

SPMSM의 SMO기반 센서리스제어에 따른 고/저속 구간에서의 추정 성능에 관한 연구

이현정, 김태규
국립창원대학교

A Study on the Estimation Performance of SPMSM in the Full Speed Section Based on Sensorless Control based on SMO

Hyeon-Jung Lee, Tae-Kue Kim
Changwon National University

ABSTRACT

SPMSM is being used in many fields due to its advantages of high efficiency and excellent control performance. There are many sensorless control technologies for location detection. In this paper, we analyzed the application and advantages of SMO control that reduces estimation error by not using velocity information for back electromotive force estimation in sensorless control based on SPMSM.

1. 서론

영구자석 동기 전동기는 높은 효율과 토크, 제어 성능이 우수하며 단순한 구조 및 쉬운 보수 특성으로 가전기기, 산업용 쓰이며 다양한 분야에 적용되고 있다. 일반적으로 회전자의 정확한 위치정보를 얻기 위해서는 엔코더, 레졸버 등의 위치 검출용 센서를 사용하여 위치정보를 얻게된다. 하지만, 위치 검출용 센서는 진동 및 온도 등의 환경에 민감하며 높은 가격으로 전체 시스템의 비용을 증가시킨다.^[1] 이를 해결하기 위해 위치 검출용 센서 대신 회전자의 위치 및 속도의 추정값을 사용하여 모터를 제어하는 센서리스 운전 방식의 연구가 진행되고 있다. 하지만, 위치 및 속도 추정을 위해 역기전력 추정을 할 때에 추정 속도가 사용되면 특정한 속도 영역에서 역기전력 추정 오차가 심해지는 경향이 있다.^[2] 본 논문에서는 속도 정보가 사용되지 않는 슬라이딩 모드 관측기 방식(Sliding Mode Observer, SMO)을 전 속도 영역 구간에서의 적용 및 이점에 대해 비교 분석하고 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

2. 본론

2.1 Sliding Mode Observer 방식

회전자의 위치 정보를 추정해야되므로 회전자의 위치와 무관한 고정자 측의 고정 좌표계를 모델식으로 사용된다.

$$\begin{bmatrix} p i_\alpha \\ p i_\beta \end{bmatrix} = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

이때 p 는 미분 연산자이다. 식 (1)는 고정자 전류를 상태변수로 하는 상태 방정식을 표현하였다.

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \omega_r \lambda_m \begin{bmatrix} -\sin\theta_r \\ \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} p \hat{i}_\alpha \\ p \hat{i}_\beta \end{bmatrix} = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} + K^* \text{sign} \left(\begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

여기서 K 는 관측기 이득이며 $\text{sign}(a) = a > 0 : 1, a < 0 : 0$ 우측 항은 관측기 전류 오차를 나타내어 슬라이딩 평면 s 는 관측기의 추정 오차인 추정 전류와 입력 전류의 차이로 정의된다.

$$\hat{\theta}_r = -\tan^{-1} \frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta} \quad (4)$$

$$\hat{\omega}_r = \frac{d\hat{\theta}_r}{dt} \quad (5)$$

회전자 위치는 식 (4), 속도는 식 (5)로 추정할 수 있다.

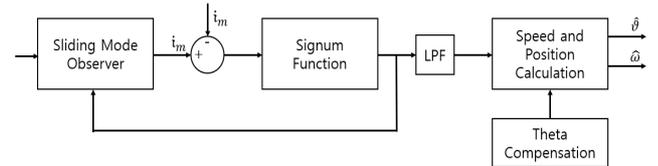


그림 1 SMO 방식에 의한 속도 추정
Figure 1 Estimation of Speed by SMO Method

2.2 전체 시스템 구성

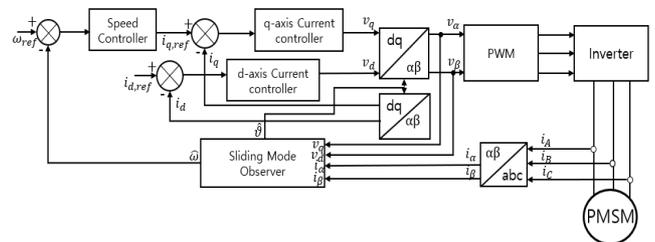


그림 2 SPMSM 센서리스 제어 시스템 블록도
Figure 2 SPMSM sensorless control system block diagram

그림 2는 본 논문에서 사용된 SPMSM 센서리스 제어 시스템 전체 블록도이다. 속도 기준값과 추정된 속도로부터 출력되는 속도 오차와 전류 제어는 PI 제어를 통해 제어된다. 발생한 기준 전류를 인버터를 거쳐 전동기에 입력된다. 슬라이딩 모드 관측기에서 α, β 축의 전압 전류를 이용하여 위치와 속도를 추정한다.

2.3 PMSM SMO 기반의 센서리스 시뮬레이션 설계

전동기는 SIEMENS 사의 FT6084-8SH7 PMSM 파라미터를 사용하였다. 그림 3은 PMSM SMO 기반 센서리스 제어 시스템을 MATLAB/SIMULINK를 활용하여 설계한 모습이다.

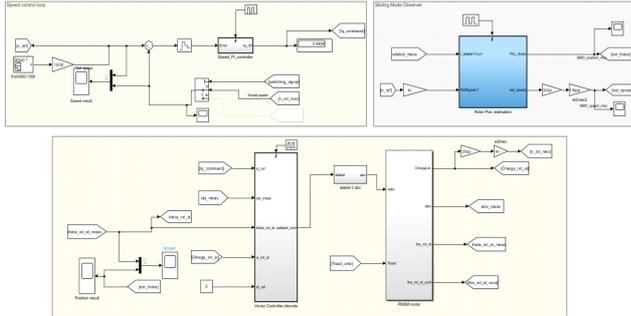


그림 3 SPMSM 센서리스 제어 시스템 블록도
Figure 3 SPMSM sensorless control system block diagram

2.4 시뮬레이션 결과 및 분석

기준 속도 300 [rpm]으로, 최대와 최소 속력을 2,000 [rpm], 20 [rpm]으로 설정하였다. 기준 속도 300 [rpm]에서 고속과 저속 영역으로 동작함에도 안정적인 속도 추정이 이루어지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 그림 4와 표 1을 통해 나타내었다.

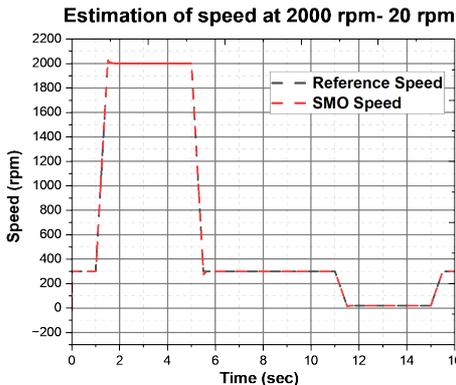


그림 4 2,000[rpm] - 20[rpm] 에서의 속도 추정
Figure 4 Estimated speed at 2000rpm-20rpm

표 1 속도 추정 오차값
Table 1 Rate Estimation Error Value

	속도값		오차(%)
	Max Reference	2000 rpm	
Base Speed 300rpm	Max Simulation	2030.6 rpm	1.8 %
	Min Reference	20 rpm	
	Min Simulation	15.3 rpm	1.7 %
	Settling Time		

고속 영역인 2,000 [rpm]과 저속 영역인 20 [rpm]에서 슬라이딩 모드 관측기를 통해 속도 추정이 안정적으로 되지만, 기준 속도에서 속도가 고/저속으로 크게 변화하면서 약간의 정착 시간과 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 오차값의 경우 안정적이라고 할 수 있는 1.7-1.8 [%]의 수치를 얻었다.

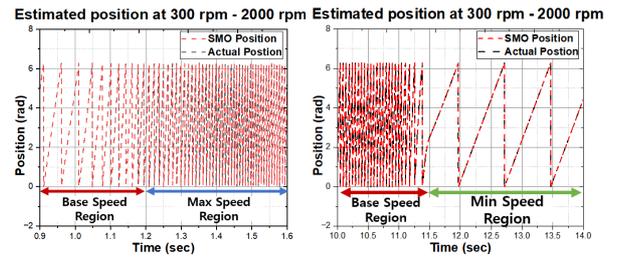


그림 5 변화하는 속도에 따른 위치 추정
Figure 5 Estimating the location according to the changing speed

그림 5는 슬라이딩 모드 관측기 방식에서 위치 추정을 한 결과이며 추정 위치는 추정된 역기전력으로부터 얻을 수 있다. 즉, 역기전력 추정에 오차 값이 크게 생긴다면 위치 또한 추정에 오류가 발생하게 된다. 하지만, 결과를 보았을 때 기준 속도 영역과 고/저속 영역에서 슬라이딩 모드 관측기 방식의 위치 추정이 안정적으로 추종하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 역기전력 추정 시 속도 정보가 사용되지 않는 슬라이딩 모드 관측기를 적용한 후 PMSM 센서리스 시스템을 MATLAB/SIMULINK 환경에서 설계하였다. 센서리스 시스템을 기준 속도 300 [rpm], 최대 속도 2,000 [rpm], 최소 속도 20 [rpm]으로 설정하여 저속 영역부터 고속 영역까지 모든 속도 영역에서 속도 추정과 위치 추정 동작을 확인해보았다. 모든 속도 영역에서 좋은 추정 성능인 것을 확인하였다. 특히, 고속 영역에서 오차값 1.8 [%], 저속 영역에서 1.7 [%], 정착 시간 1.8 [s]가 발생하였지만, 미세하며 안정적이라고 할 수 있는 결과를 얻었다.

이러한 시뮬레이션 결과는 모든 속도 영역에서 안정적이고 좋은 추정 능력으로 구동해야 하는 전기차나 하이브리드차 분야에서 쓰일 수 있을 것이라 기대한다.

본 과제(결과물)는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(2021RIS-003)

참고 문헌

[1] B.j. Son, Y.s. Seo, and M.J Lee. "Design of PMSM sensorless, high-speed controllable sliding mode observer." Journal of the Joint Conference of the Society of Control Robot Systems, pp. 19-22, 2009

[2] K.W. Lee, "Model based sensorless control technology of permanent magnet synchronous motors.", Journal of power electronics. , 21(3), pp. 27-33, 2016