

슬라이딩 모드 관측기를 이용한 영구자석 동기전동기 위치 및 속도 센서리스 제어

한윤석, 최정수, 김영석
인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부

The Speed and Position Sensorless Control of PMSM using the Sliding Mode Observer

Yoon-seok Han, Jung-soo Choi, Young-seok Kim
School of electrical & computer engineering, Inha University

Abstract - This paper presents a new speed and position sensorless control method of permanent magnet synchronous motors based on the sliding mode observer. The sliding mode observer structure and its design method are described. Also, Lyapunov functions are chosen for determining the adaptive law for the speed and the stator resistance estimator. The effectiveness of the proposed observer is confirmed by the experimental results.

1. 서 론

최근 들어 영구자석 동기전동기는 단위 무게 당 토크 크 비율 및 효율이 다른 전동기에 비해 월등히 높다는 장점을 가지고 있어 산업응용분야에 폭 넓게 사용되고 있다. 그러나, 영구자석 동기전동기는 회전자에 부착되어진 영구자석으로부터 자속을 공급받기 때문에 벡터제어를 위해서는 항상 회전자의 정확한 위치 정보를 알아야한다. 따라서, 전동기 회전자의 정확한 위치정보를 얻기 위해서 레졸버나 Absolute Encoder 또는 홀소자 등의 자기센서를 이용한 전자식 위치검출기가 사용되고 있다. 이러한 위치검출기는 일반적으로 가격이 고가일 뿐만 아니라 별도의 복잡한 하드웨어가 제어기에 구성되어야 하는 단점이 있다. 또한 진동 및 습도 등의 주위환경에 대한 영향을 많이 받기 때문에 사용환경에 제한을 받는다. 이외에도 위치검출기를 전동기 축에 부착함으로써 인한 전동기 크기의 증대 및 가공성 저하의 문제가 발생하게 된다.

이와 같이 영구자석 전동기의 제어상 큰 문제점인 회전자의 위치를 센서를 사용하지 않고 간접적으로 얻고자 하는 센서리스 제어에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.

본 논문은 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 영구자석 동기전동기의 새로운 센서리스 제어를 제안한다. 제안된 방법은 슬라이딩 모드 관측기를 사용하였기 때문에 파라미터 변동, 측정잡음 등에 대해 우수한 추정성능을 가지며 비선형 시스템에도 적용이 가능하다. 또한 전동기의 기계적 방정식을 이용하지 않고 영구자석 동기전동기의 속도 및 정상상태에서의 고정자 저항의 추정을 위하여 적응제어를 이용한 속도 및 저항 추정기를 제안한다. 제안된 관측기 시스템은 전동기의 고정자 저항변동과 속도를 동시 추정하면서 영구자석동기전동기의 속도 및 위치센서리스 제어가 가능하게 한다.

2. 슬라이딩 모드 관측기

고정자 좌표계상에서 영구자석 동기전동기의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}_s = \mathbf{A} \mathbf{i}_s + \mathbf{B} \mathbf{v}_s + \mathbf{B} \mathbf{E}_s \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{i}_s = (i_a \ i_b)^T$: 고정자 전류

$\mathbf{v}_s = (v_a \ v_b)^T$: 공급전압,

$\mathbf{E}_s = (E_a \ E_b)^T$: 역기전력

$$E_a = K_E \omega_r \sin \theta_r, \quad E_b = -K_E \omega_r \cos \theta_r,$$

$$\mathbf{A} = (-R_s/L_s) \cdot \mathbf{I}, \quad \mathbf{B} = (1/L_s) \cdot \mathbf{I}$$

K_E : 역기전력 상수, R_s : 고정자 권선저항,

L_s : 고정자 권선 인덕턴스

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

식 (1)로부터 슬라이딩 모드 관측기는 다음과 같이 구성되어 질 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \hat{\mathbf{i}}_s = \hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{i}}_s + \mathbf{B} \mathbf{v}_s + \mathbf{B} \hat{\mathbf{E}}_s + \mathbf{K} \quad (2)$$

여기서, $\hat{\mathbf{A}} = (-\hat{R}_s/L_s) \cdot \mathbf{I}$, $\hat{\cdot}$: 추정값

$\mathbf{K} = \Phi \mathbf{S} + \Psi$: 관측기 입력

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & 0 \\ 0 & \phi_{22} \end{bmatrix}, \quad \Psi = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}$$

관측기의 슬라이딩 평면은 다음과 같이 추정전류와 실제전류의 오차로 정의한다.

$$\mathbf{S} = (s_1 \ s_2)^T = \hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s = \mathbf{e}_s = 0 \quad (3)$$

식(3)을 미분하면, 식(1)과 식(2)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{S}} &= \frac{d}{dt} (\hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s) \\ &= (\hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{A} \mathbf{i}_s) + \mathbf{B} (\hat{\mathbf{E}}_s - \mathbf{E}_s) + \mathbf{K} \end{aligned} \quad (4)$$

3. 속도 및 고정자 저항 추정

전동기의 속도 및 고정자 저항을 추정하기 위하여 리아푸노프(Lyapunov) 함수를 이용한다. 리아푸노프함수를 다음과 같이 설정한다.

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{S} + \frac{(\hat{\omega}_r - \omega_r)^2}{2} + \frac{(\hat{R}_s - R_s)^2}{2} \quad (5)$$

한 추정주기 내에서 전동기의 속도가 일정하다고 가정 하고 식 (5)를 미분하면, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\dot{V} = \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} + (\hat{\omega}_r - \omega_r) \dot{\hat{\omega}}_r + (\hat{R}_s - R_s) \dot{\hat{R}}_s \quad (6)$$

식 (4)를 식 (6)에 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{S}^T [(\hat{\mathbf{A}} - \mathbf{A}) \hat{\mathbf{i}}_s + \mathbf{A} (\hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s) + \mathbf{B} (\hat{\mathbf{E}}_s - \mathbf{E}_s) \\ &\quad - \mathbf{K}] + \Delta \omega_r \dot{\hat{\omega}}_r + \Delta R_s \dot{\hat{R}}_s \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $\Delta \omega_r = \hat{\omega}_r - \omega_r$, $\Delta R_s = \hat{R}_s - R_s$,

관측기의 시스템이 안정하기 위해서는 리아푸노프 안정도 이론으로부터 $\dot{V} < 0$ 을 만족해야 한다. 식 (7)로부터, $\dot{V} < 0$ 을 만족하도록 다음과 같이 설정한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{S}^T [(\hat{\mathbf{A}} - \mathbf{A}) \hat{\mathbf{i}}_s] + \mathbf{S}^T [\mathbf{B} (\hat{\mathbf{E}}_s - \mathbf{E}_s)] \\ + \Delta \omega_r \dot{\hat{\omega}}_r + \Delta R_s \dot{\hat{R}}_s = 0 \end{aligned} \quad (8a)$$

$$S^T [A(\hat{i}_s - i_s) - K] < 0 \quad (8b)$$

식 (8a)로부터 전동기의 속도와 고정자 저항값을 동시에 추정할 수 있는 추정식을 도출할 수 있다. 또한 식 (8b)로부터 관측기 시스템이 안정할 수 있도록 관측기의 이득을 구한다.

식 (8a)를 항상 만족할 수 있도록 다음과 같이 두 개의 식으로 각각 분리한다.

$$S^T[(\hat{A} - A)\hat{i}_s] + \Delta R_s \hat{R}_s = 0 \quad (9a)$$

$$S^T[B(\hat{E}_s - E_s)] + \Delta \omega_r \hat{\omega}_r = 0 \quad (9b)$$

식 (9a)로부터 다음과 같은 고정자 저항 추정식을 이끌어 낼 수 있다.

$$\hat{R}_s = -\frac{1}{L_s}(s_1 \cdot \hat{i}_a + s_2 \cdot \hat{i}_\beta) \quad (10)$$

또한 식 (9b)로부터 다음과 같은 속도 추정식을 이끌어 낼 수 있다. (여기서, $\theta_r = \hat{\theta}_r$ 이라 가정)

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r &= \frac{K_E}{L_s} S^T \begin{bmatrix} \sin \hat{\theta}_r \\ -\cos \hat{\theta}_r \end{bmatrix} \\ &= \frac{K_E}{L_s} (s_1 \cdot \sin \hat{\theta}_r - s_2 \cdot \cos \hat{\theta}_r) \end{aligned} \quad (11)$$

그림 1은 관측기 시스템의 블록선도를 나타낸다. 그림 1과 식 (10), (11)로부터 실제 검출된 전류와 슬라이딩 모드 관측기에서 얻은 전류를 이용하여 슬라이딩 평면을 구하고, 이를 이용하여 고정자 저항과 속도를 동시에 추정한다. 그러므로, 전동기의 고정자 저항이 변동하거나 초기에 저항값을 잘못 알고 있다라도 전동기의 속도를 추정할 수 있으며, 회전자의 위치는 추정된 속도를 적분하여 얻는다. 또한 속도를 추정함에 있어, 전동기의 기계적 방정식을 이용하지 않기 때문에 전동기 기계적 정수에 대한 의존도를 더욱 감소시킬 수 있다.

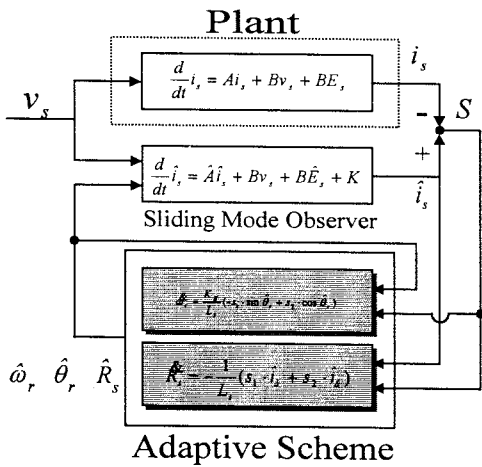


그림 1 제안된 알고리즘의 블록선도
Fig. 1 Block diagram of the proposed system

4. 슬라이딩 모드 관측기 이득 K

관측기 시스템이 안정할 수 있도록 식 (8b)을 만족하는 관측기의 이득을 구해야 한다. 식 (8b)로부터,

$$S^T [A(\hat{i}_s - i_s) - \Phi S - \Psi] < 0 \quad (12)$$

식 (12)로부터 다음과 같이 관측기 이득을 구할 수 있다.

$\Phi > A$ 로부터,

$$\phi_{11}, \phi_{22} > \frac{\hat{R}_s}{L_s} \quad (13)$$

$S^T \cdot \Psi > 0$ 로부터,

$$\phi_i = \begin{cases} \alpha_i & \text{if } s_i > 0 \\ -\beta_i & \text{if } s_i < 0 \end{cases} \quad (14)$$

여기서, α_i, β_i 는 양의 상수, $i = 1, 2$

식 (13)과 식 (14)을 만족하도록 관측기 이득을 설정하면, 관측기 시스템은 안정하게 된다.

5. 실험 결과

제안한 관측기 시스템의 타당성을 확인하기 위하여 실험을 행하였다. 실험에 사용된 전동기는 400W급 8극의 PMSM이 사용되어 졌으며, PMSM에 전력을 공급하기 위한 전력 변환부는 IGBT로 구성되어졌다. 또한 제안된 알고리즘의 성능비교를 위하여 전동기의 실제속도 및 회전자의 위치를 2024(ppr)의 분해능을 갖는 펄스 엔코더를 4채배하여 사용하였으며, 고정자 저항을 변동시키기 위하여 외부에 스위치와 연결된 저항을 병렬로 연결하였다. 또한 모든 제어알고리즘은 DSP TMS320C31을 사용하여 구현하였으며, 실험파형은 DSP에 부착되어진 D/A 컨버터에 의해 출력된 값을 오실로스코프로 나타내었다.

그림 2와 3은 전동기의 정지상태에서 스텝형태로 지령속도를 600(rpm)로 했을 때의 응답 특성을 보여주고 있다. 실험결과에서 알 수 있듯이 위치 센서를 사용하지 않고 정확한 전동기의 속도 및 회전자의 위치추정 특성을 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

그림 4와 5는 제안된 알고리즘의 정역특성을 나타낸 것으로 속도지령을 스텝형태로 600(rpm)에서 -600(rpm)으로 설정하였다. 그림 5로부터 역전시 과도 상태에서 추정위치와 실제위치가 어긋나 있으나 정상상태에 들어서는 위치에 오차가 거의 없는 특성을 확인할 수 있으며, 실제속도와 추정속도 모두 지령속도를 잘 추종하고 있는 것을 볼 수 있다.

전동기의 고정자 저항 변동의 추정성능에 대한 실험파형을 그림 6~8에 도시하였다. 실험조건은 전동기가 600(rpm)의 속도지령치로 정속운전하고 있을 때, 외부에서 저항값을 75[%]증가시켰다. 그림 6으로부터 고정자 저항값의 추정시 정상상태에 이르는 시간은 약 1(sec)정도로 과도상태가 길게 나타나고 있지만, 실제 시스템에서는 고정자 저항값이 스텝적으로 변동하지 않으므로 큰 문제는 없으리라 생각된다. 그림 7은 고정자 저항 추정 알고리즘을 사용하지 않고 식 (11)의 속도추정 알고리즘만을 사용하였을 때의 실제속도를 나타내고 있다. 그림으로부터 고정자 저항 변동시 실제속도가 떨어져 운전되고 있음을 볼 수 있다. 그림 8은 고정자 저항 추정 알고리즘과 속도추정 알고리즘을 동시에 사용하였을 때의 실제 속도로 고정자 저항 변동시 전동기의 속도가 떨어졌다가 바로 지령속도로 회복되는 것을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 고정자 저항 추정기를 갖는 슬라이딩 모드 관측기를 제안하고 이를 영구자석 동기전동기의 속도 및 위치센서없는 제어에 대해 적용하였으며, 이를 통한 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 제안한 관측기 시스템은 정상상태 뿐만 아니라 속도가 급변하는 과도상태에서도 전동기의 속도 및 회전자의 위치를 잘 추정할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 고정자 저항 추정기는 고정자 저항값을 잘 추정함을 확인하였다.
- 3) 고정자 저항 추정기를 사용하여 고정자 저항을 추

정하고, 전동기의 기계적 계 정수를 사용하지 않고 속도를 고정자 저항과 동시에 추정하기 때문에 고정자 저항 변동시에도 속도를 잘 추정할 수 있음을 확인하였다. 따라서 제안된 알고리즘은 전동기 정수에 덜 민감함을 확인하였다.

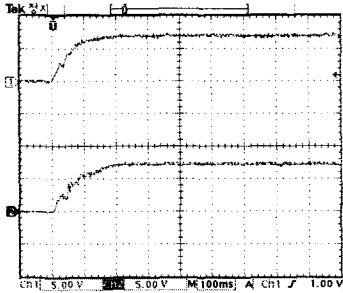


그림 2. 추정 및 실제 회전자 속도
Fig. 2 Estimated and real rotor speed

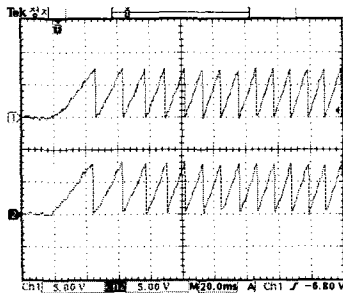


그림 3. 추정 및 실제 회전자 위치(전기각)
Fig3. Estimated and real rotor position(Elec. Deg)

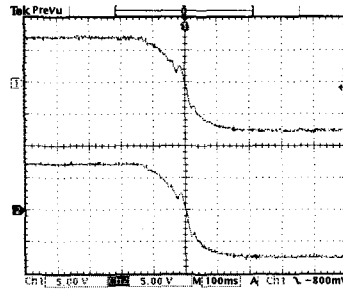


그림 4. 추정 및 실제 회전자 속도
Fig. 4 Estimated and real rotor speed

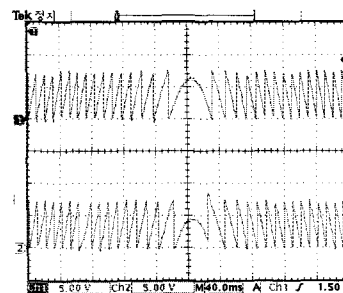


그림 5. 추정 및 실제 회전자 위치(전기각)
Fig5. Estimated and real rotor position(Elec. Deg)

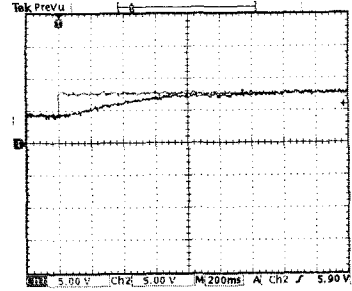


그림 6. 추정 및 실제 고정자 저항
Fig. 6 Estimated and real stator deviation

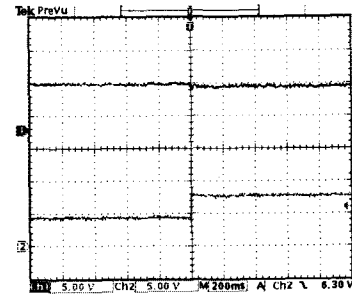


그림 7. 실제 회전자 속도 및 고정자 저항변동
Fig. 7 Real rotor speed and stator resistance deviation

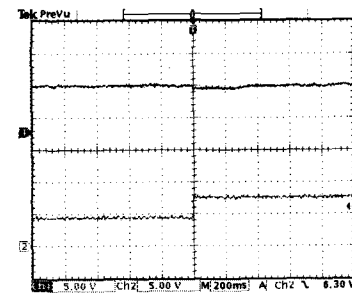


그림 8. 실제 회전자 속도 및 고정자 저항변동
Fig. 8 Real rotor speed and stator resistance deviation

(참 고 문 헌)

- [1] R. Wu et al, "A Permanent Magnet Motor Drive Without a Shaft Sensor," IEEE Trans. Ind. Appl., vol.27, no.5, pp.1005-1011, 1991.
- [2] N. Matsui et al, "Brushless dc Motor Control without Position and speed Sensor," IEEE Trans. Ind. Appl., vol.28, no.1, pp.120-127, 1992.
- [3] J. Hu, et al, "Application of Sliding Observer to Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System," IEEE PESC Conf. Record, pp.532-536, 1994
- [4] R. B. Sepe et al, "Real-Time Observer-Based (Adaptive) Control of a Permanent-Magnet Synchronous Motor without Mechanical Sensor," IEEE Trans. Ind. Appl., vol.28, no.6, pp.1345-1352, 1992.
- [5] T. Furuhashi et al, "A Position-and- Velocity Sensorless Control for Brushless DC Motors Using an Adaptive Sliding Mode Observer," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol.39, no.2, pp.89-95, 1992