

매입형 영구자석 동기전동기의 인덕턴스 계측

이정흠*, 최창호*, 김영석**, 김민규*, 왕효진*, 김윤현*
 *(주) 포스콘, **인하대 전기공학과

Inductance Measurement Method of an IPMSM

*Jeong-Hum Lee, *Chang-Ho Choi, **Young-Seok Kim, *Min-Kyu Kim,
 *Hyo-Jin Wang, *Yun-Hyun Kim
 *POSCON Corporation, **Dept. of Electrical Engineering of Inha University

ABSTRACT

An interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) is receiving increased attention for many industrial applications because of its high torque to inertia ratio, superior power density, and high efficiency. IPMSM is necessary to use the accurate information of the inductance for the precise torque control owing to the reluctance torque.

This paper presents two method to measure the each-axis inductance. The first method uses the peak current that is measured by applying the pulsewise voltage on the each position of IPMSM. The second uses the hysteresis loop of the flux and current measured by applying the positive and negative pulsewise voltage alternately on the each-axis.

1. 서 론

최근 산업분야의 각종 기계 및 플랜트에 있어서 정밀한 속도제어·위치제어나 급가감속 운전 등을 필요로 하는 가변속 구동 시스템에 유도전동기 벡터제어가 적용되고 있다. 그러나 유도전동기는 역률과 효율이 낮아 에너지 절약효과를 보다 높이고 장치의 소형·경량화를 위해 영구자석 동기전동기(PMSM)가 유도전동기를 대체해 가고 있다. 자동차에 본격적으로 PMSM이 사용되면 그 물량은 산업용에 비할 수 없이 압도적일 것이기 때문에 PMSM이 가격이 낮아 질 것으로 기대되고 PMSM의 가변속 구동 시스템은 더욱 활발히 사용되리라 생각된다.

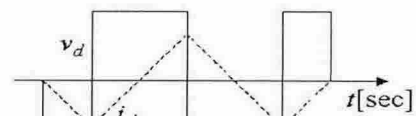
PMSM의 속도 및 위치 제어 알고리즘은 기본적으로 d-q 모델 상에서 전압방정식으로부터 도출되기 때문에 PMSM의 모델이 정확한지 아닌지가 제어의 정도를 결정하는 중요한 요인이 된다. 따라서 PMSM의 파라미터를 정확하게 파악할 필요가 있다. 그러나 전동기 파라미터의 카탈로그 상의 값은 대체로 10%정도의 오차를 가지고 있다고 볼 수 있다. 그러므로 PMSM의 파라미터를 정확히 계측하는 방법을 연구개발 할 필요가 있다.

본 논문에서는 PMSM의 인덕턴스를 두가지 방법으로 계측하는 실험을 하였으며 PMSM의 구동을 통해 특성을 비교하였다.

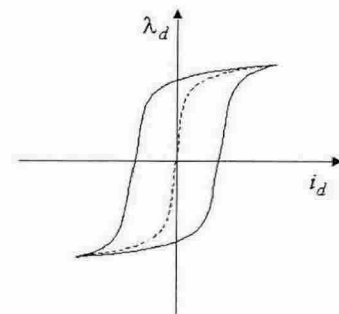
2. 본 론

2.1 인덕턴스 계측 - 방법 1

그림1(a)에 보여진 것처럼 q축전압 v_q 를 0으로하고, d축에 펄스전압을 인가하면, 그림1(a)의 d축전류 i_d 가 흐른다. d축 펄스실험 중에 계측한 d축전압 v_d 를 적분해 d축 쇄교자속 λ_d 를 구하고, λ_d 와 계측된 d축전류 i_d 와의 관계를 나타낸 것이 그림1(b)의 실선이다. d축 쇄교자속 λ_d 와 d축 전류 i_d 와의 관계는 히스테리시스를 나타내므로, 히스테리시스의 평균이 되는 점선의 곡선을 구하여, 점선으로 나타난 곡선의 원점의 기울기에서 d축 인덕턴스 L_{d0} 를 구하고 d축전류 i_d 의 크기에 따른 d축 인덕턴스의 감소율 D_{Ld} 를 구한다.



(a) d축에 펄스전압 인가시 전류응답



(b) d축 전류와 쇄교자속

그림1 d축 인덕턴스 계측 실험

q축 펄스실험도 마찬가지로 d축전압 v_d 는 0으로하고, q축에 펄스전압을 인가하여 q축 인덕턴스 L_q 와 q축 인덕턴스의 감소율 D_{Lq} 를 구한다.

위에서 구한 인덕턴스 L_d , L_q 와 인덕턴스의 감소율 D_{Ld} , D_{Lq} 을 이용해 각 d, q축 전류 i_d , i_q 의 크기에 따라 인덕턴스 L_d , L_q 를 연산한다.

2.2 인덕턴스 계측 - 방법 2

매입형 PMSM의 해석모델에서 u 상 방향을 α_u 축, 이와 수직인 방향을 β_u 축으로 정의한 $\alpha_u - \beta_u$ 축 상에서, 회전자 위치 θ , 회전속도 ω 인 전압방정식은 다음 식으로 나타내진다.

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha u} \\ v_{\beta u} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{\alpha u} \\ i_{\beta u} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_1 + L_2 \cos 2\theta & L_2 \sin 2\theta \\ L_2 \sin 2\theta & L_1 - L_2 \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha u} \\ i_{\beta u} \end{bmatrix} + \Phi_0 \omega \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, L_d : d축 인덕턴스

L_q : q축 인덕턴스

R : 권선저항

Φ_0 : 속도 기전력 상수

$$L_1 = \frac{L_d + L_q}{2}, L_2 = \frac{L_d - L_q}{2} \quad (2)$$

본 인덕턴스 계측 알고리즘에서는 펄스전압을 인가하고, 전류를 급변시키는 방법을 사용한다. 하나의 펄스전압으로 $v(100)$ 을 인가할 경우, $\alpha_u - \beta_u$ 축 상에서

$[v_{\alpha u} \ v_{\beta u}]^T = [\sqrt{2/3} V_{dc} \ 0]^T$ 이며, 모터정지 ($\omega=0$) 시에 초기전류 0인 상태에서 ($[i_{\alpha u}(0) \ i_{\beta u}(0)]^T = [0 \ 0]^T$)의 하에서 전압벡터 $v(100)$ 의 인가시간이 T_s 만큼 일 때, d, q축 시정수 L_d/R , L_q/R 에 비해 전압벡터 인가시간 T_s 는 짧다고 하면, 전류 $i_u(T_s) = [i_{\alpha u}(T_s) \ i_{\beta u}(T_s)]^T$ 는 식(1)로부터, $R \approx 0$ 근사를 이용하면, 식(3)으로 얻어진다.

$$\begin{aligned} i_u(T_s) &= \begin{bmatrix} i_{\alpha u}(T_s) \\ i_{\beta u}(T_s) \end{bmatrix} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{DC}}{R} \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{2} (e^{-\frac{R}{L_q} T_s} + e^{-\frac{R}{L_d} T_s}) + \frac{1}{2} (e^{-\frac{R}{L_q} T_s} - e^{-\frac{R}{L_d} T_s}) \cos 2\theta \\ \frac{1}{2} (e^{-\frac{R}{L_q} T_s} - e^{-\frac{R}{L_d} T_s}) \sin 2\theta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} I_1 + I_2 \cos 2\theta \\ I_2 \sin 2\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3/2} i_u \\ 1/\sqrt{2} (i_v - i_w) \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} T_s \frac{L_q + L_d}{2L_d L_q}, I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} T_s \frac{L_q - L_d}{2L_d L_q} \quad (4)$$

여기서, I_1 : 검출전류 $i_{\alpha u}$ 의 직류성분

I_2 : $i_{\alpha u}$, $i_{\beta u}$ 의 교류성분의 진폭

식(4)로부터 I_1 , I_2 는 위치에 관계없이 직류전압 V_{dc} , 전압인가 시간 T_s 및 $d-q$ 축 인덕턴스 L_d , L_q 에 의해 정해지며, 이로부터 L_d , L_q 는 다음 식으로 나타내진다.

$$L_d = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \frac{T_s}{I_1 + I_2}, L_q = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \frac{T_s}{I_1 - I_2} \quad (5)$$

2.3 실험 결과

2.3.1 인덕턴스 계측 - 방법 1

본 인덕턴스 계측 알고리즘은 반복펄스전압을 인가해 전류의 크기에 따라 인덕턴스를 계측하는 방법이다. 그림2는 d축에 인가한 반복 펄스전압이고, 그림3은 이 전압에 의한 u 상 전류를 나타낸다. 계측한 u 상 전류에 $\sqrt{3/2}$ 를 곱하여, d축 전류를 계측한다.

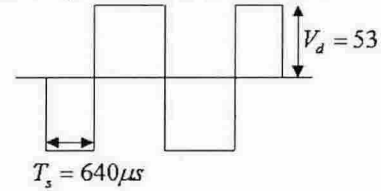


그림2 d축에 인가된 반복펄스전압

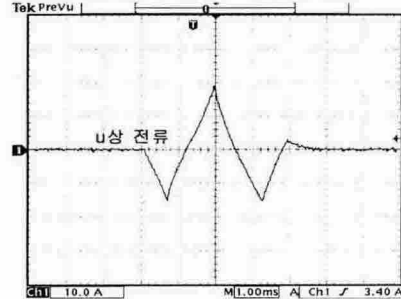


그림3 d축 반복펄스 전압 인가시 응답전류

이때, 계측한 d축 전압을 적분하여, d축 쇄교자속 λ_d 를 구하고, d축 전류 i_d 와의 관계를 나타내면, 그림4와 같은 히스테리시스의 관계를 나타낸다.

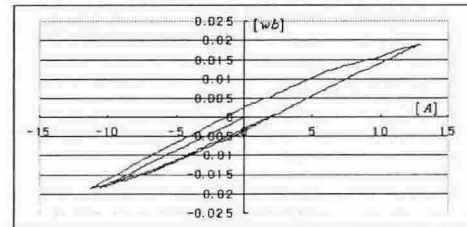


그림4 d축 전류에 대한 d축 쇄교자속

히스테리시스의 평균이 되는 점의 원점으로부터의 기울기를 구하여 L_d 의 값을 구하고 같은 방법으로 L_q 의 값을 구한다.

2.3.2 인덕턴스 계측 - 방법 2

본 인덕턴스 계측 알고리즘에서는 58[μs]동안, 진폭 308[V]인 단 파장의 펄스전압을 인가하고 전류를 급변시키는 방법을 사용하였다. 전압벡터 $v(100)$ 를 인가하여 각 축에 대한 전류의 피크치 i_{au} , $i_{\beta u}$ 를 검출하였다. 전압벡터 $v(100)$ 을 인가했을 때, u상 전류의 파형을 그림5에 보였다.

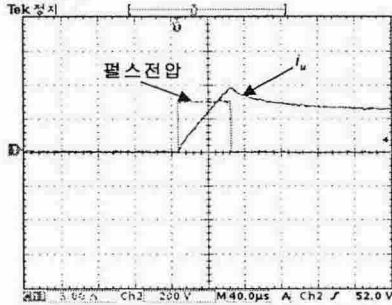


그림5 d축 펄스전압 인가시 응답전류

그림6은 L_d 과 L_q 를 계측하기 위해, 0°에서 360°까지 45°간격으로 회전자 위치를 이동시키면서 i_{au} , $i_{\beta u}$ 를 검출하여 I_1 과 I_2 를 결정하고, 이를 표1의 1회에 대한 측정치로 하였다.

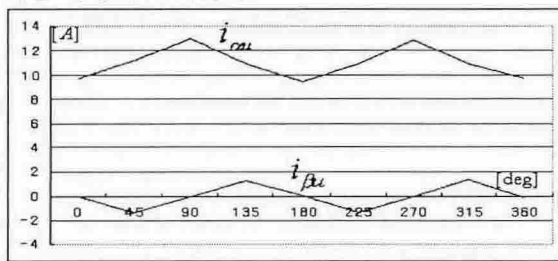


그림6 회전자 위치에 따른 각 축전류의 피크치

표1은 실험시 검출된 I_1 , I_2 를 이용하여 계측한 L_q , L_d 의 값을 나타내었으며, 계측의 정확도를 높이기 위해 10회의 반복실험을 수행하였고, 반복 수행한 값의 평균치를 인덕턴스의 계측치로 하였다.

표1 인덕턴스의 계측결과

횟수	I_1 [A]	I_2 [A]	L_q [H]	L_d [H]
1	11.3493	1.510521	0.001134	0.001482
2	11.17239	1.484924	0.001152	0.001506
3	11.21322	1.484924	0.001149	0.001499
4	11.17239	1.626345	0.00114	0.001528
5	11.07714	1.697056	0.001142	0.001555
6	11.186	1.626345	0.001138	0.001526
7	11.22683	1.555635	0.001141	0.001508
8	11.13157	1.555635	0.00115	0.001523
9	11.21322	1.626345	0.001136	0.001521
10	11.09075	1.484924	0.00116	0.001518
평균			0.001144	0.001517

2.3.3 계측한 두 인덕턴스의 구동 특성

그림 7과 8은 첫 번째 방법과 두 번째 방법으로 계측한 인덕턴스를 이용해 IPMSM을 구동했을시의 토크 및 속도 파형을 나타낸다. 구동하고 약 3초후 정상상태에서 스태부하(4.5Nm)를 인가하고 약 8초후에 정역운전을 하였으며 속도에 대한 증축의 단위는 500[rpm/div]이다.

그림7과 8의 토크 파형을 통해 전류에 따라 인덕턴스 값이 변하는 첫 번째 방법이 부하 인가시의 정상상태 뿐만 아니라 속도가 급변하는 정역운전시에도 토크가 안정적으로 발생함을 알 수 있다.

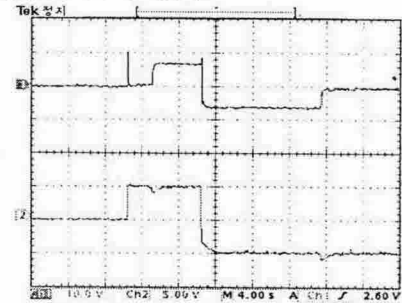


그림7 방법1로 계측한 인덕턴스 구동특성 토크(상) 및 속도(하) 파형

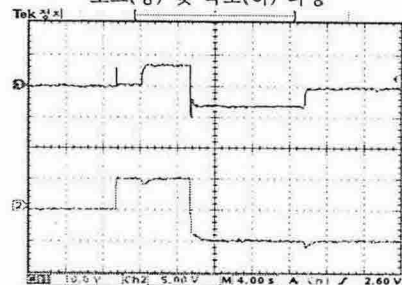


그림8 방법2로 계측한 인덕턴스 구동특성 토크(상) 및 속도(하) 파형

3. 결론

본 논문에서는 IPMSM의 인덕턴스를 두가지 방법으로 계측하는 실험을 하였으며 IPMSM의 구동을 통해 특성을 비교하였다. 첫 번째 방법은 IPMSM의 각 축에 반복되는 펄스 전압을 인가해 발생하는 전류와 쇠교자속의 히스테리시스 곡선을 이용하는 방법이고 두 번째는 IPMSM의 각 회전자 위치에 펄스전압을 인가하고 이로 인해 발생하는 피크전류를 이용하여 인덕턴스를 구하는 방법이다.

실험 결과 전류의 크기에 따라 인덕턴스 값이 변하는 첫 번째 방법이 두 번째 방법에 비해 토크를 안정적으로 발생함을 확인하였고 더 정확한 인덕턴스 계측 방법임을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] T. Takeshita, A. Usui, A. Sumiya and N. Matsui "Parameter Measurement of Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor" IEE Japan, vol.119-D, pp.1184-1191, 1999.
- [2] B. Zhang, M.H. Pong, "Maximum torque control and vector control of permanent magnet synchronous motor", 1997 International Conference on, vol.2, pp. 548-552, 1997.
- [3] M.F. Rahman, L. Zhang, K.W. Lim, "A direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive incorporating field weakening", IAS'97, vol.1, pp.67-74, 1997
- [4] The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan, vol.121, no.7, pp.448-449, 2001.
- [5] Shigenori Hagiwara, Yoichi Ohmori, Hirokazu Kobayashi, "Identification Methods for Permanent Magnet Motor's parameters", 平成12年電氣學會産業應用部門大會, pp.175-178, 平成12年.