

개선된 슬라이딩 모드 관측기에 의한 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어

유성래

(주)효성 중공업 연구소

Sensorless speed control of Permanent Magnet Synchronous Motor by an Improved Sliding Mode Observer

Ryu Sung Lay, Kim Ji Hyun, Lee In Woo

R&D center, Power & Industrial Performance Group, Hyosung Co.

ABSTRACT

Speed and torque controls of permanent magnet synchronous motors are usually attained by the application of position and speed sensors. However, speed and position sensors require the additional mounting space, reduce the reliability in harsh environments and increase the cost of a motor. Therefore, many studies have been performed for the elimination of speed and position sensors. This paper investigates an Improved sliding mode observer for the speed sensorless control of a permanent magnet synchronous motor. The proposed control strategy is the sliding mode observer with a variable boundary layer for a low-chattering and fast-reponse control. The proposed algorithm is verified through the simulation and experimentation.

1. 서론

영구자석 동기 전동기의 정확한 속도 및 토크 제어를 위해 회전자 속도뿐만 아니라, 회전자의 위치정보가 반드시 요구된다. 이는 계자 자속이 유도기와는 달리 영구자석에 의하여 형성되므로, 쇠교 자속의 위치에 따라 적절한 위상의 전류를 인가해야 요구되는 토크를 생성할 수 있기 때문이다.

회전자의 위치 및 속도 센서로는 홀 소자, 엔코더, 레졸버와 같은 센서들이 사용되고 있는데, 이는 센서 부착을 위한 추가적인 공간이 필요하고, 전동기의 가격상승의 요인이 되며, 극한 환경에서 신뢰성이 감소하는 문제가 있다. 따라서 이러한 문제점들을 고려하여 회전자의 위치 검출기나 속도센서 없는 센서리스 방식이 많이 연구되고 있다.

대부분의 센서리스 알고리즘은 전동기 방정식과 인가전압 및 측정된 상전류 정보로부터 자속 및 속도를 추정하게 되므로 전기적 및 기계적인 파라미터에 민감하다. 본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도 제어를 위해 개선된 슬라이딩 모드 관측기에 대해 연구하였다. 슬라이딩 모드 제어는 일반적으로 파라미터 변동과 시스템 외란에 강인한 특성을 가지고 있으나, 제어의 불연속성과 스위칭 동작에 의한 채터링을 유발하게 된다. 본 논문에서는 슬라이딩 함수인 전류 오차에 경계층을 설정하여 경계층내의 제어 입력을 연속 함수로 대체 시킴으로써 전류와 역기전력 추정 성분의 리플을 저감시키는

방법을 적용하였다. 한편 경계층을 지령속도와 관측기 이득에 따라 가변하도록 설정함으로써 광범위한 운전영역에 걸쳐 새로이 경계층을 설정하지 않도록 하였다. 슬라이딩 모드 관측기에 적용함에 있어 채터링을 저감시키고, 슬라이딩 모드 고유의 우수한 성능을 잃지 않음을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

2. 영구자석 동기전동기의 수학적 모델링

2상 고정자 기준 좌표계의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + L_s \frac{di_{\alpha s}}{dt} + e_{\alpha s} \tag{1}$$

$$v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + L_s \frac{di_{\beta s}}{dt} + e_{\beta s} \tag{2}$$

단, $R_s = R_a$, $L_s = \frac{3}{2} L_a$

R_a , L_a : 상권선의 등가 저항, 인덕턴스

여기서 $\alpha s - \beta s$ 축의 역기전력은 다음과 같다.

$$e_{\alpha s} = \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} = -w_r K_e \sin\theta_r \tag{3}$$

$$e_{\beta s} = \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} = -w_r K_e \cos\theta_r \tag{4}$$

단, θ_r : 회전자의 전기위치각, $w_r = \frac{d\theta_r}{dt}$,

$K_e = \sqrt{\frac{3}{2}} K_E$, K_E : 역기전력 상수

3. 개선된 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 센서리스 제어

본 논문에서는 슬라이딩 모드 관측기에 기초한 개선된 센서리스 제어 알고리즘을 제안한다. 일반적으로 슬라이딩 모드 관측기에 의한 센서리스 속도제어는 측정 전류와 추정전류 사이의 오차를 사용하여 슬라이딩 함수를 구하고 슬라이딩 함수를 치환하여 속도를 추정하는 방식을 사용한다. 고정자 기준 좌표계에서 고정자 전류를 상태변수로 하는 슬라이딩 모드 관측기의 상태 방정식은 식(1), (2)로부터 다음과 같다.

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bv_s + Ku(i_s - \hat{i}_s) \quad (5)$$

단, $\hat{\cdot}$: 추정치, K: 스윙칭 이득, u : 스윙칭 함수

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} \quad \mathbf{v}_s = \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -R_s/L_s & 0 \\ 0 & -R_s/L_s \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/L_s & 0 \\ 0 & 1/L_s \end{bmatrix}$$

식(5)에서 슬라이딩 관측기는 속응성이 빠르고, 시스템의 파라미터 변동과 외란에 강인한 장점을 가진다. 그러나 슬라이딩 모드 제어는 제어입력의 불연속성 때문에 정상상태에서 채터링을 유발하게 되고, 이 현상은 전동기 속도가 고속으로 갈수록 심해져 시스템 성능에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 슬라이딩 함수에 경계층을 설정하여 경계층 내의 제어 입력을 연속 함수로 대체시키고, 속도에 따른 가변 경계층을 설정함으로써 넓은 속도범위에서 채터링을 감소하고 속응성이 빠른 제어방식을 제안한다. 그림 1은 제안한 슬라이딩 모드 관측기의 가변 경계층을 나타낸다.

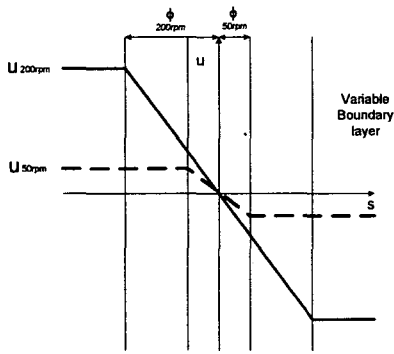


그림 1 가변 경계층을 가지는 제어입력

식(1), (2), (5)에서 역기전력은 식(5)의 우측 3번째 항으로부터 저역 통과 필터를 통하여 구한다.

$$\hat{e}_s = Ku(i_s - \hat{i}_s)_{eq} \quad (6)$$

회전자 위치각은 식(3), (4)와 식(6)의 추정된 역기전력 성분으로부터 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{\theta}_r = \tan^{-1}\left(-\frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}\right) \quad (7)$$

이상에서 제시한 센서리스 속도제어 시스템의 전체 구성도는 그림 2와 같다.

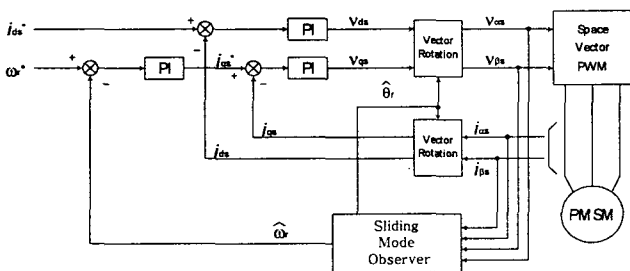


그림 2 전체시스템 구성도

4. 실험결과 및 검토

본 논문에서 제시한 센서리스 속도제어방식의 타당성을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션과 실험결과는 유사하게 구해졌으며 본 논문에서는 실험 결과만을 제시한다. 본 실험에 사용된 영구자석 동기전동기는 국내에서 생산되는 일반용 영구자석 동기전동기로서 3상 원통형이며 사양은 표1과 같다. 전체 알고리즘의 디지털 처리를 위해서 마이크로프로세서 시스템(80586/150MHz)을 이용하였으며 샘플링주기는 200usec이다.

표 1 전동기 사양

극수	8 pole
정격출력	750 W
정격전류	5.3 A
역기전력 상수(K_E)	0.132 Vsec/rad
고정자 권선저항(R_a)	1.0 Ω
고정자 인덕턴스(L_a)	4.17 mH
권선방식	Y 결선

그림 3(a)와 (b)는 본 논문에서 제시한 센서리스 제어 방식에 의해 무부하에서 속도지령치를 각각 25rpm, 1500rpm으로 한 경우의 속도응답 실험결과이다. 결과에서 나타난 바와 같이 저속과 고속에서 양호한 속도응답을 나타내고 있다.

그림 4(a)와 (b)는 종래의 슬라이딩 모드 관측기와 비교를 위하여 수행한 실험결과로서 무부하에서 속도지령치는 500rpm이다. 결과에서 나타난 바와 같이 가변경계층이 없는 종래의 슬라이딩 모드 관측기 방식은 정상상태에서 채터링이 크게 나타나고 있으며, 고속으로 갈수록 커져서 500rpm 이상에서는 속도제어가 거의 불가능하였다.

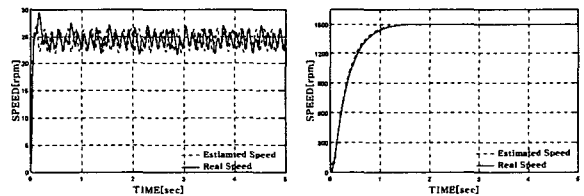


그림 3 속도응답 실험결과 (a) 25rpm (b) 1500rpm

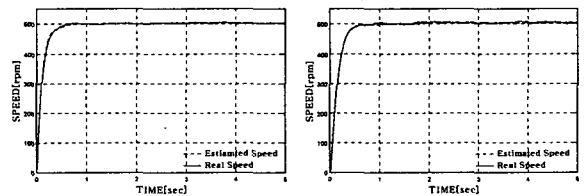
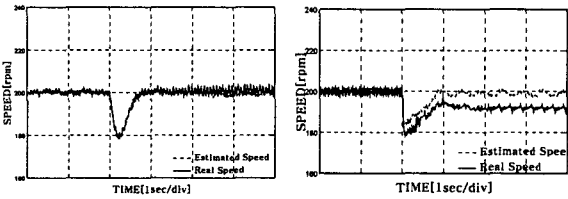


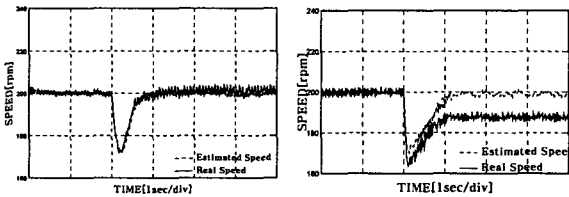
그림 4 속도응답 실험결과 (500rpm) (a) 제안한 슬라이딩 모드 관측기 (b) 기존 슬라이딩 모드 관측기

그림 5와 6은 전동기 고정자 저항의 변동 및 역기전력상수의 변동을 고려한 경우로서 각각 모델의 고정자 저항을 공칭값

보다 50% 증가한 경우와 역기전력상수를 공칭 값보다 20% 감소한 경우의 속도응답 실험결과이다. 그림 5는 200rpm으로 운전 중에 2Nm의 부하를 변동하였을 때의 속도 응답을 보여준다. 그림 6은 무부하에서 200rpm으로 운전 중에 역기전력상수를 변동하였을 때의 속도응답 실험결과를 보여준다. 또한 본 방식과 비교적 우수한 성능을 가지는 방식으로 잘 알려진 상태 관측기에 의한 방식을 비교하기 위하여 이들 방식에서 실험을 수행하였다. 결과에서 보면 파라미터 변동을 고려하는 경우에 강인한 제어방식으로 알려진 슬라이딩 모드 관측기 방식의 장점이 잘 나타나고 있다.



(a) (b)
 그림 5 고정자 저항 변동에서 속도응답 실험결과
 $(\hat{R}_s = 1.5R_s, 200\text{rpm})$ (a) 제안한 슬라이딩
 모드 관측기 (b) 상태관측기



(a) (b)
 그림 6 역기전력상수 변동에서 속도응답 실험결과
 $(\hat{K}_e = 0.8K_e, 200\text{rpm})$ (a) 제안한 슬라이딩 모드
 관측기 (b) 상태 관측기

5. 결론

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어방식으로서 개선된 슬라이딩 모드 관측기를 제안하였다. 슬라이딩 모드 관측기는 추정전류와 측정전류의 오차를 이용하여 슬라이딩 함수를 구하고, 슬라이딩 함수는 치환되어 역기전력을 추정하는데 이용한다. 본 논문에서 개선한 슬라이딩 모드제어는 빠른 응답 특성과 채터링 저감을 위하여 슬라이딩 모드 관측기에 가변 경계층을 사용하였다. 제안한 센서리스 제어방식을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증한 결과, 저속 및 고속 운전에서 양호한 속도응답을 나타내었으며, 고정자저항 변동 및 역기전력상수 변동을 고려한 경우에 강인한 속도응답을 나타내었다.

참고 문헌

[1] Edited by K. Rajashekara, A. Kawamura and K. Matsuse, Sensorless Control of AC Motor Drives, IEEE Press, 1996.

[2] J. Holtz, "State of the Art of Controlled AC Drives without Speed Sensors," Int. J. Electronics, Vol.80, No.2, pp. 249-263, 1996.
 [3] P. Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford Univ. Press, 1998.
 [4] V. I. Utkin, "Sliding Mode Control Design Principles and application to Electric Drives," IEEE Trans Industrial Electronics, Vol.40, No.1, pp.23-36, 1993.
 [5] Z. Yan and V. Utkin, "Sliding Mode Observers for Electric Machines - An Overview," IEEE, IECON, pp.1842-1847, 2002.
 [6] Z. M. A. Peixoto, P. F. Seixas, B. R. Menezes, and P. C. Cortizo, "Speed control of permanent magnet motors using sliding mode observers for induced EMF position and speed estimation," IEEE, IECON, pp.1023-1028, 1995.
 [7] C. Li and M. Elbuluk, "A Sliding Mode Observer for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors," IEEE IAS Annual Meeting. Conference Record, pp. 1273-1278, 2001.