

적용 슬라이딩 관측기를 이용한 매입형 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어

김원석*, 강형석, 김영석
*인하대학교 전기공학과

Sensorless control of IPMSM using an adaptive sliding mode observer

*Won-Seok Kim, Hyong-Seok Kang, Young-Seok Kim
* Dept. of Electrical Engineering of Inha University

Abstract - In this paper, a new sensorless control based on an adaptive sliding mode observer is proposed for the interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM) drives. With using voltage equation only, the adaptive sliding mode observer was investigated. The proposed adaptive sliding mode observer is applied to overcome the problem caused by using the dynamic equation. Furthermore, the Lyapunov theorem is used to prove the system stability included speed estimate and speed control. The effectiveness of the proposed algorithm is confirmed by the experiments.

1. 서 론

영구자석이 회전자 내에 매입되어 있는 IPMSM은 전자기 토크성분외에도 전동기의 돌극성으로 인한 릴럭턴스 차이에 의한 토크가 존재한다. 이로 인해 작은 제적의 회전자로 큰 토크성분을 발생할 수 있으며, 구조가 견고하고, 작은 유효공극으로 전기자 반작용이 강하므로 일정 토크 영역에서의 운전뿐만 아니라 일정 출력 영역에서 고속운전이 가능하다. 이러한 우수한 전기 및 기계적인 특성 때문에 양호한 동 특성 및 고효율을 갖는 IPMSM은 로봇, 기기 툴 및 위치추정 장치, 전기자동차 등 서보적용에 호응을 받고있다.

그러나 IPMSM은 회전자에 부착되어진 영구자석으로부터 자속을 공급받기 때문에 원활한 토크제어를 위해서는 회전자의 정확한 위치 정보를 갖고 전류제어를 해야한다. 회전자의 정확한 위치정보를 얻기 위해서는 엔코더나 레졸버등의 전자식 위치검출기를 부착해야하나 가격이 비싸고 별도의 소프트웨어와 복잡한 하드웨어가 제어기에 구성되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 적용 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 IPMSM의 센서리스 제어를 제안한다. 제안된 관측기는 슬라이딩 모드를 적용하였기 때문에 관측기의 강인성 및 설계의 용이함을 얻을 수 있다. IPMSM의 고정자 전압방정식으로부터 적용 슬라이딩 모드 관측기를 구성하고, 전동기의 전압방정식을 이용하기 때문에 기계적방정식에 발생하는 기계적 제정수의 영향에 대해 강인한 특성을 갖는다. 또한 리아프노프 함수를 사용하여 속도 추정 및 안정도 판별을 수행한다.

2. 본 론

2.1 IPMSM의 상태방정식

IPMSM의 고정자 좌표계에서 기본적인 전압방정식은 다음과 같다.

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

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

식 (1)을 미분방정식으로 표현하기 위하여 정리하면 다음의 식을 얻는다.

$$\frac{di_s}{dt} = A i_s + L_1 v_s + L_1 E_s + B i_s \quad (2)$$

여기서, $i_s = [i_\alpha \ i_\beta]^T$: D축과 Q축 전류
 $v_s = [v_\alpha \ v_\beta]^T$: D축과 Q축 입력전압
 $E_s = [E_\alpha \ E_\beta]^T$: 유도전압
 $E_\alpha = K_E \omega \sin\theta$, $E_\beta = -K_E \omega \cos\theta$
 $A = -R L_1^{-1}$, $B = -\omega(L_d - L_q) \cdot L_2^{-1}$
 $L_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix}$, $L_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_d} \\ \frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix}$

2.2 관측기 구성

2.2.1 슬라이딩 모드 관측기

고정자 좌표계에서 매입형 영구자석 동기전동기의 상태 방정식을 이용하여 슬라이딩 관측기를 구성하면

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \\ \hat{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} \hat{i}_\alpha - \frac{\omega(L_d - L_q)}{L_d} \hat{i}_\beta + \frac{K_E}{L_d} \hat{\omega} \sin\hat{\theta} + \frac{1}{L_d} v_\alpha \\ -\frac{R}{L_q} \hat{i}_\beta - \frac{\omega(L_d - L_q)}{L_q} \hat{i}_\alpha - \frac{K_E}{L_q} \hat{\omega} \cos\hat{\theta} + \frac{1}{L_q} v_\beta \\ -\frac{D}{J} \hat{\omega} + \frac{K_T}{J} (-\hat{i}_\alpha \sin\hat{\theta} + \hat{i}_\beta \cos\hat{\theta}) + \frac{(L_d - L_q)}{J} \hat{i}_\alpha \hat{i}_\beta - \frac{T_L}{J} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $K_1 = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_1 \end{bmatrix}$, $K_2 = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}$, $I_1 = [sgn(s_1), \ sgn(s_2)]$
 $S = [s_1, \ s_2] = [\hat{i}_\alpha - i_\alpha, \ \hat{i}_\beta - i_\beta]$: 슬라이딩 면

선형화된 오차방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} I_1 \quad (4)$$

여기서, $E_1 = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix}$, $E_2 = \begin{bmatrix} \hat{\omega} - \omega \\ \hat{\theta} - \theta \end{bmatrix}$

슬라이딩 모드 관측기의 이득은 슬라이딩 모드 조건으로부터 다음 방정식을 만족하도록 구해진다.

$$s_1 \dot{s}_1 < 0, \ s_2 \dot{s}_2 < 0 \quad (5)$$

식 (5)을 만족하도록 관측기의 이득을 설계하면 관측기는 관측기의 특성상 파라미터 변동에 강인할 수 있다. 그러나 슬라이딩 모드 관측기는 특성상 이상적인 실행을 위해 무한대의 이득과 높은 주파수의 스위칭에 의한 떨림이 존재하게 된다. 이는 관측기의 이득식에 불연속적인 제어 입력항이 있어 관측기의 추정 떨림현상이 발생하게 되어 추정성능을 저하하는 문제점을 가지게 된다.

2.2.2 적응 슬라이딩 모드 관측기

$$\frac{d}{dt} \hat{i}_s = A \hat{i}_s + L_1 v_s + L_1 \hat{E}_s + \hat{B} \hat{i}_s - K \quad (6)$$

여기서, $K = \Phi S + \Psi$: 관측기 입력

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix}, \quad \Psi = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}$$

식 (6)로부터 슬라이딩 모드 관측기에는 전동기의 운동방정식이 사용되지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 매입형 영구자석 동기전동기의 속도 및 위치 정보를 얻기 위해서는 속도와 위치에 대한 정보가 있는 항을 고려해야 한다. 관측기를 구성하는 각 행렬식을 보면 속도 및 위치에 대한 정보는 L_d 와 L_q 에 차에 의한 항과 역기전력에 포함된다.

관측기의 슬라이딩 평면은 다음과 같이 추정전류와 실제전류의 오차로 정의한다.

$$S = [s_\alpha \quad s_\beta] = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha & \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \hat{i}_s - i_s = e_s = 0$$

2.3 속도 추정

적용 슬라이딩 모드 관측기는 운동방정식을 이용하지 않기 때문에 전동기의 회전자 속도 및 위치 정보를 얻기 위하여 속도와 위치에 대한 추정식이 필요하다. 본 논문에서는 파라미터 변동에 강인한 전동기의 속도를 추정하기 위해 리아푸노프(Lyapunov) 함수를 이용한다.

$$V = \frac{1}{2} S^T S + \frac{(\hat{\omega} - \omega)^2}{2} \quad (8)$$

한 추정주기 내에서 전동기의 속도가 일정하다고 가정하고 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = S^T \dot{S} + (\hat{\omega} - \omega) \dot{\hat{\omega}} \quad (9)$$

여기서 식 (7)을 미분하여, 식 (2), (6)로부터

$$\dot{S} = \frac{d}{dt} (\hat{i}_s - i_s) = A (\hat{i}_s - i_s) + \hat{B} \hat{i}_s - B i_s + L_1 (\hat{E}_s - E_s) - K \quad (10)$$

구하고 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{V} = S^T [A (\hat{i}_s - i_s) + (\hat{B} \hat{i}_s - B i_s) + L_1 (\hat{E}_s - E_s) - K] + \Delta \omega \dot{\hat{\omega}} \quad (11)$$

여기서, $\Delta \omega = \hat{\omega} - \omega$

관측기의 시스템이 안정하기 위해서는 리아프노프 안정도 이론으로부터 $V > 0$ 일 때, $\dot{V} < 0$ 을 만족해야 한다. 따라서 $\dot{V} < 0$ 을 만족하도록 하기 위하여 식 (11)로부터 다음과 같이 두 개의 식으로 분리한다.

$$S^T [(\hat{B} - B) \hat{i}_s + L_1 (\hat{E}_s - E_s)] + \Delta \omega \dot{\hat{\omega}} = 0 \quad (12)$$

$$S^T [A (\hat{i}_s - i_s) + B (\hat{i}_s - i_s) - K] < 0 \quad (13)$$

식 (12)가 '0'이 되도록 설정하고 식 (13)의 부등호를 만족하도록 하면 리아푸노프 함수는 안정하게 된다.

식(12)은 각각 전동기의 속도는 역기전력 정보와 L_d 와 L_q 의 차이 및 슬라이딩 평면과 관계가 있는 것을 볼 수 있다. 식 (12)을 항상 만족할 수 있도록 다음과 같이 정리한다.

$$S^T \cdot \left[K_E \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \left(\hat{\omega} \begin{bmatrix} \sin \hat{\theta} \\ -\cos \hat{\theta} \end{bmatrix} - \omega \begin{bmatrix} \sin \theta \\ -\cos \theta \end{bmatrix} \right) - (\hat{\omega} - \omega)(L_d - L_q) \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_d} \\ \frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} \hat{i}_s \right] + (\hat{\omega} - \omega) \dot{\hat{\omega}} = 0 \quad (14)$$

여기서 $\theta = \hat{\theta}$ 라 가정하고 정리하면

$$\dot{\hat{\omega}} = -K_E \left(\frac{1}{L_d} s_\alpha \cdot \sin \hat{\theta} - \frac{1}{L_q} s_\beta \cdot \cos \hat{\theta} \right) + \left[\frac{(L_d - L_q)}{L_d} s_\alpha \hat{i}_\beta + \frac{(L_d - L_q)}{L_q} s_\beta \hat{i}_\alpha \right] \quad (15)$$

식 (15)로부터 추정 위치값과 슬라이딩 평면을 이용하여 회전자의 속도를 추정할 수 있음을 볼 수 있다. 이때 회전자의 추정 위치값은 추정된 속도를 적분하여 얻는다.

그림 1은 관측기 시스템의 블록선도를 나타낸다. 그림 1에서 알 수 있듯이 실제 검출된 전류와 슬라이딩 모드 관측기에서 얻은 전류를 이용하여 슬라이딩 평면을 구하고, 이를 이용하여 식 (15)로부터 속도의 미분값을 추정한다. 회전자의 위치 정보는 식 (15)을 적분하여 얻고, 매입형 영구자석 동기전동기의 속도를 추정함에 있어 운동방정식을 이용하지 않기 때문에 전동기 기계적 정수에 대한 의존도를 감소시킬 수 있다.

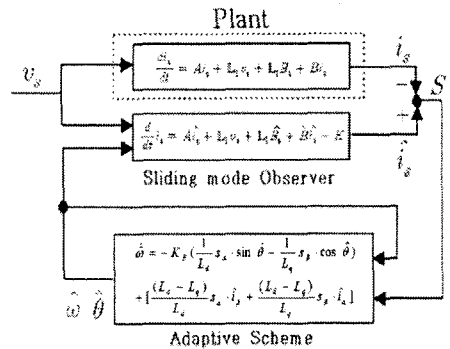


그림 1. 알고리즘 구성

2.4 슬라이딩 모드 관측기 이득 K

적용 슬라이딩 모드 관측기가 안정하기 위해서는 식 (13)을 만족하는 관측기의 이득을 구해야 한다. 식 (13)에 이득 K 를 넣어 풀면 다음과 같다.

$$S^T [A (\hat{i}_s - i_s) + B (\hat{i}_s - i_s) - \Phi S - \Psi] < 0 \quad (16)$$

식 (16)로부터 다음과 같이 적응 슬라이딩 모드 관측기의 이득을 구할 수 있다.

$\Phi > A$ 로부터,

$$\begin{aligned} \phi_{11} &> \frac{R}{L_d}, \quad \phi_{22} > \frac{R}{L_q} \\ \phi_{12} &> \frac{\omega(L_d - L_q)}{L_d}, \quad \phi_{21} > \frac{\omega(L_d - L_q)}{L_q} \end{aligned} \quad (17)$$

$S^T \psi > 0$ 로부터,

$$\psi_i = \begin{cases} \alpha_i & \text{if } s_i > 0 \\ -\beta_i & \text{if } s_i < 0 \end{cases} \quad (18)$$

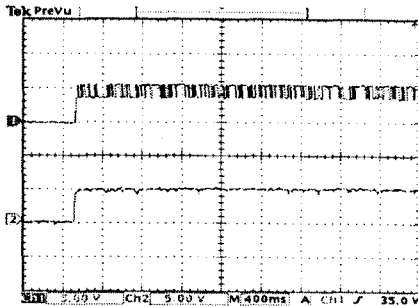
여기서, α_i, β_i 는 양의 상수, $i = 1, 2$

식 (17)과 식 (18)을 만족하도록 관측기 이득을 설정하면, 적응 슬라이딩 모드 관측기는 전체적으로 안정하게 된다.

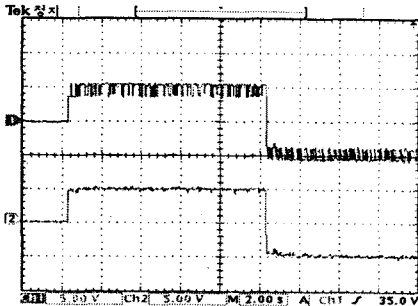
2.5 실험 결과

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

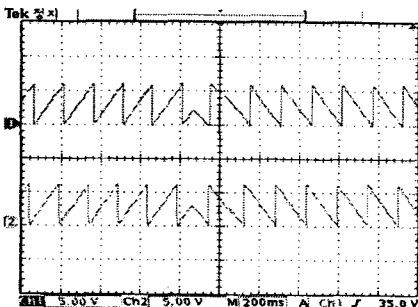
그림 2는 저속영역에서 실제속도와 추정속도 및 정역운동에서의 위치를 나타낸다.



(a) 50rpm일때 실제속도(상)와 추정속도(하)



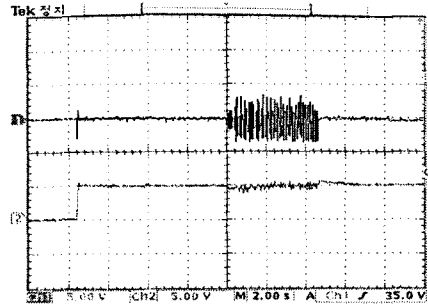
(b) 50rpm일때 정역운동(속도)



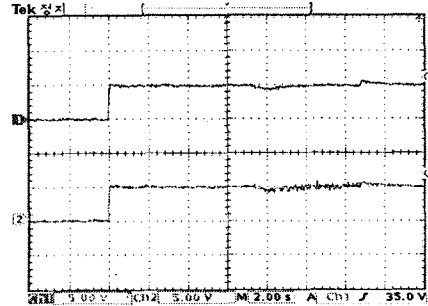
(c) 100rpm일때 정역운동(위치)

그림 2. 저속영역

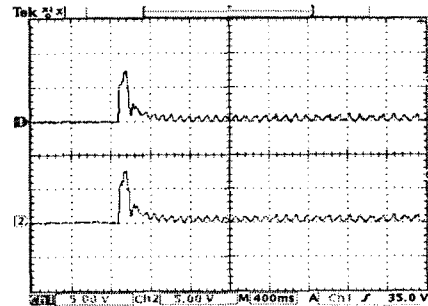
그림 3은 고속영역에서 부하인가시 선전류, 속도 그리고 q축전류를 나타낸다.



(a) 1000rpm에서 부하인가시 선전류(상), 추정속도(하)



(b) 1000rpm에서 부하인가시 실제속도(상), 추정속도(하)



(c) 1000rpm에서 q축 실제 전류(상), 추정 전류(하)

그림 3. 고속영역

3. 결 론

이번 연구로 적응 슬라이딩 관측기를 제안하고 이를 매입형 영구자석 동기전동기의 속도 및 센서리스 제어에 적용하였으며, 실험을 통하여 확인하였다. 제안한 알고리즘은 정상상태 뿐만 아니라 과도상태에서도 속도 및 회전자의 위치를 잘 추정함을 확인하였고 저·고속운전 뿐만 아니라 가변속 운전에도 이르기까지 운전특성을 확인하였다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [1] Raymond B. Sepe, et. al, "Real-Time Adaptive Control of the Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE Trans. IE., Vol.27, No.4, pp.706-714, 1991
- [2] J. Hu, D. Zhu, Y. Li, J. Gao, "Application of Sliding Observer to Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System", IEEE PESC Conf. Record, pp.532-536, 1994
- [3] J-J E. Slotine, W. Li, "Applied Nonlinear Control", from Prentice-Hall, 1991