

초기위치 추정 및 파라미터 계측을 선행하여 순시무효전력을 이용한 IPMSM의 센서리스 제어

김원석*, 정우택, 김영석
인하대학교 전기공학과

Sensorless Control of IPMSM on an Instantaneous Reactive Power Preceding Initial Position Estimation and Parameter Measurement

*Won-Suk Kim, Woo-Talk Joung, Young-Seok Kim
Dept. of Electrical Engineering of Inha University

Recently, the use of IPMSM is coming to be active, in many industrial applications. In sensorless drive of IPMSM, it is important to know the exact information of the initial rotor position, because the wrong estimation of the initial rotor position brings about the decrease of the starting torque, or a temporary reverse revolution. In addition, PMSM is necessary to use the accurate information of the inductance for the precise torque control owing to the reluctance torque. In this paper presents initial rotor position estimation method and, measure method of the each-axis inductance. And to minimize the speed estimations error, the estimated speeds are compensated by using an instantaneous reactive power in synchronously rotating reference frame.

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. 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.

그중에서도 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)는 토크밀도가 높고 고효율 및 규격이 작은 이점 때문에 드라이브 적용분야에 많이 쓰이고 있다.

그러나 PMSM의 속도 및 위치 제어 알고리즘은 기본적으로 d-q 모델 상에서 전압방정식으로부터 돌출되기 때문에 PMSM의 모델이 정확하지 아닌지가 제어의 정도를 결정하는 중요한 요인이 된다. 또한, 시동시의 자극 위치추정에 실패한 경우 시동토크의 감소 또는 일시적인 역전 등을 동반하는 경우가 있다.

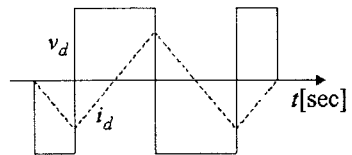
따라서 본 논문에서는 IPMSM 센서리스 제어를 위해 선행되어야 할 초기위치추정과 d-q축 인덕턴스 계측을 하고, 측정된 데이터를 기초하여 전류의 구간에 따라 변화하는 파라미터 수치를 대입한 센서제어 모델을 만들고 벡터제어를 수행하여 측정된 데이터들의 정확성을 검증한 후 순시무효전력을 이용한 속도 및 위치추정 알고리즘을 적용하여 센서리스 제어에까지 확대시키고자 한다.

2. 본 론

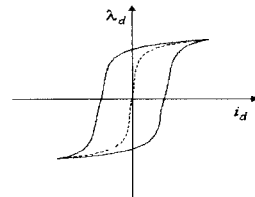
2.1 인덕턴스의 계측

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 쇄교자속 λ_d 를 구하고, λ_d 와 계측된 i_d 와의 관계를 나타낸 것이 그림1(b)의 실선이다. 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 구한다.



(a) d축에 펄스전압 인가시 전류응답



(b) d축 전류와 쇄교자속

그림 1. 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 그림2와 같다.

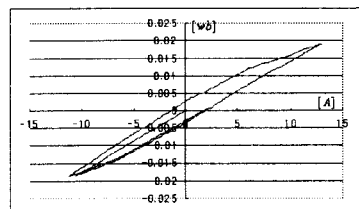


그림 2. d축 전류에 대한 d축 쇄교자속

히스테리시스의 평균이 되는 점의 원점으로부터의 기울

기를 구하여, L_d 의 값을 구하고 같은 방법으로 L_q 의 값을 구한다.

2.2 초기위치의 추정

초기 전류가 0인 상태에서 전압벡터 $v(100)$ 을 T_s 동안 인가한 경우, $\alpha_u - \beta_u$ 좌표계에서 각각의 전류의 피크치 i_{au} 와 $i_{\beta u}$ 는 식(1)과 같다.

마찬가지로, 전압벡터 $v(010)$ 과 전압벡터 $v(001)$ 을 인가하여 v , w 상의 고정자 좌표계에 대한 전류의 피크치를 구할 수 있다.

$$i_u(T_s) = \begin{bmatrix} i_{au}(T_s) \\ i_{\beta u}(T_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 + I_2 \cos 2\theta \\ I_2 \sin 2\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3/2} i_u \\ 1/\sqrt{2}(i_v - i_w) \end{bmatrix} \quad (1)$$

위에서 얻어진 α 축 전류로부터 $\Delta i_{\alpha u}$, $\Delta i_{\alpha v}$, $\Delta i_{\alpha w}$ 및 $\Delta i_{\alpha uv}$, $\Delta i_{\alpha vu}$, $\Delta i_{\alpha vw}$ 를 정의하고, β 축 전류로부터 $\Delta i_{\beta u}$, $\Delta i_{\beta v}$, $\Delta i_{\beta w}$ 및 $\Delta i_{\beta uv}$, $\Delta i_{\beta vu}$, $\Delta i_{\beta vw}$ 를 정의한다. 그리고 식(3)으로부터 θ 를 얻는다.

$$\begin{aligned} \Delta i_{\alpha u} &= \frac{1}{3}(2i_{\alpha v} - i_{\alpha v} - i_{\alpha w}) = \Delta I_s \cos 2\theta \\ \Delta i_{\alpha uv} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{\alpha v} - i_{\alpha w}) = \Delta I_s \sin 2\theta \\ \Delta i_{\beta u} &= \frac{1}{3}(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w}) = \Delta I_s \sin 2\theta \\ \Delta i_{\beta uv} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{\beta v} - i_{\beta w}) = \Delta I_s \cos 2\theta \end{aligned} \quad (2)$$

$$\theta \approx \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \tan 2\theta \\ \frac{1}{2} \tan 2\theta + \pi \end{bmatrix} \quad (3)$$

표 1 3상 펄스인가 알고리즘에서 α 축, β 축 전류 피크치를 이용한 초기위치 영역에 따른 초기위치의 추정식

θ	$\Delta i_{\alpha u}$	$\Delta i_{\alpha v}$	$\Delta i_{\alpha w}$	구분
$-\frac{\pi}{12} \sim \frac{\pi}{12}$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha u} - i_{\alpha v} - i_{\alpha w})}$
$\frac{11}{12}\pi \sim \frac{13}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha v} - i_{\alpha v} - i_{\alpha w})} + \frac{\pi}{6}$
$\frac{\pi}{12} \sim \frac{\pi}{4}$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha w} - i_{\alpha v} - i_{\alpha u})} + \frac{\pi}{3}$
$\frac{13}{12}\pi \sim \frac{5}{4}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha w} - i_{\alpha v} - i_{\alpha u})} + \frac{\pi}{2}$
$\frac{\pi}{4} \sim \frac{5}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha u} - i_{\alpha v} - i_{\alpha w})} + \frac{\pi}{2}$
$\frac{5}{4}\pi \sim \frac{17}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha u} - i_{\alpha v} - i_{\alpha w})} + \frac{\pi}{3}$
$\frac{5}{12}\pi \sim \frac{7}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha v} - i_{\alpha v} - i_{\alpha w})} + \frac{\pi}{2}$
$\frac{17}{12}\pi \sim \frac{19}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha v} - i_{\alpha v} - i_{\alpha w})} + \frac{\pi}{3}$
$\frac{7}{12}\pi \sim \frac{3}{4}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha w} - i_{\alpha v} - i_{\alpha u})} + \frac{2}{3}\pi$
$\frac{19}{12}\pi \sim \frac{7}{4}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha w} - i_{\alpha v} - i_{\alpha u})} + \frac{5}{6}\pi$
$\frac{3}{4}\pi \sim \frac{11}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha w} - i_{\alpha v} - i_{\alpha u})} + \frac{5}{6}\pi$
$\frac{7}{4}\pi \sim \frac{23}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha w} - i_{\alpha v} - i_{\alpha u})} + \frac{5}{6}\pi$

식(3)의 두 위치 사이에는 π 라디안의 차이가 있다. 따라서 이 두 위치로부터 실제의 회전자 위치를 정하기 위

하여 극성판별을 사용한다.

우선 u 상의 경우, 전압벡터 $v(100)$ 과 $v(011)$ 을 전류의 초기값이 0인 상태에서 초기위치 추정을 위해 인가된 펄스보다 비교적 긴 파장을 T_L 동안 인가한 후 전류피크값의 합의 부호에 의해 결정되어질 수 있다.

표 2 극성의 판별

θ	전압벡터	구분
$-\frac{\pi}{6} \sim \frac{\pi}{6}$	$v(100)$	$i_{uL}^+ + i_{uL}^- > 0$
$\frac{5}{6}\pi \sim \frac{7}{6}\pi$	$v(011)$	$i_{uL}^+ + i_{uL}^- < 0$
$\frac{\pi}{6} \sim \frac{\pi}{2}$	$v(001)$	$i_{wL}^+ + i_{wL}^- < 0$
$\frac{7}{6}\pi \sim \frac{3}{2}\pi$	$v(110)$	$i_{wL}^+ + i_{wL}^- > 0$
$\frac{\pi}{2} \sim \frac{5}{6}\pi$	$v(010)$	$i_{vL}^+ + i_{vL}^- > 0$
$\frac{3}{2}\pi \sim \frac{11}{6}\pi$	$v(101)$	$i_{vL}^+ + i_{vL}^- < 0$

실제 실험을 통해 얻어진 위치는 다음과 같다.

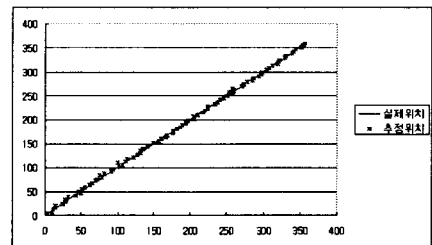


그림 3. 3상 펄스전압을 이용한 초기위치 추정알고리즘에서 α 축, β 축 전류로 추정시 초기위치 추정결과

2.3 실제 구동에 있어서의 특성파악

그림4는 위에서 예측된 데이터를 바탕으로 IPMSM을 구동 하였을 때 토크 및 속도 파형을 나타낸 것으로 토크가 비교적 안정적으로 발생함을 알 수 있다.

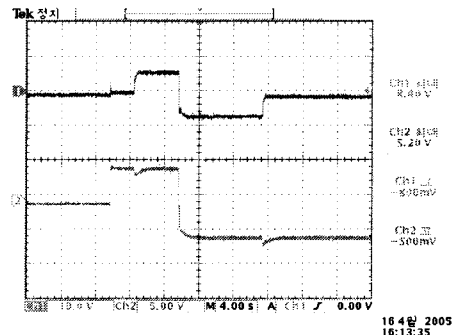


그림 4. 인덕턴스 구동특성 토크(상) 및 속도(하) 파형

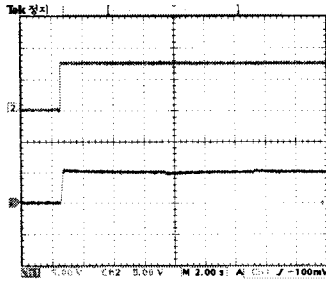


그림 5. 1500rpm 구동시 속도지령치와 실제속도

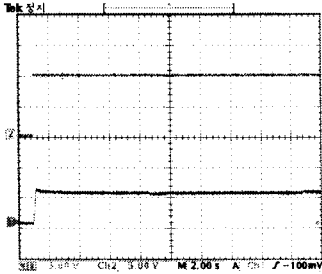


그림 6. 2000rpm 구동시 속도지령치와 실제속도

또한 그림(5), 그림(6)은 초기위치와 파라미터를 바탕으로 벡터제어를 수행함에 있어 전류 구간별로 가변 하는 파라미터수치를 적용 하였을 때의 속도응답을 나타낸다.

구동특성에서 비교적 정확하게 구동되고 있으며, 추정된 파라미터의 비교적 정확하게 계측되었음을 확인할 수 있다.

2.4 센서리스 제어에의 적용

이상에서 얻어진 데이터를 바탕으로 IPMSM의 센서리스 제어를 제안 한다.

기본 전압방정식에서 그 전압방정식의 역기전력 성분이 속도에 대한 정보를 갖고 있으므로 이를 이용하여 속도를 추정하며, 추정속도는 회전자 좌표계에서 순시무효전력을 이용하여 실제 속도와 추정오차를 보상하여 실제 속도로 수렴한다.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega \frac{pL_d}{(L_d - L_q)} & \omega(L_d - L_q) \\ \omega(L_d - L_q) & pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \{ (L_d - L_q)(\omega i_d - pi_q) + \omega K_E \} \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)를 d-q축 회전자 좌표계로 변환시키면 식(5)와 같이 표현되며

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ -\omega L_q & R + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (L_d - L_q)(\omega i_d - pi_q) + \omega K_E \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 전류 및 속도 항에 관한 상태방정식으로 표현하면

$$\dot{i}_d = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}\omega i_q \quad (6)$$

$$\dot{i}_q = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}\omega i_d + 2\omega i_d - \frac{1}{L_q}\omega K_E \quad (7)$$

$$e_d = \hat{i}_d - i_d$$

$$e_q = \hat{i}_q - i_q \quad (8)$$

$$\dot{e}_d = -\frac{R}{L_d}e_d + \frac{L_q}{L_d}(\hat{w}\hat{i}_q - \omega i_q) + K_1 e_d \quad (9)$$

$$\dot{e}_q = -\frac{R}{L_q}e_q + \left(\frac{L_d}{L_q} + 2\right)(\hat{w}\hat{i}_d - \omega i_d) - \frac{K_E}{L_q}(\hat{w} - \omega) + K_2 e_q$$

여기서 식(6), (7)에 대한 추정식을 세워 식(8)에서 오차가 0이도록 K_1 , K_2 를 극배치기법으로 안정하게 설계한다.

$$\omega = \frac{-v_q + Ri_q + L_q \dot{i}_q}{2L_q \hat{i}_d - L_d \hat{i}_d - K_E} \quad (10)$$

식(10) 속도항에서 보상값 C를 고려하여 추정속도를 산출하여 회전자 좌표계의 순시무효전력을 이용, q_m 을 전류 i_s 와 역기전력 E 의 백터외적으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q_m &= i_s \otimes E_s \\ i_s &= (i_d, i_q) \quad E_s = (E_d, E_q) \\ E_d &= 0, \quad E_q = [(L_d - L_q)(\omega i_d - pi_q) + \omega K_E] \end{aligned} \quad (11)$$

위의 q_m 으로부터, 순시무효전력의 위치오차에 대한 정보를 포함한 식을 얻을 수 있다.

이러한 추정속도를 잘 보상하여, 속도추정오차가 0으로 수렴하여 안정성을 확보하도록 K_1 , K_2 를 설정한다.

3. 결 론

본 논문에서는 IPMSM의 인덕턴스 및 초기위치를 계측하는 실험을 하였으며 PMSM의 구동을 통해 특성을 비교하였다.

인덕턴스 계측은 각 축에 반복되는 펄스 전압을 인가해 발생하는 전류와 쇄교자속의 히스테리시스 곡선을 이용하는 방법이다. 실험 결과 토크를 안정적으로 발생함을 확인하였고 정확한 인덕턴스 계측방법임을 확인하였다.

초기위치 추정에 있어서는 전압벡터를 인가했을 때의 전류응답을 이용하는 것으로 전기자철심의 자속포화에 의해 전류응답이 변화하는 것을 이용해 추정을 수행하였다. 실험결과 이 방법은 비교적 양호한 추정성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이상에서 얻어진 데이터를 바탕으로 IPMSM 센서리스 제어 수행에 있어 순시무효전력을 회전자 좌표계에서 정의하고, 이를 이용하여 속도 및 위치 추정 알고리즘을 제안하였다.

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
- [3] N. Matsui, T. Takeshita, "A Novel Starting Method of Sensorless Salient-Pole Brushless Motor", IAS '94, vol.1, pp.386-392, Oct. 1994.
- [4] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", IEEE Trans. on Ind. Appl, vol.20, no.3, pp.625-630, 1984.