model 5000을 사용하였고 직류 실험은 Fluke 5520A를 사용하였다. 이 표준기는 2 채널의 위상을 변화시켜가면서 공급하는 장치로 전압채널 U_v 와 전류채널 U_i 신호를 공급하는 전압원 역할을 한다. 위상표준기에서 출력되는 각 채널의 전압을 정밀 디지털 전압계(Wavetek 1281, 불확도; 0.02%, 100 kHz 까지)로 측정한다. 이것은 전력변환기의 입력에 공급되는 신호전압의 크기를 모니터링하여 전력변환기의 출력 전압 값과 비교함으로써 입력과 출력에 대한 선형성을 알 수 있다. 정밀 위상계(phase meter, Krohn-hite, model 6610, 분해능 0.01 deg)는 위상표준기 두 출력 신호의 위상 변화를 측정하는데 사용된다.

스위치컨트롤러 S는 입력 U_v 와 U_i 신호의 극성을 바꾸고 직류를 측정 할 때와 모든 증폭기의 직류에 의한 드리프트를 제거하기 위하여 사용될 뿐만 아니고 실효치-직류 변환기의 파라미터들의 불일치에서 오는 오차를 줄

이다. 주파수와 역률 변화에 대한 선형성 특성 평가 결과를 Fig.2에 나타내었다. 교류의 경우 두 입력 전압(U_v 와 U_i)을 1 V에 고정하고 주파수를 5 Hz에서 100 kHz 까지 변화 시키면서 역률 1, 역률 0.5(지상), 0.5(진상)에서 측정하였다. 측정결과 주파수 10 kHz 까지 선형도가 0.4%, 50 kHz 까지 0.5%, 그리고 100 kHz 까지 0.8%의 특성을 보였다. 주파수가 증가하면 할수록 선형도가 떨어진다. 이것은 전자증폭기의 고주파 특성이 나쁘기 때문이고 신호선과 접지선 사이에 존재하는 정전용량에 의하여 발생하는 누설 때문인 것으로 판단된다.

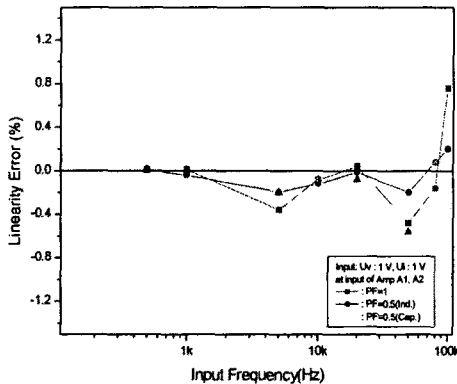


Fig. 2. Linearity error by frequencies variation.

고주파에서 실효치-직류 변환기의 출력은 직류전압에 고조파를 함유하므로 고조파 성분을 제거하기 위하여 저역 통과 필터를 사용하여 측정하였다. 직류의 경우 주파수 5 Hz에서와 같은 특성을 얻었다. Fig.3은 전압채널 U_v 의 신호 크기를 1 V로 고정하고 역률 1에서 전류채널 U_i 의 크기를 0.1, 0.5, 0.8, 1 V로 변화시키면서 선형도를 측정한 결과를 나타내었다. 결과에 의하면 Fig.2와 같은 경향을 나타내었다. 주파수가 백 kHz에서부터 오차가 점점 증가하는 것을 알 수 있다.

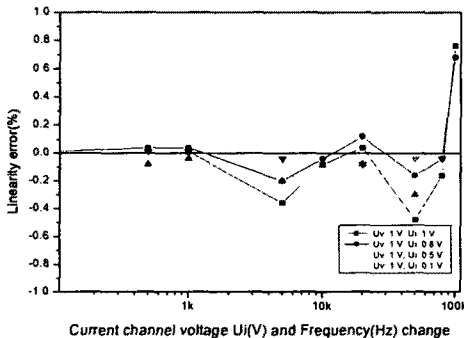


Fig. 3. Linearity error by input signal variation

Fig.4는 안정도에 대한 특성을 나타내었다. 6시간 동안 출력 변화를 관찰하였는데 2시간 30 분을 기점으로 처음 측정된 값으로 돌아오는 것을 알 수 있다. 결과에 의하면 안정도는 0.006%/h로 평가되었다.

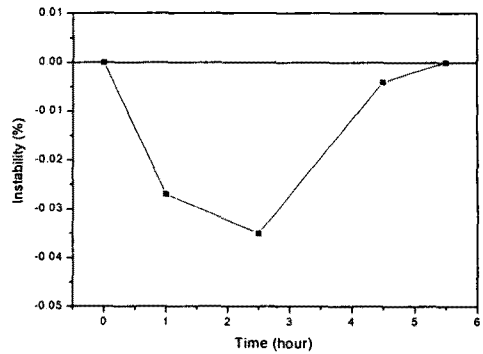


Fig. 4 Stability

3. 결론

상용으로 사용되는 실효치-직류 변환 IC를 이용하여 광대역 주파수를 가진 전력을 측정하기 위한 전력변환기를 개발하였다. 넓은 주파수 범위에서 전류 측정용 분류기의 인덕티브 성분은 위상변화를 일으키며 전력 측정에서 심각한 오차를 일으키는데 이를 개선하기 위하여 새로운 형태의 분류기를 개발하여 고주파 전류 측정의 소자로 사용하였다. 전력변환기는 역률 1, 역률 0.5(지상), 0.5(진상)에서 주파수 10 kHz 까지 선형도가 0.4%, 50 kHz 까지 0.5%, 그리고 100 kHz 까지 0.8%의 특성을 보였다.

이 전력변환기는 일반 전기기기의 전력 측정뿐만 아니고 형광등에 사용되는 전자식 안정기, 스텝다운 컨버터, 그리고 산업체에 많이 이용되는 비선형부하에 대한 전력을 측정하고자 한다.

[참고 문헌]

- [1] 박영태, 유권상, 장석명, "정밀전압, 전류, 전력측정 다기능전력계", 전기학회논문지, 51B권, 10호, pp.568-572, 2002.
- [2] G.Schuster, "Thermal measurement of AC power in comparison with the electrodynamic method", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.IM-25, pp.529-533, 1976.
- [3] 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
- [4] 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
- [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.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
- [7] E. Z. Shapiro, Young Tae Park, I. Budovsky, "A New Power Transfer Standard, Its Investigation and Intercomparison", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 46, no2, pp.412-415, April, 1997.
- [8] Linear Databook 1990, Linear Technology Corporation, pp.11.33-11.44, Milpitas, CA