

## 시간고조파를 함유하는 전력량의 측정 및 해석

장석명\* 박영태\*\* 정연호\* °이현구\* 서진호\*  
 \* 충남대학교 전기공학과 \*\* 한국표준과학연구원

### The Measurement and Analysis of the Electric Power Energy with Time Harmonics

S.M. Jang\* Y.T. Park\*\* Y.H. Jeong\* °H.G Lee\* J.H Seo\*  
 \* Dept. of Electrical Engineering Chungnam Nat'l Univ. \*\* KRISS

#### Abstract

In accordance with the development of switching devices, the voltage and current signal have involved the time harmonics. But most power meter is designed to operate in sinusoidal signal.

Therefore, this paper evaluate the operating state and characteristic of power meter under the voltage and current included the time harmonics, analysing the results which are obtained by means of theoretical analysis and an experiment of several instruments for power measuring.

#### 1. 서론

산업이 발전되면서 시스템의 정밀 제어를 위한 요구조건이 강화되고 있으며, 이를 만족시키기 위한 연구도 더욱 발전하고 있다. 즉 스위칭 기술에 토대를 둔 전력전자회로에서의 전압, 전류, 주파수, 역률, 위상 등의 조정에 의한 전력의 제어가 필수적이다. 따라서 시간 고조파를 함유하는 비정현적인 전압과 전류 형태로 전력 에너지가 전달되고 있다. 그러나 전력에너지의 정량적인 해석은 정현파를 바탕으로 하여 이루어지고 있는 실정이다. 이는 고조파가 포함 된 전력장치에 대한 이론적 기반의 부족, 새로운 계측 수단에 대한 인식 및 연구의 부족 그리고 가능한한 고가장비를 기피하려는 경제적인 이유 등에 의하여 전통적인 계측기의 사용을 고수하고 있기 때문이다.

현재 대부분의 전력측정기는 정현파에서 동작되도록 설계되어 있기 때문에 계측량이 실제와는 다르게 된다. 그러나 점차적으로 비정현 상태의 전력에너지가 공급됨에 따라 수반되는 시스템의 특성을 정밀하게 파악하고 개선하려는 노력이 시도되고 있다. [1-4]

본 연구에서는 비정현파 전압과 전류에 대한 전력계측기의 동작상태와 특성을 분석하였다. 즉 시간고조파를 갖는 전압과 전류파형을 임의로 설정하여 파형발생기로 발생시킨 후 동작원리가 서로 다른 전력계측기로 측정하였고, 각 계측기의 실험결과와 시뮬레이션에 의한 이론적인 해석결과를 비교검토했다. 이를 통해 시간고조파가 함유된 전력의 측정에 정밀성을 갖는 전력계측기의 개발에 참고가 되게 하였다.

#### 2. 고조파가 함유된 전력의 이론적 해석

고조파가 함유된 임의의 파형을 시뮬레이션에 의하여 아래와 같이 해석하기로 한다.

전압과 전류가 고조파를 포함하고 있을 경우 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (1)$$

여기서  $V_n$ 은 고조파 전압의 진폭,  $n$ 은 고조파 차수,  $\theta_n$ 은 고조파의 위상각을 나타낸다.

고조파가 포함된 전류는

$$i(t) = \sum_{m=1}^{\infty} I_m \sin(m\omega t + \phi_m) \quad (2)$$

여기서  $I_m$ 은 고조파 전류의 진폭,  $m$ 은 고조파 차수,  $\phi_m$ 은 고조파의 위상각을 나타낸다.

본 해석에서는 전압의 경우 식 (1)에서  $(2n-1)$ 차 고조파를  $n=6$ 까지 즉 11차 고조파까지 고려하였으며  $\theta_n$ 은  $0^\circ$ 로 하였다. 전류는  $m=1$ 인 경우 즉 기본파인 경우를 해석하였다. 기본파 전압은 100[V]라 하고 고조파의 진폭은 기본파 진폭의 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100 [%]를 주고 해석하였다. 기본파 전류는 1[A]라 하고 전류의 위상각  $\phi_n$ 은  $0^\circ$ 와  $60^\circ$  두 가지 경우만을 해석하였다. 주파수는 60[Hz]로 가정했으므로 각주파수  $\omega$ 는  $120\pi$ 가 된다. 샘플링 타임(Sampling time)은 0.1[ms]로 잡고 0초에서 0.02초까지 계산하였다. 순시전력은 고조파 전압과 전류의 순시치를 곱하여 구하였다.

이때의 평균전력 P는

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [V_n \sin(n\omega t + \theta_n)] [I_m \sin(m\omega t + \phi_m)] d\omega t$$

로 나타낸다. 이때  $m \neq n$ 일 경우 식 (3)의 평균전력은 0가 되므로  $m = n$ 인 경우만 생각하면

$$P = \frac{V_n I_n}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin(n\omega t + \theta_n) \sin(n\omega t + \phi_n) d\omega t \quad (4)$$

$$= \frac{V_n I_n}{2} \cos(\theta_n - \phi_n) = \frac{V_n I_n}{2} \cos \alpha$$

로 나타낸다. 여기서  $\alpha = (\theta_n - \phi_n)$ 는 고조파 전압과 전류의 위상차를 나타낸다. 즉 평균전력은 전압과 전류의 실효치의 곱에 위상차의 cos값을 곱한 것과 같음을 알 수 있다.

주기 T인 전압고조파의 실효치는

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (5)$$

실효치의 계산에서 적분은 SIMPSON'S RULE이라는 수치해석법을 이용하여 고조파 전압과 전류의 실효치를 구했다.

$$V^{(k)} = \frac{h}{3} \left\{ [v(a)^2 + v(b)^2] + 4 \sum_{j=1}^{2k} v^2 [a + (2j-1)h] + 2 \sum_{j=1}^{2k-1} v^2(a + 2jh) \right\} \quad (6)$$

여기서  $k = \frac{1}{2^{k+1}}$

$v(a) = \text{초기치}, v(b) = \text{최종치}$

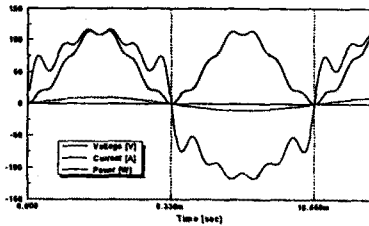
$l$  은 적분구간으로써 고조파 전압 주기  $T$ 의  $\frac{1}{2}$ 과 같다. 침자  $k$ 는 사용된 포물선 단면의 수를 나타낸다. 즉  $k=0$ 일 때는 한 개의 포물선 사용,  $k=1$ 일 때는 두 개의 포물선이 사용된다.  $k$ 가 커질수록 오차는 줄어든다. 계산시간, 시스템 용량 등의 문제가 생기기 때문에 일반적으로 사용되는 포물선 단면은 2<sup>k</sup>개다.

식 (5)와 식 (6)에 따라 전압 고조파 실효치는

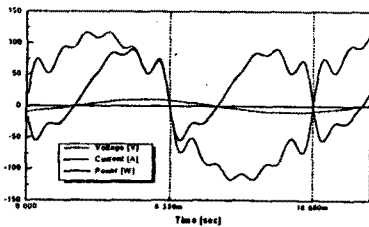
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T V^2 dt} \quad (7)$$

이며 전류의 실효치 역시 전압과 같은 방법으로 구한다.

그림 1에 고조파 전압 진폭이 10%이고 기본과 전류가 흐름 때의 순시전력 파형을 나타내었다. (a)는 전압과 전류의 위상차가 0°인 경우이고 (b)는 전압과 전류의 위상차가 60°인 경우이다.



(a)



(b)

그림 1. 고조파 전압 진폭이 10%이고 기본과 전류가 흐름 때의 순시전력 파형

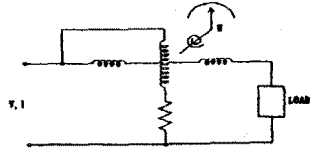
### 3. 전력측정기의 종류 및 동작원리

현재까지 개발된 전력측정기는 동작원리에 따라 크게 4가지로 분류할 수 있다.

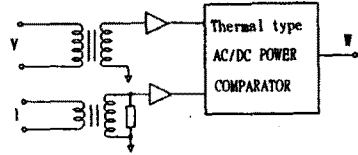
- 1) 유도형 전력계
- 2) 열전형 전력계
- 3) A/D 변환 전력계
- 4) TDM(Time Division Methode) 전력계

그림2에 서로 다른 동작원리를 가진 4종류의 전력 측정기를 나타내었다. 그림2 (a)의 유도형 전력계는 아날로그형 전력계를 나타내며 고정부의 코일을 통하여 전류가 흐르면 자속이 발생되고 자속이 발생하는 곳에 가동코일이 설치되어 있어서 전자기력에 의하여 토오크가 발생된다. 이때 발생하는 토오크는 부하에 공급되는 전류와 전압의 곱에 비례한다. 이 계기의 측정 주파수 범위는 25~1000Hz이며 지역들에서 주파수 범위는 25~500Hz 정도의 특성을 가지고 있다.

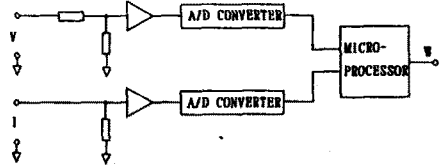
그림2 (b)는 열전형 변환기(thermal converter)를 사용한 전력계를 나타내는데 교류입력 전류와 전압은 열전형 변환기에서



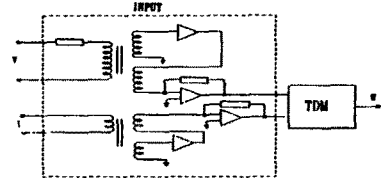
(a) 가동 코일형



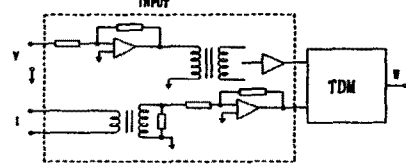
(b) 열전형



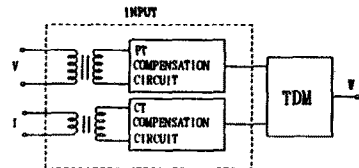
(c) A/D 변환형



(d) TDM



(e) TDM



(f) TDM

그림 2. 전력계측기의 종류

직류전압과 전류를 비교하여 그 차에 의하여 교류전력을 측정하는 것으로 정확도가 매우 높은 전력계이나 측정 주파수 범위가 35~75Hz이며 응답 특성이 느린 단점을 가지고 있다.

그림2 (c)는 입력 전압과 전류를 각각 저항 분압기와 분류기를 사용하여 낮은 전압으로 변환시키고, A/D변환기를 통하여 디지털화한 후 마이크로프로세서에 의해 연산하여 전력을 측정하는 전력계로서 응답특성이 매우 빠르며 측정 주파수 범위는 20Hz~200kHz의 특성을 가지고 있으므로 높은 주파수 파형을 갖는 전력 측정에 용이하다.

그림 2 (d)(e)(f)는 시분할방식(TDM:Time Division Multiplier)을 이용하는 전력계로서 가장 많이 이용되고 있으며 입력단의 구성 형태에 따라 세가지로 구분하였다. (d),(e)는 CT를 사용하여 전압과 전류를 강압시킨 후 전압 신호는 펄스폭변조(PWM)를 사용하고 전류 신호는 진폭변조(AM) 신호를 사용하여 전력을 측정하는 전력계이다. (f)는 입력전압과 전류를 각각 PT와 CT를 사용하여 강압시킨 후 이들 각각의 신호를 보상하여 펄스폭변조와 진폭변조를 통하여 전력을 측정하고 있다. (d)의 주파수 측정범위는 20~400Hz, (e),(f)는 10Hz~20kHz의 특성을 가지고 있다. 주파수 측정 범위의 확장은 펄스폭변조 신호를 증가시키면 가능하지만 펄스폭변조 신호의 증가에 따라 발생하는 문제를 보상할 수 있는 기술이 필요하다.

#### 4. 고조파 전력의 측정 및 검토

전력계의 특성을 시험하기 위하여 그림 3과 같이 구성하여 실험하였다. 그림 2에서 나타낸 6종류의 전력측정기를 각각 수집하였고 임의의 고조파 성분을 발생시키기 위하여 2채널 파형 발생장치를 사용하였다. 파형발생장치의 CH1에서 발생된 낮은 전압은 전압 증폭기를 통하여 증폭되어 피시험 전력계의 전압 입력단에 연결하고 CH2에서 발생된 낮은 전류는 전류 증폭기를 통하여 피시험 전력계의 전류 입력단에 연결하여 시험하였다.

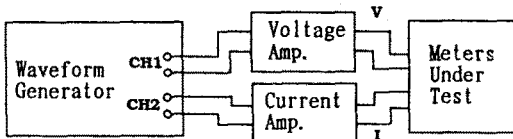


그림 3. 실험계통도

2장에서 이룬 해석결과 같이 시험에 사용된 입력 전압은 식 (1)에서 기본파 전압  $V_1 = 100[V]$ , 나머지 고조파 성분의 진폭( $V_n$ ,  $n$ 은 3,5,7,9,11)은 기본파 전압  $V_1$ 의 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100 [%]로 증가시켜 가면서 실험하였다. 전류는 식 (2)에서 기본파 전류  $I_1 = 1[A]$ 만을 공급하였다. 고조파 전압과 전류 사이의 위상차는 파형발생장치에서 조절할 수 있으며  $0^\circ$  와  $60^\circ$  의 두 가지 경우를 실험하였다.

표 1. 실험치와 계산치의 오차율

(a) PF=1 ( $\alpha=0^\circ$ )

|     | (a)   | (b)   | (c)   | (d)   | (e)   | (f)   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0   | -0.20 | 0     | -0.12 | -0.05 | -0.04 | +0.10 |
| 10  | -0.28 | +0.09 | +0.09 | +0.11 | +0.05 | +0.26 |
| 20  | -0.26 | +0.04 | +0.18 | -0.16 | +0.16 | +0.10 |
| 40  | -0.32 | +0.03 | +0.07 | -0.02 | +0.15 | +0.05 |
| 60  | -0.27 | +0.03 | +0.13 | +0.05 | -0.07 | +0.10 |
| 80  | -0.49 | +0.07 | +0.21 | +0.10 | -0.07 | +0.38 |
| 100 | -0.23 | +0.01 | -0.04 | -0.12 | +0.07 | +0.14 |

(b) PF=0.5 ( $\alpha=60^\circ$ )

|     | (a)   | (b)   | (c)   | (d)   | (e)   | (f)   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0   | -0.30 | 0     | -0.05 | -0.18 | +0.20 | +0.25 |
| 10  | -0.42 | -0.11 | -0.32 | -0.35 | -0.50 | -0.42 |
| 20  | -0.34 | -0.20 | -0.20 | -0.27 | -0.44 | -0.34 |
| 40  | -0.35 | -0.15 | -0.25 | -0.35 | -0.75 | -0.35 |
| 60  | -0.39 | -0.16 | -0.26 | -0.36 | -0.73 | -0.30 |
| 80  | -0.42 | -0.20 | -0.29 | -0.45 | -0.64 | -0.32 |
| 100 | +0.06 | -0.18 | -0.03 | -0.11 | -0.89 | -0.26 |

각각의 전력계에 대한 실험치와 이론적 계산치의 오차율을 표 1에 나타내었다. 표 1의 (a)는 고조파 전압과 전류의 위상차가  $0^\circ$  인 경우 즉 역률이 1인 경우의 오차율이고 표 1의 (b)는 고조파 전압과 전류의 위상차가  $60^\circ$  인 경우 즉 역률이 0.5 인 경우의 오차율이다. 표에서 알 수 있듯이 전력 측정기의

전력 측정값은 전압과 전류의 위상차가  $0^\circ$  인 경우 이론적인 계산 결과 보다  $\pm 0.5\%$  범위된 값을 나타내었으며  $60^\circ$  인 경우  $\pm 1\%$ 보다 작은 특성을 나타내었다. 순수한 정현파의 경우 모든 전력계측기의 오차는 각각의 정확도 범위 안에 있었으나 고조파가 포함되면 일부는 오차 범위를 벗어났다. 또한 전압과 전류의 위상차가 커질수록 오차율이 더욱 커지는 것을 확인할 수 있었다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 시간고조파를 갖는 전압과 전류파형을 임의로 설정하여 파형발생기로 발생시킨 후 동작원리가 서로 다른 전력계측기로 측정하였고, 각 전력계측기의 실험결과와 시뮬레이션에 의한 이론적인 해석결과를 비교검토하여 비정현파 전압과 전류에 대한 전력계측기의 동작상태와 특성을 분석하였다.

1차 고조파까지 고려한 실험 결과 실험에 사용된 전력계측기의 전력 측정값은 전압과 전류의 위상차가  $0^\circ$  인 경우 이론적인 계산 결과 보다  $\pm 0.5\%$  범위된 값을 나타내었으며  $60^\circ$  인 경우  $\pm 1\%$ 보다 작은 특성을 나타내었다.

고조파 성분이 함유된 전압과 전류는 대용량 산업부하에 심각한 영향을 미치고 있으며 적산전력계와 같은 계측장치에서도 큰 오차를 발생시키고 있다. [5-7] 또, 현재 유도기기의 제어에 광범위하게 사용되고 있는 인버터의 특성을 시험하기 위해서는 정확하게 인버터의 출력전압, 전류, 전력을 측정해야 한다. [8] 그러나 스위칭 반도체 전력소자 기술을 이용하고 있는 인버터의 출력은 수많은 고조파를 포함하고 있으므로 정현파 상태의 전력측정장치로 측정할 때는 많은 오차를 가지게 된다.

앞으로는 스위칭 소자에 의한 전력공급장치나 인버터의 경우처럼 높은 차수의 고조파가 포함된 경우의 실험과 해석이 이루어져야 할 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] L.S. Czarnecki & T. Swietlicki "Powers in Nonsinusoidal Networks: Their Interpretation, Analysis and Measurement." IEEE Trans. Instrum. Meas. Vol. 39, No 2, pp.340-440
- [2] I. Purkayastha & P.J. Savoie "Effect of harmonics on power measurement." IEEE Trans on Ind. Apl. vol. 26, No 5 pp.944-946, 1990
- [3] L.C. Cristaldi & A. Ferrero "Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality." IEEE Trans. Instrum. Meas. Vol. 44, No 3, pp.683-685 1995
- [4] IEEE working group on power system harmonics, "Power system harmonics: an overview" IEEE Trans. Power App. syst. Vol. PAS-102, No 8, pp.2455-2460, 1983
- [5] A.A. Girgis et al "Measurement and characterization of harmonics and high frequency distortion for a large industrial load." IEEE Trans. Power Del. Vol. PWRD-5, No 1, pp.427-434, 1990
- [6] Y. Baghzouz & O.T. Tan "Harmonic analysis of induction watt-hour meter performance." IEEE Trans. Power App. syst. Vol. PAS-104, No 2, pp.399-406, 1985
- [7] A.A. Girgis et al "Testing the performance of three-phase Induction Watt-hour Meters in the Presence of harmonic distortion." IEEE Trans. on Ind. Apl. Vol. 26, No 4, pp.689-695, 1990
- [8] S. Mukherjee & R.G. Hoft and J.A. McCORMICK "Digital measurement of the efficiency of inverter-Induction machine." IEEE Trans. on Ind. Apl. Vol. 26, No 5, pp.872-879, 1990