

유도형 적산전력량계의 주파수 변화 특성해석

장석명, 이성호, 서진호, 정상섭, 박영태*
 충남대학교 전기공학과 한국표준과학연구원*

Analysis on Induction Watthour Meter Performance With Frequency Variation

S.M. Jang, S.H. Lee, J.H. Seo, S.S. Jeong, Y.T. Park*
 Chungnam Nat'l Univ. KRISS*

Abstract

The precise measurement of consumed power for a given time is very important in the energy management aspect. Up to days, most power meter has been used and designed for use on circuits in which the voltage and current are essentially sinusoidal.

Recently the increase of switching element in power system causes the current and voltage with harmonics. Therefore, power energy involving harmonics is supplied to the system and the error of power measurement of watthour meter is existed.

In this paper, we present a characteristic analysis by input frequency variation and analytical basis of induction watthour meter considering harmonics.

1. 서론

유도형 적산 전력량계는 가정이나 산업체에서 소비전력의 측정을 위한 주요한 설비로서 사용되어왔다. 그런데 전력시스템에는 부하에 따라 시간고조파를 함유하는 비정현적인 형태의 전력 에너지가 공급되고 있다. 전력시스템의 고조파는 전력량계에서 증가된 계측을 야기시킨다[2]. 만약 전기기기가 고조파의 영향하에서 사용된다면, 이것은 소비자가 소비한 전력량보다 더 많은 전력소비를 지불해야 한다는 것을 의미한다. 현재 상용되고 있는 일반 전력량계는 정현파 전원을 기준으로하여 전력량을 산출하고 있지만, 전력량계의 파라미터들은 고조파 함유에 따라 그 특성이 변화하므로, 이로인한 전력량 산출의 오차를 감안하여야 한다[1][2][3].

본 논문에서는 고조파 해석의 기본적 자료를 제시할 전원의 주파수 변화에 따른 유도형 적산 전력량계 특성을 해석하였다. 이는 전압, 전류의 크기가 같고 주파수만을 가변하였을 경우, 전력량계 특성의 변화에 관한 자료를 제시하는 것이다. 또한 고조파 성분을 고려한 전력량계 알루미늄 원판에서의 토크와 고조파 성분을 고려하지않은 이상적인 토크사이에서 계측 오차에 관한 이론적 해석을 검토하였다. 전압코일에 있어서의 임피던스 측정치를 해석함으로써 주파수 변화에 따른 전력량계 파라미터의 특성변화를 고려하였고, 입력전원 주파수에 따른 전력량계 계측 오차를 해석하였다. 이를 바탕으로 전원 전압 혹은 부하 전류에 고조파가 함유되었을 경우, 유도형 적산 전력량계 계측오차에 관한 이론적 토대를 마련하고자 한다.

2. 특성 해석

2.1. 해석모델

유도형 적산 전력량계의 기본적인 자기회로 구조는 그림 1과 같다. 전압코일의 턴수는 전류코일의 턴수에 비해 상대적으로 많으며, 코일의 단면적은 더 작다. 그러므로 전압코일의 저항 및 인덕턴스는 전류코일에 비해 크다. 즉, 전압코일 임피던스의 크기가 전류코일에 비해 매우 크다. 전압 코일에 전원전압(v_s)이 인가되면, 전압코일 임피던스에 따라 전류성분으로 바뀌고 이 전류는 자속 Φ_s 를 발생시킨다. 전류코일에 부하전류(i_L)가 흐르게 되면, 이 전류에 의해 자속 Φ_c 가 발생하게 된다. 자속 Φ_s 와 Φ_c 에 의해 공극에서는 Φ_A 와 Φ_B 의 합성 자속이 발생하게 된다. 입력전압과 부하전류가 고조파성분을 함유하게 되면 전압·전류코일의 임피던스와 알루미늄 원판의 임피던스가 변하게 된다. 그러므로 정현파인 경우와는 발생자속이 다르며, 해석에서도 차이를 두어야 한다[1][2][3].

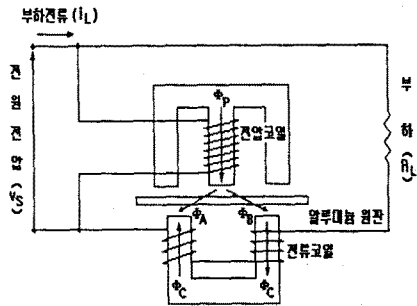


그림 1. 유도형 적산전력량계의 자기회로 구조

그림 2는 그림 1의 전압코일과 전류코일이 모두 여자된 경우, 자속의 분포를 나타낸 것이다. 이 때의 입력전압은 110[V], 부하 전류는 5[A], 주파수는 60 [Hz]이다. 그림 3은 입력전압은 110[V], 부하전류는 5[A], 주파수는 360 [Hz]인 경우, 자속의 분포를 나타낸 것이다. 그림 2와 그림 3을 비교하여 보면 입력전원의 주파수 변화에 따라 발생자속이 달라지는 것을 알 수 있다. 이는 발생자속의 크기면에서 차이가 발생하는 것을 나타낸다.

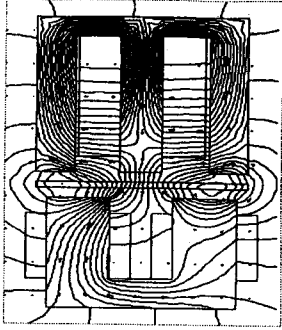


그림 2. 전압·전류코일의 여자에 의한 자속분포
입력전원 주파수 60 [Hz]

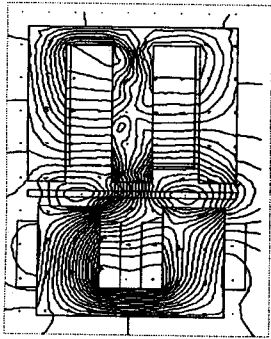


그림 3. 전압·전류코일의 여자에 의한 자속분포
입력전원 주파수 360 [Hz]

2.2 고조파성분을 고려한 전력량계의 토크 특성식

그림 1에서의 전원전압과 부하전류의 표현식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_k(t) = V_{mk} \cos(\omega_k t + \theta_{vk}) \quad (1)$$

$$i_k(t) = I_{mk} \cos(\omega_k t + \theta_{ik}) \quad (2)$$

여기서, ω_k 는 k번째 고조파에서 각주파수를 나타낸다.

이로부터 전압파형에 기인한 총 자속 $\Phi_v(t)$ 와 전류파형에 기인한 총 자속 $\Phi_i(t)$ 를 구하고, 포화를 고려한 공극에서의 실효 자속을 구한다[1][2][3]. 이러한 실효자속은 알루미늄 원판에 기전력을 유도하고, 디스크 임피던스에 따라 와전류 i_{dv}, i_{di} 를 흐르게 한다. 일반적인 전력량계 토크 특성식인 식 (3)으로부터 알루미늄 원판에서의 토크식을 산출할 수 있다.

$$\tau_d = \frac{1}{T} \int_0^T [\Phi_v(t) \cdot i_{di}(t) - \Phi_i(t) \cdot i_{dv}(t)] dt \quad (3)$$

여기서 T 는 주기를 나타낸다.

식 (3)으로부터 고조파성분을 고려한 적산 전력량계의 토크식은 식 (4)와 같이 구할 수 있다[1].

$$T_{dk} = \sum_{k=1}^{NH} \frac{1}{T} \int_0^T [C_i C_v V_{mk}'' \cos(\omega_k t + \theta_{vk}' - \alpha_{vk}) \times \frac{\omega_k I_{mk}' \sin(\omega_k t + \theta_{ik}' - \alpha_{dk})}{R_{dk} \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_k L_{dk}}{R_{dk}}\right)^2}} - C_i C_v I_{mk}' \cos(\omega_k t + \theta_{ik}') \times \frac{\omega_k V_{mk}'' \sin(\omega_k t + \theta_{vk}' - \alpha_{vk} - \alpha_{dk})}{R_{dk} \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_k L_{dk}}{R_{dk}}\right)^2}}] dt \quad (4)$$

여기서, C_i 와 C_v 는 각각 전압과 전류코일에 기인한 자속의 비례상수, V_{mk}' , I_{mk}' , θ_{vk}' , θ_{ik}' 는 비선형성을 고려한 k 번째 고조파에서의 전압과 전류의 크기와 위상각, Z_{dk} 는 k번째 고조파에서 전압코일 임피던스, $V_{mk}'' = \frac{V_{mk}'}{Z_{dk}}$ 으로 정의된다. α_{vk} 는 k번째 고조파에서의 전압코일 임피던스에 기인한 위상각, α_{dk} 는 k번째 고조파에서 알루미늄 원판 임피던스의 위상각, R_{dk} 와 L_{dk} 는 k번째 고조파에서의 알루미늄 원판 저항과 인덕턴스이다.

유도형 적산 전력량계의 이상적인 토크식을 산출하기 위해서는 다음과 같은 가정이 선행되어야 한다.

- 1) 전압코일 임피던스는 인덕턴스 성분만 고려되어지고, 전류코일에 의한 자속은 전류와 동상이다.
- 2) 디스크 임피던스는 저항성분만 고려된다.
- 3) 포화는 무시되어진다.

위의 가정에 따라 구해진 이상적인 토크식은 다음과 같다[1].

$$T_{dk} = \sum_{k=1}^{NH} \frac{\omega_k C_i C_v I_{mk}' V_{mk}' \sin \theta_{dk}}{R_{dk}} \quad (5)$$

여기서, $\theta_{dk} = \theta_{vk} + \theta_{ik} + \alpha_{dk}$

위에서 구해진 식 (4)와 식 (5)로부터 전력량계 계측 오차율의 표현식을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\%E(\text{오차율}) = \frac{T_{dk} - T_{dk}'}{T_{dk}'} \times 100 \quad (6)$$

2.3 입력 주파수 변화에 따른 특성해석

그림 4와 그림 5는 주파수 변화에 따른 전압코일에서의 저항과 인덕턴스의 변화를 나타낸 것이다. 전압코일의 임피던스 변화는 전력량계 고조파 해석에 중요한 영향을 미친다. 주파수의 증가에 따라 저항은 증가하고 인덕턴스는 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 결과의 원인은 전압코일 철심에서 유도된 와전류에 의한 영향과 포피효과에 기인하는 것으로 추정된다. 전류코일의 임피던스 변화는 전압코일의 변화에 비해 무시되어질 수 있을 만큼 작다.

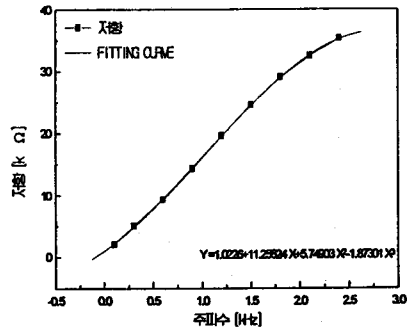


그림 4. 전압코일의 주파수에 따른 저항변화

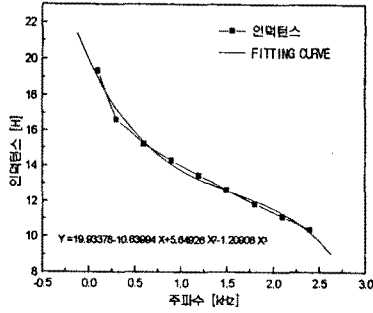


그림 5. 전압코일의 주파수에 따른 인덕턴스 변화

그림 6는 입력전원의 주파수 변화에 따른 디스크에서의 와전류 밀도 분포를 나타낸 것이다. 입력 전원의 주파수가 증가할수록 와전류의 값이 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 주파수가 높아질수록 자속이 원판을 채워하면서 유도되는 와전류에 의해 자속이 감소되고, 이에 따라 저항은 증가하고 인덕턴스는 감소하는 알루미늄 원판 임피던스의 변화의 결과라 하겠다.

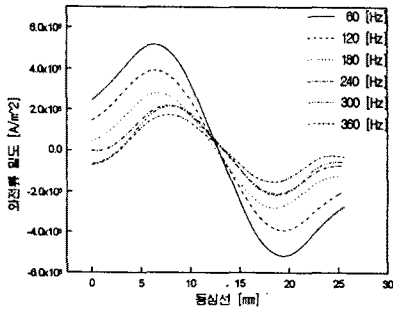


그림 6. 입력 주파수에 가변에 따라 알루미늄 원판에 유기된 와전류 밀도 분포

그림 7은 유한요소 해석을 통해 입력전원의 주파수 변화에 따른 유도형 직산 전력량계의 계측의 오차를 나타낸 것이다. 이러한 결과는 전압·전류코일에 의해 만들어진 자속이 알루미늄 디스크를 채워하면서 유도된 와전류에 의한 영향과 주파수에 따른 알루미늄 원판 임피던스의 변화에 기인한 것이라 하겠다.

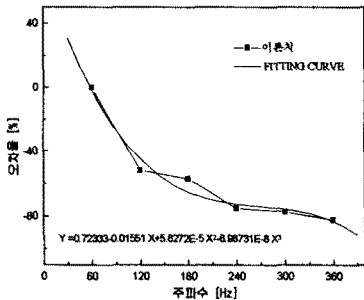


그림 7. 입력전원 주파수에 따른 전력량계 계측 오차율

3. 결론

전압과 전류 파형에서의 고조파의 존재는 알루미늄 원판의 회전속도의 증가를 초래하게 되고, 전력량 산출의 오차를 가져온다[2].

본 논문에서는 고조파 함유에 따른 유도형 직산 전력량계 해석을 위한 기본적인 이론을 검토하였다. 그리고 고조파 해석의 기초가 될 주파수에 따른 전압코일 임피던스의 변화, 입력전원 주파수에 따른 알루미늄 원판에 유기된 와전류 밀도 분포, 입력전원 주파수에 따른 전력량계 계측 오차율등의 자료를 제시하였다. 주파수에 따른 유도형 직산 전력량계의 특성을 해석한 결과, 알루미늄 원판의 임피던스와 토크등이 변화함을 확인하였다. 본 논문에서의 결과들은 고조파 성분이 함유되었을 경우, 전력량계 특성해석에 대한 기본적인 자료를 제공할 것이다. 향후 이론적 해석을 통한 결과와 실제 실험을 통한 결과의 비교 분석 및 각각의 고조파 차수에서 크기와 위상각에 따른 계측 오차율에 관한 연구가 진행될 것이다. 이를 바탕으로 고조파 함유에 따른 유도형 직산 전력량계 특성해석의 토대를 마련하고자 한다.

참고 문헌

- [1] E.B. Makran, C.L. Wright, A.A. Girgis, "A Harmonic Analysis of The Induction Watthour Meter's Registration Error", IEEE Trans. Vol. 7. No. 3. July 1992
- [2] E.F. Fuchs, D.J. Roeslerr, "Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of The Power System's Voltage", IEEE Trans. Vol. PWRD-2, No. 2, April 1987
- [3] Y. Baghzouz, O.T. Tan, "Harmonic Analysis of Induction Watthour Meter Performance", IEEE Trans, Vol. PAS-104, No. 2, February 1985
- [4] H.E.M. Barlow, "Travelling-field theory of induction-type instruments and motors", Proc. Inst. Elec. Eng, Vol. 112, No. 1208-1214, June 1965
- [5] R.R. Sherburne, "Driving torque equations for the watthour meter based on the ferraris principle", IEEE Trans, Vol. PAS-90, No. 1, January 1971