

파라미터 동정과 순시무효전력을 이용한 IPMSM 센서리스 제어

김원석*, 이 형, 김영석
*인하대학교 전기공학과

IPMSM Sensorless control Based on Parameter Identification and Instantaneous Reactive Power

*Won-Suk Kim, Hyung-Lee, Young-Seok Kim
* Dept. of Electrical Engineering of Inha University

Abstract - IPMSM is necessary to use the accurate values of the inductance for the precise torque control, because of using the reluctance torque of the IPM. This paper presents method to use the hysteresis loop inclination of the flux and current measured by applying the positive and negative voltage pulse alternately on the each-axis.

Moreover, presents algorithm for speed sensorless control based on parameter identification and instantaneous reactive power.

1. 서 론

최근, 환경문제와 소형, 경량화를 위해 PMSM이 급속히 보급되고 있다. 특히 IPMSM은 PMSM과는 다르게 d-q 축 인덕턴스값이 상이하며, 이로인한 고효율, 고신뢰성, 높은토크등의 장점을 가지고 있으며, 에너지절약 측면에서도 하이브리드 카와 전기자동차가 각광을 받고 있어 이러한 용도로 IPMSM의 가변속 구동 시스템이 더욱 활발히 사용될 것이다. IPMSM은 회전자에 부착되어진 영구자석으로부터 자속을 공급받기 때문에 원활한 토크 제어를 위해서는 회전자의 정확한 위치 정보를 갖고 전류 제어를 해야만 한다. 정확한 위치정보를 얻기 위해서는 회전자에 전자식 위치 검출기를 부착해야하나 가격이 높고 크기의 증대 및 가공성 저하의 문제가 발생하게 되는 단점이 있다. 따라서 속도 및 위치 센서리스 제어에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다. 또한 IPMSM의 제어 알고리즘은 기본적으로 d-q 모델 상에서 전압방정식으로부터 도출되기 때문에 IPMSM 모델의 정확성이 제어의 정도를 결정하는 중요한 요인이 된다. 이러한 이유로 IPMSM의 파라미터를 정확하게 파악할 필요가 있다.

따라서, 본 논문에서는 IPMSM의 센서리스제어를 위해 선행되어야 할 파라미터 측정에 있어 히스테리시스 곡선상 기울기 변화에 따른 구간별 전류값에 따른 자속을 각각 구하여 인덕턴스값을 동정하였고, 그 변화하는 파라미터 수치를 적용한 관측기를 구성하였다. 그리고 순시무효전력을 이용한 속도 보상 센서리스제어를 수행하였고, 실제 구동을 통하여 정확성을 증명하였다.

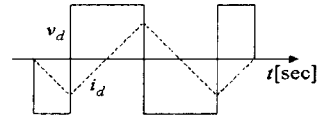
2. 본 론

2.1 인덕턴스 동정

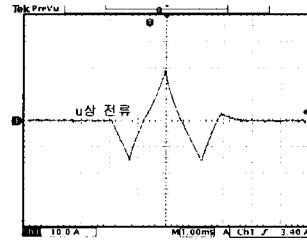
기존의 파라미터 측정을 살펴보면 그림1(a)의 q축전압 v_q 를 0으로하고, d축에 펄스전압을 인가하면, 그림1(a)의 i_d 가 흐른다.

d축 펄스실험 중에 계측한 v_d 를 적분해 d축 쇠교자속 λ_d 를 구하고, λ_d 와 계측된 i_d 와의 관계를 나타낸 것이

그림2(a)의 실선이다. 기존에 λ_d 와 i_d 의 관계는 히스테리시스를 나타내므로, 히스테리시스의 평균이 되는 점선의 곡선을 구하여, 점선으로 나타난 곡선의 원점의 기울기에서 d축 인덕턴스 L_{d0} 를 구하고 i_d 의 크기에 따른 d축 인덕턴스의 감소율 D_{Ld} 를 구했다.

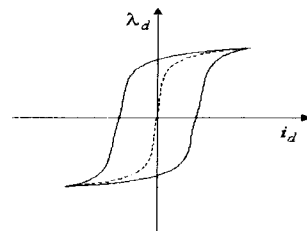


(a) d축에 펄스전압 인가시 전류응답

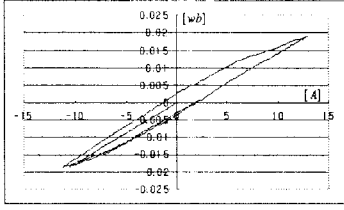


(b) 실제 반복펄스 전압 인가시 응답전류파형 <그림1> d축 인덕턴스 계측 실험

q축 펄스실험도 마찬가지로 v_d 는 0으로 하고, q축에 펄스전압을 인가하여 L_{q0} 와 D_{Lq} 를 구한다. 위에서 구한 인덕턴스 L_{d0} , L_{q0} 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. 실제 d축에 펄스전압을 인가한 후 λ_d 와 i_d 의 관계를 나타내면 그림2(b)와 같다.



(a) d축 전류와 쇠교자속



(b) 실제 d축 전류, 자속 관계
 <그림2> d축 전류에 대한 d축 쇠교자속

본 연구에서는 파라미터 계측시 발생하는 오차를 줄이기 위해 그림2에서 나타난 히스테리시스 곡선을 이용하여 구간별 변화하는 인덕턴스 감소율 D_{Ld} , D_{Lq} 를 세분화하여 각각의 전류와 감소율에 따른 인덕턴스값 L_d , L_q 를 구하였고 이에 따른 파라미터 동정 알고리즘을 구성하였다.

2.2 센서리스 제어

2.2.1 전류 관측기의 구성

d, q축 인덕턴스를 고려한 IPMSM의 고정자 상에서의 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} L_1 + L_2 \cos 2\theta & L_2 \sin 2\theta \\ L_2 \sin 2\theta & L_1 - L_2 \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} + \omega K_E \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } L_1 = \frac{L_d + L_q}{2}, L_2 = \frac{L_d - L_q}{2}$$

우선 전류 관측기를 구성하기 위해 2θ 항을 제거하면,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_\alpha &= -\frac{R}{L_d} i_\alpha - \frac{\omega(L_d - L_q)}{L_d} i_\beta + \frac{\sin \theta K_E \omega}{L_d} + \frac{v_\alpha}{L_d} \\ \frac{d}{dt} i_\beta &= -\frac{R}{L_q} i_\beta - \frac{\omega(L_q - L_d)}{L_q} i_\alpha - \frac{\cos \theta K_E \omega}{L_q} + \frac{v_\beta}{L_q} \end{aligned} \quad (2)$$

위식으로부터 관측기를 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{i}_\alpha &= -\frac{R}{L_d} \hat{i}_\alpha - \frac{\hat{\omega}(L_d - L_q)}{L_d} \hat{i}_\beta + \frac{\sin \theta K_E \hat{\omega}}{L_d} + \frac{v_\alpha}{L_d} + k_1 e_\alpha \\ \hat{i}_\beta &= -\frac{R}{L_q} \hat{i}_\beta - \frac{\hat{\omega}(L_q - L_d)}{L_q} \hat{i}_\alpha - \frac{\cos \theta K_E \hat{\omega}}{L_q} + \frac{v_\beta}{L_q} + k_2 e_\beta \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, \hat{i}_α : D축 추정전류, \hat{i}_β : Q축 추정전류

k_1, k_2 : 상수

$$\begin{aligned} e_\alpha &= \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ e_\beta &= \hat{i}_\beta - i_\beta \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} e_\alpha &= -\frac{R}{L_d} e_\alpha - \frac{L_d - L_q}{L_d} (\hat{\omega} - \omega) e_\beta + \frac{K_E}{L_d} (\hat{\omega} \sin \theta - \omega \sin \theta) + k_1 e_\alpha \\ \frac{d}{dt} e_\beta &= -\frac{R}{L_q} e_\beta - \frac{L_q - L_d}{L_q} (\hat{\omega} - \omega) e_\alpha + \frac{K_E}{L_q} (\hat{\omega} \cos \theta - \omega \cos \theta) + k_2 e_\beta \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)으로부터 역기전력의 오차가 0으로 수렴할 경우, 식(3)의 관측기의 k_1, k_2 가 극배치(pole placement)기법을 통해 안정하도록 설정된다면, 전류 오차는 0으로 수렴되어지며, 역기전력 오차를 최소화하기 위한 알고리즘을 2.2.2절에 나타냈다.

2.2.2 순시무효전력을 이용한 속도 추정

식(1)을 회전자 좌표계로 변환하여 구한 영구자석 동기전동기의 회전자축 전압방정식을 표현하면

$$\begin{aligned} v_d &= (R + pL_d)i_d - \omega L_q \dot{i}_q \\ v_q &= (R + pL_q)i_q + \omega L_d \dot{i}_d + K_E \omega \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 회전자 속도항으로 표현하면

$$\omega = \frac{v_q - (R + pL_q)i_q}{K_E + L_d \dot{i}_d} \quad (7)$$

식(7)로부터 회전자의 속도를 산출할 경우, 전동기의 파라미터 계측시 발생하는 오차와 선전류 및 입력전압 감출시 발생하는 오차로 인해 실제속도와 추정속도 사이에 오차가 발생하므로, 이를 보상하기 위해 보상값 C를 고려하여, 추정속도를 식(8)과 같이 구성하며, 보상값 C를 결정하기 위해 회전자 좌표계의 순시무효전력을 이용하였다.

$$\hat{\omega} = \frac{v_q - (R + pL_q)i_q}{K_E + L_d \dot{i}_d} + C \quad (8)$$

순시 무효전력 q_m 을 선전류 i_s 와 역기전력 E_s 의 벡터외적이라고 정의하면, 순시무효전력은 식(9)과 같으며,

$$q_m \equiv i_s \otimes E_s \quad (9)$$

여기서, $i_s = (i_d, i_q)$, $E_s = (E_d, E_q)$, $E_d = 0$, $E_q = K_E \hat{\omega}$

식(3)의 추정전류를 이용한 추정 순시 무효전력은 다음과 같다.

$$\hat{q}_m \equiv \hat{i}_s \otimes E_s \quad (10)$$

여기서, $\hat{i}_s = [\hat{i}_d, \hat{i}_q]$

회전자 좌표계에서 실제전류 i_s 에 대해 추정전류 \hat{i}_s 가 실제 순시 무효전력에 대해 $\Delta\theta$ 만큼 벗어나 있다면, 식(9),(10)을 다음과 같이 표시한다.

$$q_m = i_d K_E \hat{\omega} \quad (11)$$

$$\hat{q}_m = \hat{i}_d K_E \hat{\omega} = (i_d \cos \Delta\theta + i_q \sin \Delta\theta) K_E \hat{\omega} \quad (12)$$

식(12)에서 (13)의 조건이 만족된다면, 식(12)을 식(14)와 같이 근사 시킬 수 있으며,

$$\omega \neq 0, \Delta\theta \approx 0 \quad (13)$$

$$\hat{q}_m \approx (i_d + i_q \Delta\theta) K_E \hat{\omega} \quad (14)$$

식(11),(14)로부터, 순시무효전력의 오차는 식(15)와 같이 위치오차에 대한 정보를 포함한 식으로 나타난다. 추정전류가 실제전류보다 앞선 경우를 $\Delta\theta > 0$ 라 하면, 속도 오차에 대한 보상값을 결정하기 위해 식(16), (17)의 조건이 만족되도록 K_{cp} 를 결정하고, 안정적으로 보상이 이루어지도록 적분이득을 부가하여 식(18)과 같이 보상값 C를 결정한다.

$$\Delta q_m = \hat{q}_m - q_m = i_q \Delta\theta K_E \hat{\omega} \quad (15)$$

$$\Delta\theta > 0 \text{ 이면, } K_{cp} \cdot i_q \Delta\theta K_E \omega < 0 \quad (16)$$

$$\Delta\theta < 0 \text{ 이면, } K_{cp} \cdot i_q \Delta\theta K_E \omega > 0 \quad (17)$$

$$C = K_{CI} \Delta q_m + K_{CI} \int_0^t \Delta q_m dt \quad (18)$$

여기서, K_{CP} , K_{CI} : 상수

식(13)의 조건이 만족되는 경우, 식(5)의 오차방정식은 식(19)같이 나타내어지고,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} e_a &= -\frac{R}{L_d} e_a - \frac{L_d - L_q}{L_d} (\hat{\omega} - \omega) e_s + \frac{K_E}{L_d} (\hat{\omega} - \omega) \sin \hat{\theta} + k_1 e_a \\ \frac{d}{dt} e_s &= -\frac{R}{L_q} e_s - \frac{L_d - L_q}{L_q} (\hat{\omega} - \omega) e_a + \frac{K_E}{L_q} (\hat{\omega} - \omega) \cos \hat{\theta} + k_2 e_s \quad (19) \end{aligned}$$

식(18)에서 추정속도를 잘 보상하여, 속도추정오차가 0으로 수렴하면, 식(19)는 (20)으로 나타내지며, 안정성을 확보하기 위해 식(21)을 만족하도록, k_1, k_2 를 설정하면, 식(20)의 오차는 0으로 수렴한다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} e_a &= -\left(\frac{R}{L_d} - k_1\right) e_a \\ \frac{d}{dt} e_s &= -\left(\frac{R}{L_q} - k_2\right) e_s \quad (20) \end{aligned}$$

$$k_1 < \frac{L_d}{R}, \quad k_2 < \frac{L_q}{R} \quad (21)$$

식(3)의 관측기로부터 선전류를 추정하고, 추정전류와 실제전류를 좌표변환 후, 식(10), (11)로부터 실제무효전력과 추정무효전력을 산출한다. 산출된 무효전력 값들로부터 오차를 산출하고, 산출된 오차를 식(18)과 같이 비례적분하여 보상값 C 결정한 후, 식(8)로부터 추정속도 $\hat{\omega}$ 를 산출한다.

2.3 실험 결과

실험에 사용된 모터의 파라미터는 정격용량이 2.5kW이며, 정격토크 11.9Nm, 정격속도 2000rpm을 갖는 8극형 매입형 영구자석 동기전동기를 사용하였다.

표1 인덕턴스 동정결과

구 간(A)	L_q (mH)	구 간(A)	L_d (mH)
$0 \leq i_{sq} < 5.0034$	0.001529	$-2.07888 \leq i_{sq} < 0$	0.001363
$5.0034 \leq i_{sq} < 8.476711$	0.001363	$-5.61292 \leq i_{sq} < -2.07888$	0.001529
$8.476711 \leq i_{sq} < 8.838837$	0.00141	$-8.01717 \leq i_{sq} < -5.61292$	0.001415
$8.838837 \leq i_{sq} < 12.59959$	0.001381	$-9.38659 \leq i_{sq} < -8.01717$	0.001466
$12.59959 \leq i_{sq} < 15.8392$	0.001197	$-12.8693 \leq i_{sq} < -9.38659$	0.001035
$i_{sq} > 15.8392$	0.001119	$i_{sq} < -12.8693$	0.001064
구 간(A)	L_d (mH)	구 간(A)	L_q (mH)
$0 \leq i_{sd} < 3.143415$	0.0018	$7.22658 \leq i_{sd} < 9.753152$	0.001672
$3.143415 \leq i_{sd} < 6.10461$	0.00168	$9.753152 \leq i_{sd} < 12.85982$	0.001567
$6.10461 \leq i_{sd} < 7.22658$	0.001684	$i_{sd} > 12.85982$	0.001488

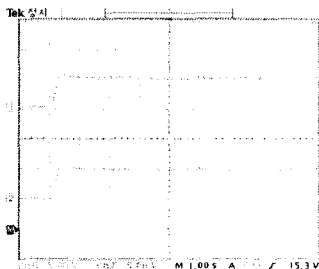


그림3. 부부하시 1000[rpm]에서 실제속도(상), 추정속도(중), 오차(하)

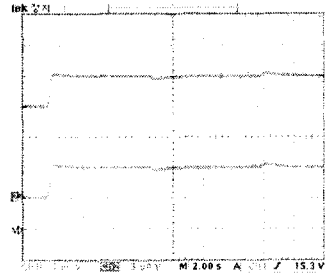


그림4. 부하시 1000[rpm]에서 실제속도(상), 추정속도(하)

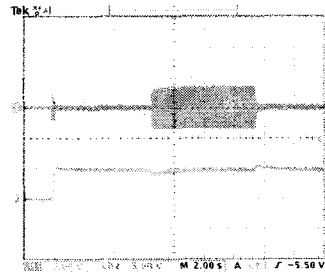


그림5. 부하시 1000[rpm]에서 선전류(상), 추정속도(하)

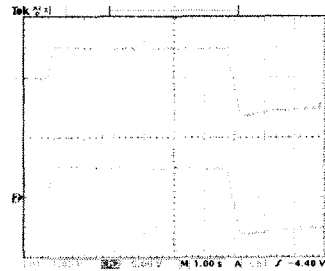


그림6. 정역운전시 실제속도(상), 추정속도(하)

3. 결 론

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기의 파라미터 계측의 오차를 줄이기 위해 전류 구간별 인덕턴스값을 변화하였고, 계측한 파라미터 동정 알고리즘을 바탕으로 센서리스 제어를 수행하였다. 고정자 좌표계상의 IPM모터의 전압방정식을 이용하여 관측기를 구성하고, 회전자 좌표계에서 산출된 속도항에 순시무효전력을 이용하여 속도오차를 보상하는 방법으로 센서리스를 수행하였으며, 실험을 통하여 지령속도에 거의 근접하게 응답하는 실제속도를 측정함으로써 정확성을 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2004-041-D00284)

[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] 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