

순시 무효전력을 이용한 IPM모터의 센서리스 제어

정우택*, 강형석*, 김영석*

*인하대학교 전기공학과

Sensorless Control for a Interior Permanent Magnet Synchronous Motor based on an Instantaneous Reactive Power

*Woo-Taik Joung, *Hyung_Seok Kang, *Young_Seok Kim

* 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. This paper presents algorithm for speed sensorless vector control based on an Instantaneous Reactive Power. Effectiveness of algorithm is confirmed by the experiments.

1. 서 론

최근 산업분야의 각종 기계 및 프랜트에 있어서 정밀한 속도제어 위치제어나 급가감속 운전 등을 필요로 하는 가변속 구동 시스템에 있어 에너지 절약효과를 보다 높이고 장치의 소형·경량화를 위해 영구자석 동기전동기 (PMSM)가 많이 사용되고 있다. 또한 대기오염 방지와 에너지절약 측면에서 하이브리드 카와 전기자동차가 각광을 받고 있는 것은 주지의 사실이며, 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 사용될 것이다.

그러나 PMSM은 회전자에 부착되어진 영구자석으로부터 자속을 공급받기 때문에 원활한 토크 제어를 위해서는 회전자의 정확한 위치정보를 갖고 전류제어를 해야만 한다. 정확한 위치정보를 얻기 위해서는 회전자에 전자식 위치검출기를 부착하여야 한다. 이러한 위치 검출기는 회전하는 위치를 연속적으로 검출할 수 있다는 장점이 있으나 그 가격이 매우 고가이기 때문에 전체 시스템의 가격을 크게 상승시킬 뿐만 아니라 별도의 복잡한 하드웨어가 제어기에 구성되어야 하는 단점이 있다. 또한 주변환경에 대한 영향을 많이 받는다. 이외에도 위치검출기를 전동기 축에 부착함으로 인한 전동기 크기의 증대 및 가공성 저하의 문제가 발생하게 되는 단점이 있다. 따라서 PMSM의 속도 및 위치 센서리스 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, PMSM의 속도 및 위치 제어 알고리즘은 기본적으로 d-q 모델 상에서 전압방정식으로부터 도출되기 때문에 PMSM의 모델의 정확성이 제어의 정도를 결정하는 중요한 요인이 된다. 따라서 PMSM의 파라미터를 정확하게 파악할 필요가 있다.

따라서, 본 논문에서는 IPM모터의 센서리스제어를 위해 파라미터를 측정하고, 그 파라미터를 적용한 전압방정식을 적용하여, 관측기를 구성하고, 순시무효전력을 이용한 속도 보상 센서리스제어를 수행하였고, 실제 구동을 통하여 정확성을 증명하였다.

2. 본 론

2.1 인덕턴스의 계측

q축전압 v_q 를 0으로하고, d축에 필스전압을 인가하면, d축전류 i_d 가 흐른다. d축 필스실험 중에 계측한 d축전압 v_d 를 적분해 d축 쇄교자속 λ_d 를 구하고, λ_d 와 계측된 d축전류 i_d 와의 관계를 나타낸 것이 그림1의 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.

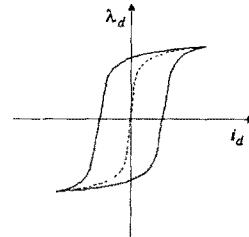


그림1 d축 전류와 쇄교자속

q축 필스실험도 마찬가지로 d축전압 v_d 는 0으로하고, q축에 필스전압을 인가하여 q축 인덕턴스 L_{q0} 와 q축 인덕턴스의 감소율 D_{Lq} 를 구한다.

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

2.2 센서리스 제어

2.2.1 전류 관측기의 구성

위에서 구한 d, q축 인덕턴스를 고려한 IPM모터의 고정자 상에서의 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_d &= R \frac{i_d}{i_i} + p \frac{L_1 + L_2 \cos 2\theta}{L_2 \sin 2\theta} \frac{L_2 \sin 2\theta}{L_1 - L_2 \cos 2\theta} \frac{i_i}{i_i} \\ &\quad + u K_E \frac{-\sin \theta}{\cos \theta} \quad (1) \end{aligned}$$

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

우선 전류 관측기를 구성함에 있어 2θ 항을 제거소거하

기 위하여 회전자 축으로 변환한 후 다시 고정자축으로 변환하면, 2θ 항이 소거된 다음의 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{i}_\alpha &= -\frac{R}{L_d} i_\alpha - \frac{w(L_d - L_q)}{L_d} i_\beta + \frac{\sin \theta K_E w}{L_d} + \frac{v_o}{L_d} \\ \dot{i}_\beta &= -\frac{R}{L_q} i_\beta - \frac{w(L_d - L_q)}{L_q} i_\alpha - \frac{\cos \theta K_E w}{L_q} + \frac{v_\beta}{L_q} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, v_o : 고정자 좌표계의 D축 입력전압

v_β : 고정자 좌표계의 Q축 입력전압

i_α : D축 전류

i_β : Q축 전류

w : 전동기의 속도

θ : 전동기의 위치

R : 고정자 저항

L_d : d축 인덕턴스

L_q : q축 인덕턴스

K_E : 역기전력 상수

위식으로부터 관측기를 구성하면 다음과 같다.

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

여기서, \hat{i}_α : D축 추정전류

\hat{i}_β : Q축 추정전류

k_1, k_2 : 상수

$$e_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha$$

$$e_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta \quad (4)$$

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

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 추정오차의 보상

식(1)을 회전자 좌표계로 변환하여 구한 영구자석 동기전동기의 회전자축 전압방정식은 식(6)과 같으며, 회전자 속도는 식(7)과 같이 산출 가능하다.

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

여기서, v_d : 회전자 좌표계의 d축 입력전압

v_q : 회전자 좌표계의 q축 입력전압

i_d : d축 전류

i_q : q축 전류

p : 미분연산자

$$w = \frac{v_q - (R + pL_q) i_q}{K_E + L_d i_d} \quad (7)$$

식(7)로부터 회전자의 속도를 산출할 경우, 전동기의 파라미터 계측시 발생하는 오차와 선전류 및 입력전압 검출시 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 이용한다.

$$\hat{w} = \frac{v_q - (R + pL_q) i_q}{K_E + L_d i_d} + C \quad (8)$$

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

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

여기서, $i_s = (i_d, i_q)$

$$E_s = (E_d, E_q)$$

$$E_d = 0, E_q = K_E \hat{w}$$

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)은 식(11),(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_m = i_s K_E \hat{w} \quad (11)$$

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

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

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

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

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, 속도오차에 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.

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

$$\Delta\theta > 0^\circ \text{면}, K_{cp} \cdot i_q \Delta\theta K_E \hat{w} < 0 \quad (16)$$

$$\Delta\theta < 0^\circ \text{면}, K_{cp} \cdot i_q \Delta\theta K_E \hat{w} > 0 \quad (17)$$

$$C = (K_{cp} + \frac{K_{ci}}{p}) \cdot \Delta q_m \quad (18)$$

여기서, K_{cp}, K_{ci} : 상수

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

$$\begin{aligned}\dot{e}_o &= -\frac{R}{L_d} e_o - \frac{L_d - L_q}{L_d} (\hat{w} - w) e_s + \frac{K_E}{L_d} (\hat{w} - w) \sin \theta + k_1 e_o \\ \dot{e}_s &= -\frac{R}{L_q} e_s - \frac{L_d - L_q}{L_q} (\hat{w} - w) e_o + \frac{K_E}{L_q} (\hat{w} - w) \cos \theta + k_2 e_s\end{aligned}\quad (19)$$

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

$$\begin{aligned}\dot{e}_o &= -\left(\frac{R}{L_d} - k_1\right) e_o \\ \dot{e}_s &= -\left(\frac{R}{L_q} - k_2\right) e_s\end{aligned}\quad (20)$$

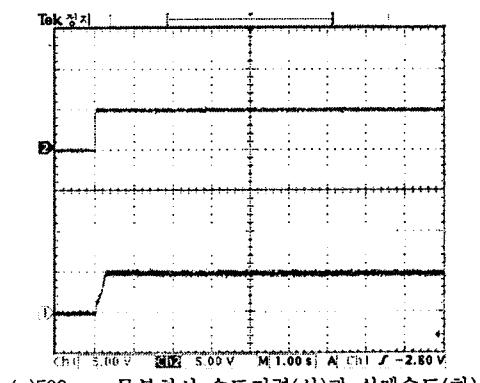
$$k_1 < \frac{L_d}{R}, \quad k_2 < \frac{L_q}{R} \quad (21)$$

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{w} 를 산출한다.

2.3 실험 결과

실험에 사용된 모터는 8극, 정격용량 2.5[kW], 고정자 저항 0.22[Ω], 정격토크 11.9[Nm], 정격속도 2000[rpm]의 매입형 영구자석 동기전동기이며, 파라미터 계측실험에 의한 d, q축 인덕턴스 값은 d축이 1.61[mH], q축이 1.31[mH]이었다.

그림2는 500rpm에서의 지령속도와 무부하시의 실제속도, 부하시의 실제속도를 나타낸다.

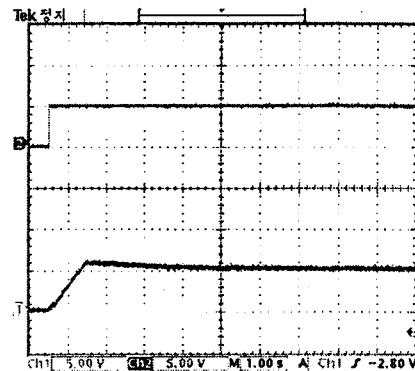


(a) 500 rpm 무부하시 속도지령(상)과 실제속도(하)

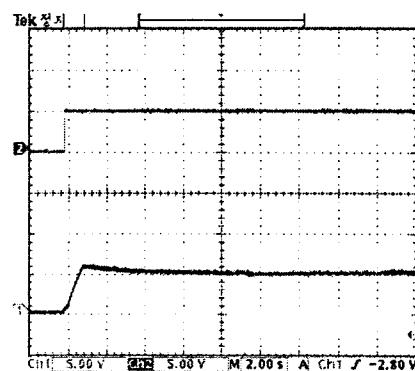


(b) 500 rpm 부하시 속도지령(상)과 실제속도(하)
그림2 500 rpm 구동시 속도지령과 실제속도

그림3은 정격속도인 2000rpm에서의 지령속도와 무부하시의 실제속도, 부하시의 실제속도를 나타낸다.



(a) 2000 rpm 무부하시 속도지령(상)과 실제속도(하)



(b) 2000 rpm 부하시 속도지령(상)과 실제속도(하)

그림3 2000 rpm 구동시 속도지령과 실제속도

3. 결 론

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기의 파라미터를 계측한 후, 계측한 파라미터를 바탕으로 센서리스 제어를 수행하였다. 고정자 좌표계상의 IPM모터의 전압 방정식을 이용하여 관측기를 구성하고, 회전자 좌표계에서 산출된 속도함에 순시무효전력을 이용하여 속도오차를 보상하는 방법으로 센서리스를 수행하였으며, 실험을 통하여 지령속도에 거의 근접하게 응답하는 실제속도를 측정함으로서 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] N. Matsui, M. Shigyo, "Brushless DC motor control without position and speed sensors", IEEE Trans. Ind. App., vol.28, no.1, pp.120-127, 1992.