

광대역 주파수를 가진 전력 측정 변환기

A Watt-Converter for a Wideband Frequency Power Measurement

朴榮泰[†] · 姜鎭洪^{*} · 鄭在甲^{**} · 柳權相^{***}

(Young-Tae Park · 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 ranges 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 proposed watt-converter are its simplicity, low cost and fast response time.

Key Words : Watt-Converter, Inexpensive, Standard IC Package, Wide-Band, Resistive Shunt

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 측정하고자하는 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 형태에서 정밀한 전력측정에 대한 요구는 앞으로 점점 증가할 것이며 전력품질 평가와 실시간 모니터링의 기본측정 파라미터로 중요한 의미를 갖는다.

일반적으로 AC신호를 실효값 DC로 변환하는 변환소자들은 상용으로 공급되고 있으며 수 MHz 까지 측정할 수 있는 특성을 가지고 있지만 전력으로 나타내는 전압과 전류 신호의 곱을 실효값 DC로 나타낼 수 없다. 그런데 특별히 고주파 AC 신호를 열적으로 실효값 DC로 변환하면서 두개의 입력 채널을 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 통하면 히터에서 열이 발생되고 히터에 발생하는 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[9].

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 가산 증폭기(sum amplifier), 차동 증폭기(difference amplifier), 버퍼(buffer), 그리고 상용으로 사용되는 저렴한 가격의 실효치-직류변환 패키지 IC로 구성하였다.

2. 동작원리

전력변환기의 동작은 상용으로 활용되고 있는 실효치-직류변환 패키지 IC를 이용하여 직류에서부터 고주파수에 걸친 신호의 전력을 측정한다. 전력측정은 기본적인 수학법칙을 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.

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

† 교신저자, 正會員 : 韓國標準科學研究院 電磁氣標準部 博士

E-mail : pyt@kriss.re.kr

* 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 碩士

*** 正會員 : 韓國標準科學研究院 電磁氣標準部 博士

接受日字 : 2004年 5月 14日

最終完了 : 2004年 8月 2日

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 저 전력 측정에는 선형도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 여기에서는 분압기와 특별히 고안된 분류기를 사용하여 광대역 주파수를 가진 전력측정의 입력단 변환소자로 활용한다. 그림 1은 식(2)을 실현한 전체 다이어그램을 나타내었다.

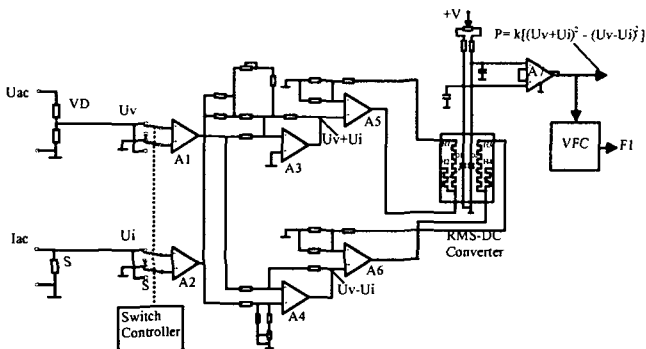


그림 1 광대역 주파수를 가진 전력측정을 위하여 상용 실험치-직류변환기를 사용한 전력변환기의 전체 다이어그램

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

전압채널에는 입력전압 240 V에서 출력전압을 1 V로 변환되게 하는 분압기 VD를 사용한다. 분압기는 저항 소자들로 구성된다. 입력 전압에 의하여 저항을 통하여 흐르는 전류는 [전압]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. 따라서 저항 소자에 흐르는 전류 때문에 발생하는 자기 가열을 충분히 감당할 수 있고 위상의 변화가 적은 전력용 금속 필름 저항을 사용한다. 금속 필름 저항은 저항 온도 계수가 우수하고 교류/직류 저항 차가 매우 작아 분압기의 저항 소자로 우수한 특성을 가지기 때문이다. 분압기는 자기 가열에 의한 오차를 줄이기 위하여 0.1%, 10 kΩ, 온도계수 0.6 ppm/°C의 정밀저항을 여러 개 직렬로 구성하여 사용한다. 분압기에 전압이 공급되었을 때 흐르는 전류는 2 mA가 되게하여 각 저항에서 소비되는 전력은 40 mW를 넘지 않는다. 이 경우 1 W의 저항들을 사용하므로 허용 소비 전력 보다 25배의 여유가 있으므로 자기 가열에 의한 오차는 거의 무시할 수 있다. 온도에 의한 오차는 20~30 °C 범위에서 저항의 온도 계수의 영향을 받지 않는다.

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 유도성 성분을 제거하기 위한 구조로 설계하였다. 넓은 주파수 범위에서 유도성 성분은 위상 변화를 일으키며 전력 측정에서 심각한 오차를 일으킨다. 여러 개의 정밀 저항으로 구성된 분류기에서 직류가 흐를 때와 교류가 흐를 때 얻어지는 작은 전압 신호는 동일한 특성을 나타내며 저항 온도 계수가 작은 저항을 선택함으로써 교류/직류 변환 오차를 줄일 수 있다. 실제 분류기는 다람쥐 틀 모양(squirrel-cage type)의 구조로 10 Ω, 1 W(0.1%), 온도계수 0.6 ppm/°C인 저항 100 개를 병렬로 연결하여 0.1 Ω 이 되게 하고, 최대 입력전류 10 A에서 1 V의 전압이 발생되도록 한다. 각 저항들은 원형 동판을 서로 대향되게 하여 그 사이에 설치하고 저항과 저항 사이에 전기 차폐 막과 같은 역할을 할 수 있게 양면이 동판으로 된 판을 설치하였다. 이렇게 함으로써 양면 동판을 통과하는 전류의 방향을 서로 반대로 흐르게 하여 전류에 의한 자장이 상쇄되게 하므로써 유도성 성분에 의한 오차를 줄이고 장기 안정도에 의한 저항 변화, 자기 가열에 의한 저항 변화, 외부 온도에 의한 저항 변화, 유도성 성분에 의한 위상변화 등을 줄일 수 있다. 그림 2는 고주파 특성이 우수한 특성을 나타내도록 고안한 분류기를 나타내었다. 그림 2(a)는 분류기의 정면도이고 2(b)는 3개의 원판으로 구성된 간략한 모양을 나타내었으며 그림 3은 실제 모양을 나타내었다.

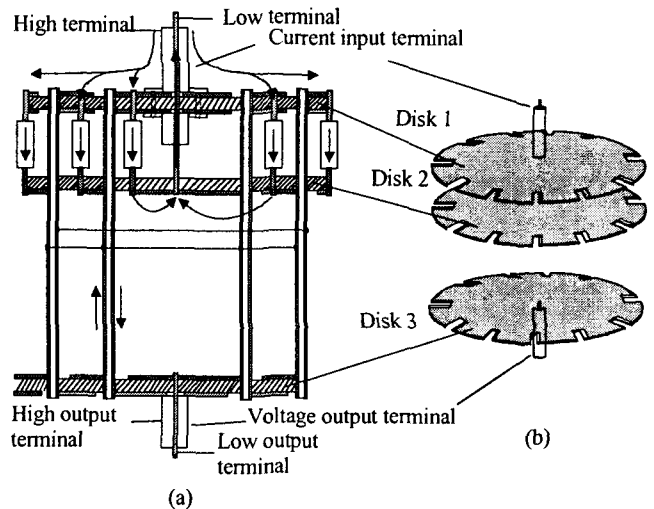


그림 2 광대역 주파수를 가진 전류측정을 위하여 개발한 분류기. (a)정면도, (b) 3개의 원판으로 구성된 간략한 모양

Fig. 2 The developed current shunt for a wide-band frequency current measurement. (a) front view, (b) simplified shunt with 3 disk

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.

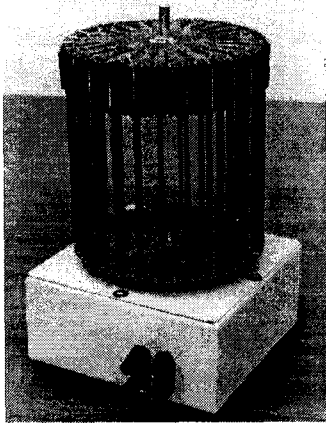


그림 3 개발된 저항 분류기
Fig. 3 The developed resistive shunt

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 히터 저항(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 계기용 증폭기로 계인이 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 고유의 변환상수와 상수 1/4를 포함한 인자로 표현된다. 실제 변환기는 입력 전류에 따라 변환되는 기전력이 각각 다르며 그 크기는 고유의 변환상수로 나타나지만 그림 1에 나타낸바와 같이 가변 저항을 이용하여 고유 변환상수에 의한 영향을 제거할 수 있다. 따라서 출력전압 P는 전력으로 표시된다. 직류전압으로 나타난 전력 P를 직산전력량으로 표시하기 위하여 전압

을 주파수로 변환시켜 사용한다. 그림 1에는 정밀 전압-주파수 변환기를 사용하여 직산전력량 F1로 출력시켜 고주파 직산전력량계로 활용하게 하였다.

3. 실험결과

그림 1에 나타낸 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 상대표준불확실 정도는 200 μ rad 보다 우수하였으며 진폭의 상대표준불확실 정도는 100 μ V/V의 특성을 나타내었다. 그리고 분류기 S의 위상 상대표준불확실 정도는 500 μ rad 보다 우수하였으며 진폭의 상대표준불확실 정도는 400 μ Q/ Ω 의 특성을 나타내었다. 그림 4는 전력변환기의 전력감지회로의 특성을 평가하기 위한 방법을 나타내었다.

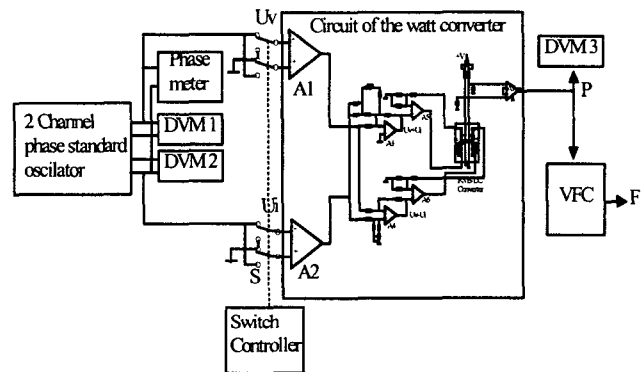


그림 4 광대역 주파수 전력 측정을 위한 전력변환기의 시험 방법
Fig. 4 Test method of the watt converter for a wide-band frequency power measurement

주파수 특성에 대한 실험은 5 Hz에서 100 kHz까지 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. DVM1, DVM2는 위상표준기에서 출력되는 각 채널의 전압을 정밀 디지털 전압계(Wavetek 1281, 불확실 정도; 0.02%, 100 kHz까지)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.

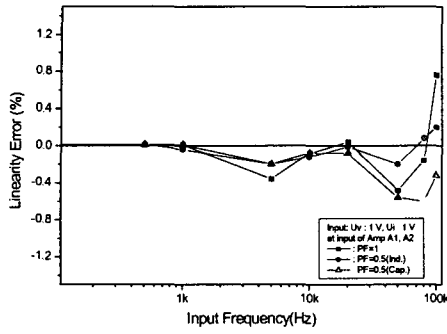


그림 5 주파수 변화에 의한 선형오차
Fig. 5 Linearity error by frequencies variation

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 줄인다. 주파수와 역률 변화에 대한 선형성 특성 평가 결과를 그림 5에 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. 60 Hz를 기본으로 측정한 결과 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 나빠기 때문이고 신호선과 접지선 사이에 존재하는 정전용량에 의하여 발생하는 누설 때문인 것으로 판단된다.

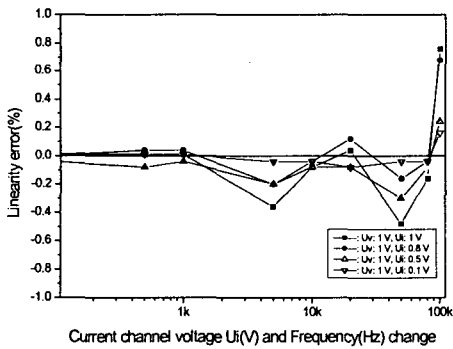


그림 6 입력 변화에 의한 선형 오차
Fig. 6 Linearity error by input signal variation

고주파에서 실효치-직류 변환기의 출력은 직류전압에 고조파를 함유하므로 고조파 성분을 제거하기 위하여 저역통과 필터를 사용하여 측정하였다. 직류의 경우 주파수 5 Hz에서와 같은 특성을 얻었다. 그림 6은 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 그림 5와 같은 경향을 나타내었다. 주파수가 백 kHz에서부터 오차가 점점 증가하는 것을 알 수 있으며 60 Hz를 기본 주파수로 하였다.

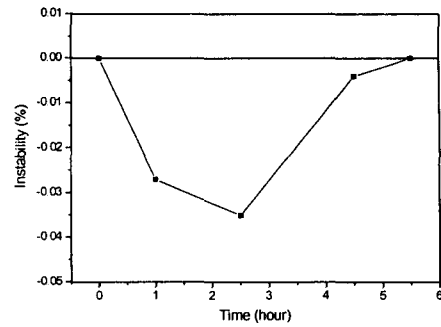


그림 7 안정도
Fig. 7 Stability

그림 7은 60 Hz에서의 안정도에 대한 특성을 나타내었다. 6시간 동안 출력 변화를 관찰하였는데 2시간 30 분을 기점으로 처음 측정한 값으로 돌아오는 것을 알 수 있다. 결과에 의하면 안정도는 0.006%/h로 평가되었다. 표1은 전력측정 변환기의 특성을 분석하기 위하여 사용된 시스템에 대한 불확실 정도를 분석한 표를 나타내었다. 분석된 결과에 의하면 분압기와 분류기의 진폭과 주파수 변화에 대한 위상 오차는 회로 요소에 비해 불확실 정도가 적었으며 대부분 회로에 의한 주파수 증가에 불확실 정도가 증가함을 알 수 있다. 또 전력측정 변환기의 특성을 분석하기 위하여 사용된 시스템에 대한 불확실 정도는 전력측정 변환기의 특성에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

표 1 교류전력측정 변환기의 특성을 분석하기 위하여 사용된 시스템에 대한 불확실 정도

Table 1 Uncertainties of the system for the test of the watt-convert at ac power

번호	측정요소		불확실 정도(Uncertainty)
1	VD	위상	200 μ rad
		진폭	100 μ V/V
2	S	위상	500 μ rad
		진폭	400 μ Ω/Ω
3	Watt-converter circuit	10 kHz	0.4 %
		50 kHz	0.5 %
		100 kHz	0.8 %
4	Watt-converter stability		0.006 %/h
5	DVM1		0.02 %
6	DVM2		0.02 %
7	DVM3		0.02 %
8	Phase Meter		0.02 %
	Total Uncertainty (k=2)	10 kHz	0.41 %
		50 kHz	0.51 %
		100 kHz	0.81 %

4. 결 론

상용으로 사용되는 실효치-직류변환 IC를 이용하여 광대역 주파수를 가진 전력을 측정하기 위한 전력변환기를 개발하였다. 넓은 주파수 범위에서 전류 측정용 분류기의 유도성 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. 또 시간 경과에 대한 안정도는 0.006%/h로 평가되었다. 이 전력변환기는 일반 전기기기의 전력 측정뿐만 아니고 형광등에 사용되는 전자식 안정기, 스텝다운 컨버터, 그리고 산업체에 많이 이용되는 비선형부하에 대한 전력을 측정하고자 한다.

참 고 문 헌

- [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 Inter-comparison", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 46, No. 2, pp. 412-415, April, 1997.
- [8] Linear Databook 1990, Linear Technology Corporation, pp. 11.33-11.44, Milpitas, CA.
- [9] P. S. Filipiski, R. Arseneau and J. J. Zell, "Watt and Voltampere Transfer Standard", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 42, No2, pp. 170-175, April, 1993.

저 자 소 개



박 영 태 (朴 榮 泰)

1952년 10월 31일생. 1997년 충남대학교 대학원 전기공학과졸업 박사. 982년~현재 한국표준과학연구원 표준부.전기자기그룹 책임연구원

Tel : 042-868-5158, Fax : 042-868-5018

E-mail : pyt@kriss.re.kr



강 전 홍 (姜 鎭 洪)

1963년 2월 8일생. 1998년 대전한밭대 전기공학과 졸업 석사. 2004년 충남대학교 전기공학과 박사과정. 1988년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부. 전기자기그룹 선임연구원

Tel : 042-868-5152, Fax : 042-868-5018

E-mail : jhkang@kriss.re.kr



정 재 갑 (鄭 在 甲)

1965년 7월 4일생. 1998년 고려대 물리학과 졸업 박사. 2001년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹 선임연구원

Tel : 042-868-5152, Fax : 042-868-5018

E-mail : jkjung@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