

매입형 영구자석 동기전동기의 인덕턴스 계측에 관한 연구

이정훈*, 김영석*, 정우택*, 김대현*, 최양광*
*인하대학교 전기공학과

A study of the inductance measurement of an interior permanent magnet synchronous motor

*Jeong-Hum Lee, *Young-Seok Kim, *Woo-Taik Joung, *Dai-Hyun Kim, *Yang-Kwang Choi
* 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 methods 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 프랜트에 있어서 정밀한 속도제어·위치제어나 급가감속 운전 등을 필요로 하는 가변속 구동 시스템에 유도전동기 벡터제어가 적용되고 있다. 전동기의 가변속 구동은 성능향상, 기능의 확대뿐만 아니라 에너지 절약도 중요한 목적 중에 하나이다. 이러한 에너지 절약을 목적으로 건물이나 가정에서 사용되는 전기기에 이르기까지 가변속 구동이 적용되고 있다. 그러나 유도전동기는 역률과 효율이 낮아 에너지 절약효과를 보다 높이고 장치의 소형·경량화를 위해 영구자석 동기전동기(PMSM)가 유도전동기를 대체해 가고 있다. 또한 대기오염 방지와 에너지절약 측면에서 하이브리드 카와 전기자동차가 각광을 받고 있는 것은 주지의 사실이다. 그러한 용도로 PMSM이 사용될 것이 거의 확실시 되고 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 연구개발할 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

매입형 PMSM의 해석모델에서 *u*상 방향을 α_u 축, *v*와 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

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{L_d + L_q}{2} \\ L_2 &= \frac{L_d - L_q}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

본 인덕턴스 계측알고리즘에서는 펄스전압을 인가하고, 전류를 급변시키는 방법을 사용한다. 하나의 펄스전압으로 $v(100)$ 을 인가할 경우, $\alpha_u - \beta_u$ 축상에서 $[v_{\alpha u} \ v_{\beta u}]^T = [\sqrt{2/3} V_{dc} \ 0]^T$ 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.

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

$$I_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} T_s \frac{L_q + L_d}{2L_d L_q}$$

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

여기서, I_1 : 검출전류 i_{au} 의 직류성분
 I_2 : i_{au} , $i_{\beta u}$ 의 교류성분의 진폭

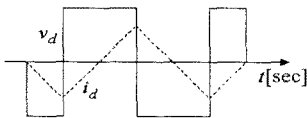
식(4)로부터 I_1 , I_2 는 위치에 관계없이 직류전압 V_{dc} , 전압인가 시간 T_s 및 d - q 축 인덕턴스 L_d , L_q 에 의해 정해지며, 이로부터 L_d , L_q 는 다음식으로 나타내진다.

$$L_d = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \frac{T_s}{I_1 + I_2}$$

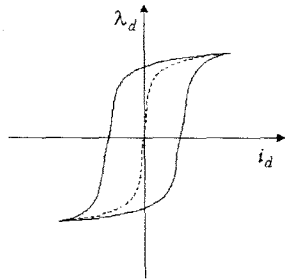
$$L_q = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \frac{T_s}{I_1 - I_2} \quad (5)$$

2.2 인덕턴스 계측 - 방법 2

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



(a) d 축에 펄스전압 인가시 전류응답



(b) d 축 전류와 쇄교자속

그림 1. d 축 인덕턴스 계측 실험

q 축 펄스실험도 마찬가지로 d 축전압 v_d 는 0으로하고, q 축에 펄스전압을 인가하여 q 축 인덕턴스 L_{q0} 와 q 축 인덕턴스의 감소율 D_{Lq} 를 구한다.

위에서 구한 인덕턴스 L_{d0} , L_{q0} 와 인덕턴스의 감소율 D_{Ld} , D_{Lq} 을 이용해 각 d , q 축 전류 i_d , i_q 의 크기에 따라 인덕턴스 L_d , L_q 를 연산한다.

2.3 실험 결과

2.3.1 인덕턴스 계측 - 방법 1

본 인덕턴스 계측 알고리즘에서는 $58[\mu s]$ 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 검출하였으며, 그림6-1-6에 보여진 알고리즘으로 수행되었다. 전압벡터 $v(100)$ 을 인가했을 때, u 상 전류의 파형을 그림2에 보였다.

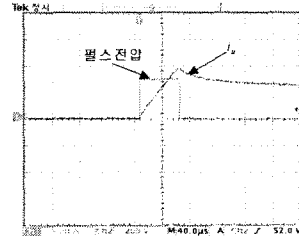


그림 2. d 축 펄스전압 인가시 응답전류

그림3은 L_d 과 L_q 를 계측하기 위해, 0° 에서 360° 까지 45° 간격으로 회전자의 위치를 이동시키면서 i_{au} , $i_{\beta u}$ 를 검출하여 I_1 과 I_2 를 결정하고, 이를 표1의 1회에 대한 측정치로 하였다.

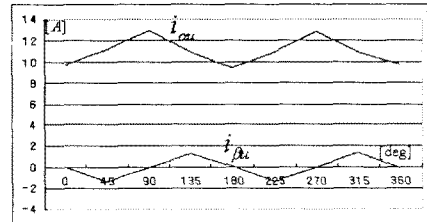


그림 3. 회전자의 위치에 따른 각 축전류의 피크치

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.

표 1. 인덕턴스의 계측결과

횟수	I1 [A]	I2 [A]	Lq [H]	Ld [H]
1	11.3493	1.510521	0.001134	0.001482
2	11.17239	1.484924	0.001152	0.001506
3	11.21322	1.494924	0.001149	0.001499
4	11.17239	1.526345	0.00114	0.001528
5	11.07714	1.597056	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	1.526345	0.001136	0.001521
10	11.09075	1.484924	0.001116	0.001518
평균			0.001144	0.001517

2.3.2 인덕턴스 계측 - 방법 2

본 인덕턴스 계측 알고리즘은 반복펄스전압을 인가해 전류의 크기에 따라 인덕턴스를 계측하는 방법이다. 그림4는 d 축에 인가한 반복 펄스전압이고, 그림5는 이 전압에 의한 u 상 전류를 나타낸다. 계측한 u 상 전류를 $\sqrt{3}/2$ 를 곱하여, d 축 전류를 계측한다.

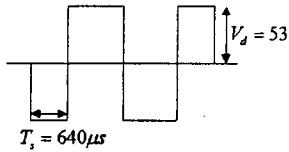


그림 4. d축에 인가된 반복펄스전압

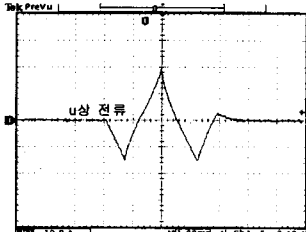


그림 5. d축 반복펄스 전압 인가시 응답전류

이때, 계측한 d축 전압을 적분하여, d축 쇄교자속 λ_d 를 구하고, d축 전류 i_d 와의 관계를 나타내면, 그림6과 같이 히스테리시스의 관계를 나타낸다.

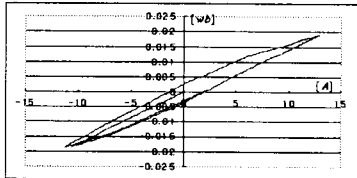


그림 6. d축 전류에 대한 d축 쇄교자속

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

2.3.3 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 스텝부하(4.5Nm)를 인가하고 약 8초후에 정역운전을 하였으며 속도에 대한 중축의 단위는 500[rpm/div]이다.

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

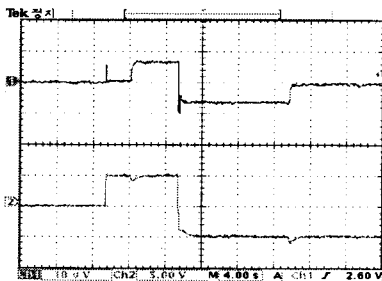


그림 7. 방법1의 인덕턴스 구동특성 토크(상) 및 속도(하) 파형

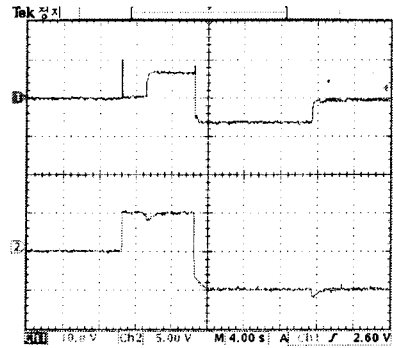


그림 8. 방법2의 인덕턴스 구동특성 토크(상) 및 속도(하) 파형

3. 결 론

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

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

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2003-041-D00243)

[참 고 문 헌]

- [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.