

유도형 적산전력량계의 토오크측정 기술

박영태, 강전홍, *장석명, *이성호
 한국표준과학연구원 전자기연구부, *충남대학교 전기공학과

Torque measuring technique of induction wattour meter.

Y.T.Park, J.H.Kang *S.M.Jang, *S.H.Lee
 KRISS, *Chungnam University

Abstract - The driving torque acting on a rotatable disk of wattour meter is proportional to the effective power. The aim of this paper is to show how the driving torque on a disk can be measured by a LVDT transducer. This driving torque is obtained by the theoretical computation. To verify the computed result, the LVDT, as torque transducer, was used. A comparison is made between computed and measured torques.

2. 유도형 적산전력량계

유도형 적산전력량계의 구조와 전기 자기회로를 그림 1에 나타내었다. 알루미늄 원판에서의 토르크는 공극 자속의 상대적인 시간 위상차에 의하여 발생하며, 공극 자속의 시간적인 위상차는 인가되는 전압과 전류원에 의존한다. 만일 공급된 전압 v_s 을 60Hz의 사인파라 하면,

$$v_s = V_s \sin \omega t \tag{1}$$

1. 서 론

적산전력량계는 구동 토오크에 의하여 회전원판을 회전시켜 사용 전기에너지 양을 측정하는 계측기이며, 전기를 사용하는 모든 곳에 반드시 설치되어 있다. 현재 가정에서 사용되는 적산전력량계의 오차는 계량법에서 2% 이내를 요구하고 있고 측정대상에 따라 오차의 크기를 다르게 정하고 있다[1, 2].

전기의 사용자나 공급자 사이에 전기에너지 사용량에 대한 요금은 적산전력량계를 통하여 이루어지고 있으므로 가능한 적산전력량계 자신에 의하여 발생하는 측정오차는 작아야한다. 이러한 측정오차를 줄이기 위한 방법을 찾기 위하여 회전판에 분포되는 와전류를 수학적으로 계산[3]하여 설계하거나, 온도, 전압, 전류, 역률등의 영향에 의한 신뢰성 프로그램[4] 등을 개발하여 오차의 요인을 줄이고 있다. 그리고 고조파가 함유된 전압과 전류에 대한 적산전력량계의 특성 등에 대한 연구가 진행되고 있으며[5-7], 특히 전류의 급격한 변화를 일으키는 소자나, 시스템에 의한 적산전력량계의 특성을 연구하고 있다[8,9].

전기에너지의 적산량은 회전원판의 구동 토오크에 비례하므로 구동토오크에 대한 해석과 실제 측정을 통하여 개선된 적산전력량계를 설계할 수 있다. 따라서 회전원판의 구동 토오크가 유효전력에 비례한다면, 원판의 회전 수는 에너지 사용량으로 나타낼 수 있다.

회전원판은 2개의 코일, 즉 측정하고자 하는 부하에 병렬로 연결된 전압코일과 직렬로 연결된 전류코일에 의하여 발생하는 자속(magnetic flux) 속에 설치되어 있어서 구동 토오크는 두 코일에서 발생하는 자속과 전도성을 가지는 회전원판에 발생된 와전류가 서로 교차함에 의하여 발생된다.

본 연구에서는 가정에서 사용되는 적산전력량계를 모델로하여 구동 토오크를 수학적으로 해석하여 그 크기를 구하였다. 그리고 토오크 트랜스듀서를 제작하여 구동 토오크를 측정하고 수학적 해석 결과와 서로 비교하였다. 토오크 트랜스듀서는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 제작하여 사용하였다.

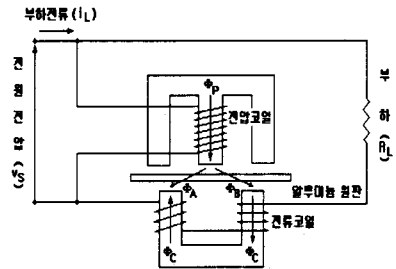


그림 1. 유도형 적산전력량계의 구조와 전기 자기회로

로 나타낸다. 전압코일의 여자전류 i_p 는 공급된 전압에 비해 α 만큼의 위상차를 갖게 되는데, 실제로 거의 90° 가 된다.

$$i_p = K_p V_s \sin(\omega t - \alpha) \tag{2}$$

여기서, K_p 는 전압코일의 어드미턴스이다. 전압코일에 의해서 발생하는 자속 ϕ_p 는

$$\phi_p = 2K_p V_s \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \tag{3}$$

로 표현되며 전류코일에 의하여 발생하는 자속 ϕ_c 는

$$\phi_c = K_c I_L \sin(\omega t - \theta_p) \tag{4}$$

로 나타낸다. 여기서 K_p 는 K_p 와 전압코일 인덕턴스를 포함하는 상수를 나타내고, θ_p 는 인가되는 전압과 전류의 위상차에 의한 부하각, K_c 는 전류코일의 인덕턴스를 포함하고, 부하전류의 함수로 실효전류 자속 ϕ_c 를 표현하는데 사용할 수 있도록 해주는 상수이다. 그리고 I_L 은 부하전류를 나타낸다.

알루미늄 원판에 유도되는 와전류 i_A 와 i_B 는 그림 1에서의 공극 자속 ϕ_A , ϕ_B 에 의해 결정된다. 이러한 네 가지 파라미터에 의해 알루미늄 원판에서의 힘을 전개할 수 있고, 토크식을 유도할 수 있다.

공극 자속 $\phi_A = \frac{\phi_p}{2} - \phi_c$ 이고, 식 (3)과 식 (4)로부터 표현되어질 수 있다. 즉,

$$\phi_A = K_p V_s \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - K_c I_L \sin(\omega t - \theta_p) \quad (5)$$

마찬가지로 공극 자속 $\phi_B = \frac{\phi_p}{2} + \phi_c$ 이므로 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_B = K_p V_s \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + K_c I_L \sin(\omega t - \theta_p) \quad (6)$$

여기서 알루미늄 원판을 쇠교하는 공극 자속에 의해 와전류의 표현식을 유도할 수 있다. 알루미늄 원판은 저항성분만 존재한다는 가정하에서 식(5)와 식(6)이 직접적으로 사용될 수 있다. 공극자속 ϕ_A 에 의해 유도되는 와전류는 두 가지 성분으로 구성되어 있다. 하나는 $\phi_p/2$ 에 의한 것이고 다른 하나는 ϕ_c 에 의한 것이다. 각각의 자속성분에 의해 유도되는 와전류는 자속에 대해 90° 만큼 위상차를 갖게 된다. 그러므로 i_A, i_B 는 다음과 같이 바꾸어 표현을 할 수가 있다.

$$i_A = K_i \sqrt{K_p^2 V_s^2 - 2K_p K_c V_s I_L \sin \theta_p + K_c^2 I_L^2} \cdot \cos(\omega t + \delta_3) \quad (7)$$

$$\text{여기서, } \delta_3 = \arctan\left[\frac{(K_p V_s - K_c I_L \sin \theta_p)}{K_c I_L \cos \theta_p}\right]$$

$$i_B = -K_i \sqrt{K_p^2 V_s^2 + 2K_p K_c V_s I_L \sin \theta_p + K_c^2 I_L^2} \cdot \cos(\omega t - \delta_4) \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \delta_4 = \arctan\left[\frac{(K_p V_s + K_c I_L \sin \theta_p)}{K_c I_L \cos \theta_p}\right]$$

를 나타낸다. 식(7)과 식(8)은 인가된 전압, 부하전류, 부하각에 의존하는 와전류의 위상과 크기를 예시한 것이다. 그림 2는 와전류의 방향과 위치를 나타내었다. 따라서 그림 2에서 힘 f_1 은 다음과 같이 구해진다.

$$f_1 = K_s (i_A \times \phi_B) \quad (9)$$

$$\frac{f_1}{K_s K_i} = [(K_c I_L \sin \theta_p - K_p V_s) \sin \omega t + (K_c I_L \cos \theta_p) \cos \omega t]$$

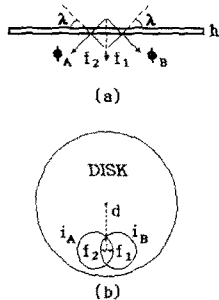


그림 2. 알루미늄 회전원판에 작용하는 힘의 방향

$$\times [(K_c I_L \cos \theta_p) \sin \omega t - (K_p V_s + K_c I_L \sin \theta_p) \cos \omega t]$$

그리고 힘 f_2 는 다음과 같다.

$$f_2 = K_s (i_B \times \phi_A) \quad (10)$$

$$\frac{f_2}{K_s} = K_i [K_p V_s \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2}\right)] + K_i [K_c I_L \sin\left(\omega t - \theta_p - \frac{\pi}{2}\right)]$$

$$\times [K_p V_s \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - K_c I_L \sin(\omega t - \theta_p)]$$

이들 두 힘 특성식으로부터 다음과같이 토오크 특성식을 유도할 수 있다.

$$\tau_1 = f_1 d$$

$$\tau_2 = f_2 d \quad (11)$$

여기서 d 는 알루미늄 원판의 중심으로부터의 거리이다. 토크 특성식은 알루미늄 원판에 대하여 수직성분과 수평성분으로 나누어 질 수 있다. 즉 ϕ_A, ϕ_B 가 같은 각으로 알루미늄 원판을 쇠교한다면 수평성분 토크는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau_{1h} = \tau_1 \cos \lambda$$

$$\tau_{2h} = \tau_2 \cos \lambda \quad (12)$$

만일 알루미늄 원판이 왼쪽에서 오른쪽으로 회전하면

$$\tau_h = \tau_{2h} - \tau_{1h}$$

$$\tau_{1h} = f_1 d \cos \lambda$$

$$\tau_{2h} = f_2 d \cos \lambda \quad (13)$$

식(9)와 식(10)을 식(13)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\tau_h = 2d \cos \lambda (K_s K_i K_p K_c) V_s I_L \cos \theta_p \quad (14)$$

따라서 식(14)는 유도형 적산전력량계를 통한 전력의 흐름에 비례하는 동일한 방향을 갖는 토크의 식을 나타내는 것이다 [10].

3. 시험 시스템 및 결과

3.1 특성실험 및 토오크측정 시스템의 구성

그림 3은 유도형 적산전력량계의 특성 및 토오크 측정용 위한 실험구성도를 나타낸 것이다. 임의의 파형발생기로부터 원하는 전압과 전류의 파형을 만들고 이 파형을 전압/전류 표준기

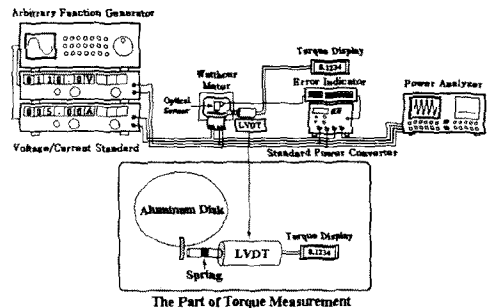


그림 3. 적산전력량계의 특성 및 토오크 측정시스템

에 의해 실효치 110[V], 5[A]로 증폭시켜 적산전력량계의 입력 전압과 부하전류로 사용한다. 임의 파형 발생기를 사용하면 전압과 전류의 위상각을 원하는 대로 가변할 수 있으므로 캐패시턴스나 인덕턴스 같은 부하를 사용하지 않고도 역률을 가변할 수 있다. 전력 변환기에서는 실효치 전압 110[V]와 전류 5[A]가 인가되면, 즉 550[W]의 전력 소비에서 9.2[kHz]의 펄스를 발생시킨다. 이 전력 변환기는 국제 비교 공인된 한국표준 과학연구원에서 개발하여 보유하고 있는 장비이다. 이 펄스와 적산전력량계의 계기정수 (본 실험에 사용된 전력량계의 계기정수는 1000 rev / 1 kWh) 와의 관계에서 적산전력량계 알루미늄 원판의 1회전당 펄스수를 산출하여 오차를 검출기에 입력한다. 1회전당 펄스 수가 오차율을 산출하는 기준이 되고 광센서를 통해 카운팅되는 펄스 수는 비교대상이 된다. 임의 파형 발생기에 의해 만들어지는 고조파 파형의 분석을 위해

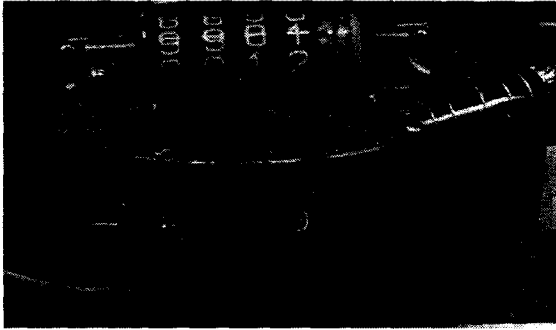


그림 4. 토오크 측정 센서와 적산전력량계

PM3300 전력분석기가 사용되었다.

적산전력량계의 토오크를 측정하기 위하여 그림 4에 나타낸 바와같이 회전원판 위에 1 mm의 가는 바늘을 설치하여 원판이 회전할 때 토오크 센서로 사용되는 LVDT를 동작시키게 하였다. 그림 4는 적산 전력량계에 LVDT를 설치한 모양을 나타내었다

3.2 토오크센서(LVDT)의 특성

토오크 측정에 사용되는 LVDT는 직경 18 mm, 길이 38 mm의 크기를 가지며, 토오크의 크기를 변위로 나타내는 가동

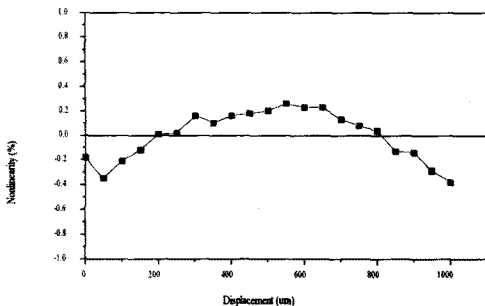


그림 5. LVDT의 비선형도

체 코어의 직경은 4.7 mm, 길이 12 mm이고 코어를 지지해주는 지지대와 움직일 수 있는 스프링으로 제작하여 사용하였다. LVDT의 1차코일에 공급되는 주파수는 2.5 kHz이고 측정 변위 범위는 최대 1 mm로 하였을 때 감도는 0.378 mV/V/mm의 특성을 가지고 있다. 그림 5는 LVDT의 변위에 대한 비선형도(non-linearity)를 나타내었다. 최대 변위범위 1 mm 안에서의 비선형도는 ± 0.4 %를 벗어나지 않았다.

3.3 이론적 결과와 실험적 결과

표 1은 계산에 의한 이론적 결과와 실험적 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 전류 5 A, 전압 110 V, 역률 1 일 때 계산에 의하여 나타나는 힘은 0.8367 N의 값을 얻었다. 그러나 토오크 센서에 의한 경우 측정되어진 값은 0.6643 N으로 나타났다. 이론적인 결과와 비교할 때 20 % 이상의 차이가 남을 알 수 있었다. 이러한 원인은 센서의 설치 방법에 의한 문제점과 이론적인 접근 방법에서의 차이등으로 생각해 볼 수 있으므로 앞으로 면밀한 검토가 더 이루어져야만 한다.

표 1. 이론값과 측정값의 비교

이론값(N)	측정값(N)
0.8367	0.6643

5. 결 론

전기에너지를 측정하는 적산전력량계는 구동 토오크에 의하여 동작된다. 본 연구에서는 가정에서 사용되는 적산전력량계를 모델로하여 구동 토오크를 수학적으로 해석하여 그 크기를 구하였다. 실제의 구동 토오크를 측정하기 위하여 토오크 트랜스듀서를 제작하여 사용하였으며 제작한 트랜스듀서는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)로 토오크의 크기를 변위로 나타낸다. LVDT의 변위에 대한 특성을 시험하고, 적산 전력량계의 회전원판의 구동 토오크를 측정하였다. 그리고 측정된 결과와 수학적 해석 결과와 서로 비교하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국공업규격, "전력량계(단독계기)", KS C 1208, 1980
- [2] Static watt-hour meters metrological specifications for classes 0.2s and 0.5s, IEC Report, Publication 687, 1980
- [3] I. Bardi and O. Biro, "Calculation of the eddy current distribution in the disk of single-phase kilowatt-hour meter by variational method," IEEE Trans. Mag. Vol. MAG-22, No. 2, pp. 113-117, 1986
- [4] J. D. Ramboz, C. P. Fenimore and B. Schiller, "Precision qualification of watt-hour meters," IEEE Trans. Instru. Meas. Vol. 40, No. 2, pp. 406-409, 1991
- [5] A. A. Girgis, T. L. Baldwin, E. B. Makram and H. S. Fortson, JR "Testing the performance of three phase induction watt-hour meters in the presence of harmonic distortion," IEEE Trans. Instru. Meas. Vol. 26, No. 4, pp. 689-695, 1990
- [6] Y. Baghzouz, O. T. Tan, "Harmonic analysis of induction watt-hour meter performance," IEEE Trans. on Pow. Appar. Sys. Vol. PAS-104, No. 2, pp. 399-406, 1985
- [7] E. F. Fuchs, D. J. Roesler, "Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of The Power System's Voltage", IEEE Trans. Vol. PWRD-2, No. 2, pp. 445-451, 1987
- [8] W. C. Downing, "Watt-hour Meter Accuracy on SCR Controlled Resistance Loads", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, July/August 1974, pp. 1083-89.
- [9] A. E. Emanuel, "Induction Watt-hour Meter Performance on Rectifier/Inverter Circuits" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 11 November, 1981.
- [10] 장석명, 서진호, 정상섭, 이성호, 박영태, "고조파 함유전력 시스템에서의 표준적산전력량계 특성해석 및 시험," 충남대학, 한국표준과학연구원공동연구보고서, 1998