

고정자 저항 추정기를 갖는 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 영구자석 동기전동기의 속도 및 위치 센서리스제어

한윤석, 최정수, 김영석

인하대학교

The Speed and Position Sensorless Control of PMSM using the Sliding Mode Observer with the Estimator of Stator Resistance

Yoon-seok Han, Jung-soo Choi, Young-seok Kim

Inha Univ.

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 discussed. 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 computer simulation.

1. 서 론

최근 들어 여러 산업응용분야에 직류전동기 대신 교류전동기 사용이 급격히 증대되고 있다. 교류전동기의 사용의 큰 장점은 기존의 직류전동기를 사용한 시스템에서의 브러시 및 정류자편의 기계적인 마모에 의한 유지·보수의 문제가 없다는 점을 들 수 있다. 교류전동기 중에서도 영구자석 동기전동기는 단위 무게 당 토크 비율 및 효율이 다른 전동기에 비해 월등히 높다는 장점을 가지므로 산업응용분야에 폭 넓게 사용되고 있다.

그러나, 영구자석 동기전동기는 회전자에 부착되어진 영구자석으로부터 자속을 공급받기 때문에 벡터제어를 위해서는 항상 회전자의 정확한 위치 정보를 알아야한다. 정확한 회전자의 위치정보를 얻기 위해서 회전자에 레졸

버나 Absolute Encoder 또는 홀소자 등의 자기센서를 이용한 전자식 위치검출기가 사용되어지고 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 측에 부착함으로써 인한 전동기 크기의 증대 및 가공성 저하의 문제가 발생하게 된다.

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

영구자석 동기전동기를 센서리스 제어하는 기존의 방법들은 크게 세 가지로 나뉘어 질 수 있다. 첫 번째 방식으로 전동기의 단자전압을 적분함으로써 회전자의 자속값을 취득하는 방법이 있다[1]. 이 경우 이상적인 적분기가 사용되어야 하고, 고정자 저항을 정확히 알아야 한다는 것이 큰 단점으로 지적될 수 있다. 두 번째 방식으로 단자 전압 방정식으로부터 간접적으로 제어각을 추정하는 방법이 있다. 이 방법에서는 실제의 전동기 모델과 제어각상의 수학적 모델을 비교함으로써 연속적으로 자속각을 추정하는 방식을 취하고 있다[2]. 그러나 전 운전 속도영역에서 부합할 수 있는 적합한 추정이득을 구하는 것이 어려우며, 전

동기 모델을 연속하여 풀어야 하는 단점을 안고 있다. 또 다른 방식으로, 상태 관측기를 이용하여 전동기의 속도 및 회전자의 위치를 동시에 추정하는 방법이 현재 많은 연구가 행해지고 있다[3],[4]. 그러나 기존의 상태 관측기를 이용한 방법들은 전동기의 속도에 대한 정보를 취득하기 위해 대부분의 알고리즘이 전동기의 기계적 방정식을 이용함으로써 전동기 제 정수에 대한 의존도를 더욱 가중시키고 있다. 이때 문제가 되는 것은 기계계의 방정식의 경우 그에 관련된 제 정수들이 전기계의 제 정수들 보다 더 알기 어렵다. 또한 기존의 센서리스 제어 방식에서는 공통적으로 전동기의 제 정수에 매우 민감한 문제점이 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 영구자석 동기전동기의 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, $\mathbf{i}_s = (i_\alpha \ i_\beta)^T$: 고정자 전류

$\mathbf{v}_s = (v_\alpha \ v_\beta)^T$: 공급전압

$\mathbf{E}_s = (E_\alpha \ E_\beta)^T$: 역기전력

$E_\alpha = -K_E \omega_r \sin \theta_r$

$$E_\beta = K_E \omega_r \cos \theta_r$$

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

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

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

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & 0 \\ 0 & \phi_{22} \end{bmatrix}, \quad \Psi = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}$$

$\hat{}$: 추정값

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.

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

3. 속도 및 고정자 저항 추정

전동기의 속도 및 고정자 저항을 추정하기 위하여 리아푸노프(Lyapunov) 함수를 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 가정하고 식 (5)를 미분하면, 다음과 같은 결과를 얻는다.

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

식 (4)를 식 (6)에 대입하면

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

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.

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

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

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

전동기의 속도와 고정자 저항은 서로 독립적이므로, 식 (8a)는 다음과 같이 두 개의 식으로 각각 분리할 수 있다.

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

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

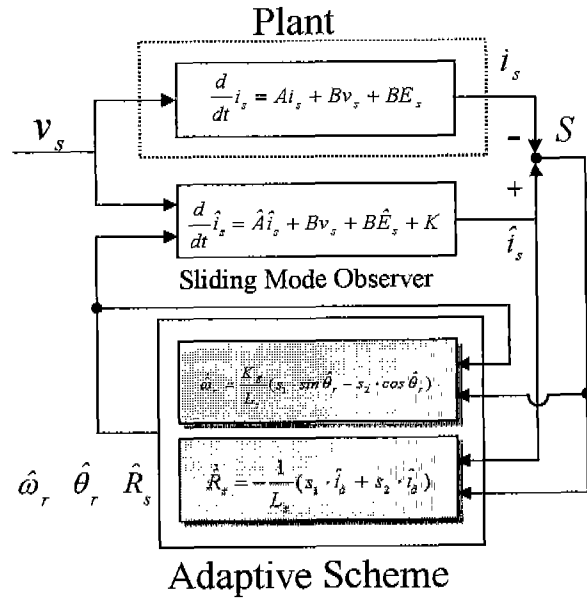
식 (9a)로부터 다음과 같은 고정자 저항 추정식을 이끌어 낼 수 있다.

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

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. 그림으로부터 실제 검출된 전류와 슬라이딩 모드 관측기에서 얻은 전류를 이용하여 속도와 고정자 저항을 추정한다. 또한 회전자의 위치는 추정된 속도를 적분하여 얻는다.



4. 관측기 입력 K

관측기 시스템이 안정될 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.

① A로부터,

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

$S^T \cdot \Psi > 0$ 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. 모의실험 결과

제안한 관측기 시스템의 타당성을 확인하기 위하여 컴퓨터 모의실험을 행하였다. 모의실험 결과들은 지령속도를 정지상태에서 스텝형태로 1000rpm, 0.6초 후에 -1000rpm, 다시 1.2초 후에 1000rpm, 1.8초 후에 -1000rpm로 했을 때의 결과들로 기동시 회전자의 초기각을 정확히 알고 있다고 가정하였다. 그림 2와 그림 3은 추정된 속도에 의해 제어되는 전동기의 동작상태를 나타내기 위해 실제속도와 추정속도를 보여주고 있다. 그림 4는 실제 회전자 위치와 추정된 회전자 위치를 보여주고 있다. 그림 5는 토오크분 지령전류를 보여주고 있다. 모의실험 결과로부터 제안된 관측기 시스템은 속도가 급변하는 과도상태에서도 회전자의 위치 및 속도를 잘 추정하는 것을 볼 수 있다.

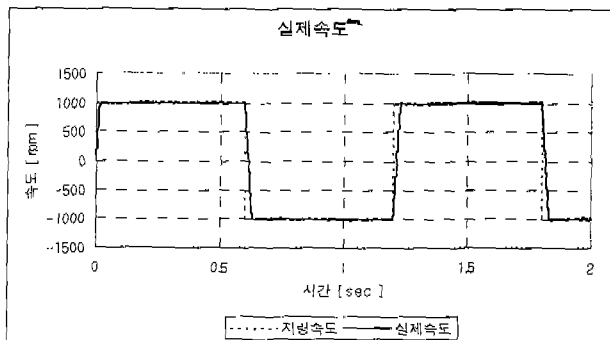


그림 2 실제속도

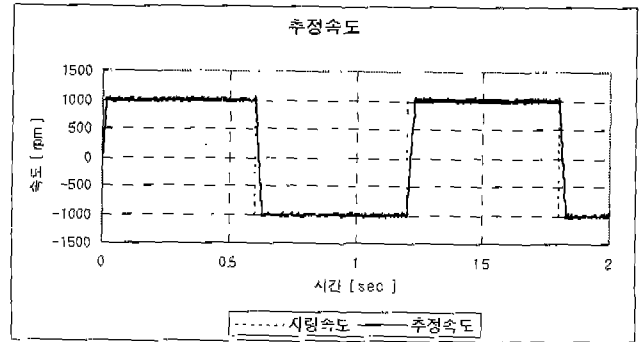


그림 3 추정속도

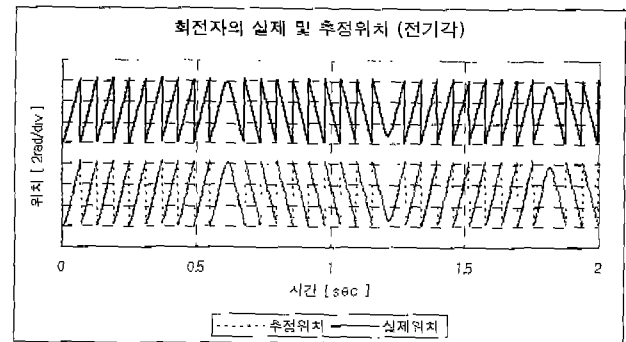


그림 4 회전자의 실제 및 추정위치

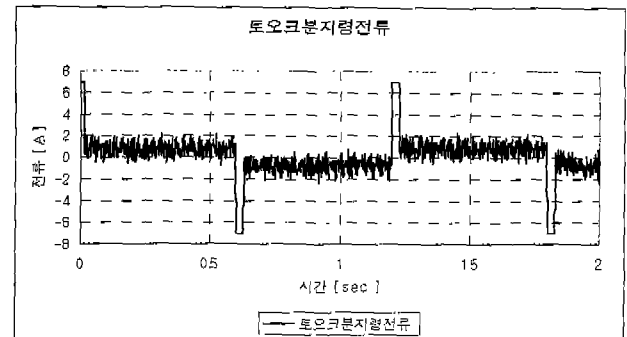


그림 5 토오크분 지령전류

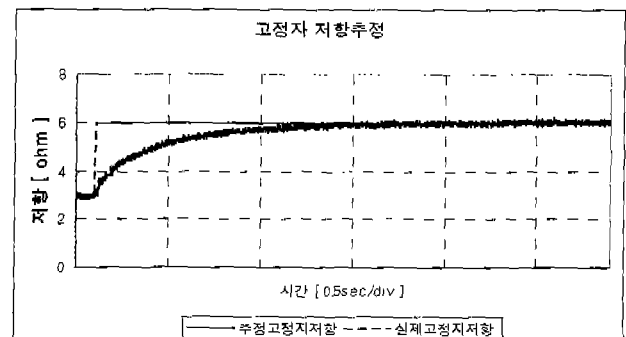


그림 6 고정자 저항 추정

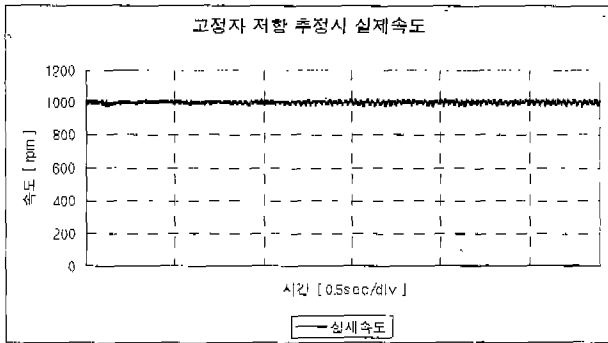


그림 7 고정자 저항 추정률 가졌을 때의 실제 속도

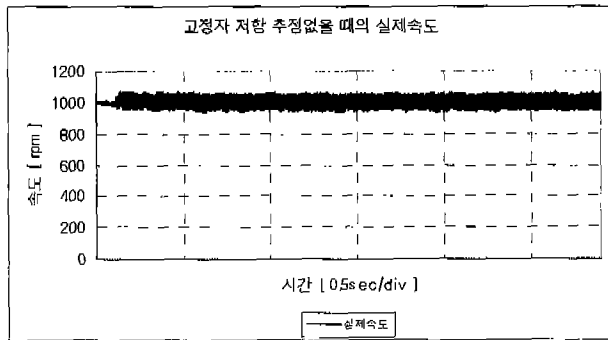


그림 8 고정자 저항 추정기를 갖지 않을 때의 실제속도

그림 6~그림 8은 정상상태에서 고정자 저항을 스텝적으로 200% (3Ω→6Ω) 변동하였을 때의 모의실험결과이다. 그림 6은 고정자 저항 추정특성을 보여주고 있다. 저항값을 추정하는 데는 1.5[sec] 정도 걸리나, 실제 전동기 운전 중에 저항변동은 스텝적으로 급격히 변하지 않고 천천히 증가하므로 실제 시스템에서는 문제가 없으리라 사료된다. 그림 7은 저항 추정기를 갖는 시스템에서의 실제속도를 보여주고 있다. 고정자 저항이 변동하더라도 지령속도를 잘 쫓아가는 것을 볼 수 있다. 그림 8은 저항 추정기를 갖지 않고 속도추정기만을 이용하였을 때의 실제속도를 보여주고 있다. 결과에서 보는바와 같이 지령속도를 쫓아가고 있으나, 그림 7과 비교하였을 때 속도오차가 많을 것을 볼 수 있다.

6. 결 론

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

- 1) 제안한 관측기 시스템은 정상상태 뿐만 아니라 과도상태에서도 전동기의 속도 및 회전자의 위치를 잘 추정할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 저항 추정기는 저항변동값을 잘 추정할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 제안한 관측기 시스템은 저항 추정기를 갖기 때문에 고정자 저항 변동시에도 속도를 잘 추정할 수 있음을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [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.