

개선된 슬라이딩 모드 관측기에 의한 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어

速報論文
53B-11-7

Sensorless Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor by an Improved Sliding Mode Observer

金 暎 三* · 柳 晟 來** · 權 營 顏†
(Young-Sam Kim · Sung-Lay Ryu · Young-Ahn Kwon)

Abstract - Many studies have been performed for the elimination of speed and position sensors which require the additional mounting space, reduce the reliability in harsh environments and increase the cost of a motor. This paper investigates an improved sliding mode observer for the sensorless speed 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-response control. The proposed algorithm is verified through the simulation and experimentation.

Key Words : Permanent Magnet Synchronous Motor, Sensorless Control, Sliding Mode Observer, Variable Boundary Layer

1. 서 론

영구자석 동기전동기에 의한 가변속 구동시스템이 산업현장과 가전기에 광범위하게 활용되고 있으며 최근에는 설치환경, 가격 등의 제약으로 인하여 위치 및 속도센서를 사용하지 않는 센서리스 속도제어가 많이 연구되고 있다.

영구자석 동기전동기의 센서리스제어에 관한 연구로서 고정자전압 및 전류 값을 측정하여 전동기 방정식으로부터 속도를 추정하는 방식, 관측기에 의해 자속 및 역기전력을 추정하고 속도정보를 얻는 방식, 시스템이 잡음의 영향을 받을 경우에 최적의 필터링 알고리즘인 칼만 필터를 이용하는 방식, 유도전동기제어에서 잘 알려진 방식으로서 두 추정기 모델로부터 구한 추정치의 차이를 적응메카니즘에 적용시킴으로써 속도를 추정하는 방식, 가변구조 제어방식인 슬라이딩 모드 관측기에 의한 방식, 기계적 구조에 의한 전압 및 전류 고조파를 분석하여 속도를 추정하는 방식, 인공지능을 활용하는 제어 방식 및 직접토크제어를 활용하는 방식 등이 있다[1-4].

본 논문은 영구자석 동기전동기의 여러 가지 센서리스 속도제어 방식 중 비교적 최근에 많은 연구가 이루어지는 슬라이딩 모드 관측기 방식의[5-9] 개선에 대한 연구이다. 일반적으로 슬라이딩 관측기는 속응성이 빠르고, 시스템의 파라미터 변동과 외란에 강인하며 구현하기 쉽다는 장점을 가진다. 그러나, 슬라이딩모드제어는 제어입력의 불연속성 때문에 정상

상태에서 채터링을 유발하게 되고 이 현상은 전동기 속도가 고속으로 갈수록 심해져 시스템 성능에 큰 영향을 미친다.

본 논문에서는 슬라이딩 함수에 경계층을 설정하여 경계내의 제어 입력을 연속 함수로 대체시키고, 속도에 따른 가변 경계층을 설정함으로써 넓은 속도범위에서 채터링을 감소하고 속응성이 빠른 제어방식을 제안한다. 본 논문에서 제시된 방식은 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행하여 검증하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과는 유사하므로 본 논문에서는 실험결과만을 제시한다.

2. 영구자석 동기전동기의 수학적 모델

3상 원통형 영구자석 동기전동기에서 좌표변환에 의하여 2상 고정자 기준 좌표계 $\alpha s - \beta s$ 축으로 전압방정식을 나타내면 다음과 같다.

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

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

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

R_a, L_a : 상권선의 등가저항, 등가 인덕턴스

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

$$e_{\alpha s} = \frac{d\Psi_{\alpha t}}{dt} = -\omega_r K_e \sin \theta_r \quad (3)$$

$$e_{\beta s} = \frac{d\Psi_{\beta t}}{dt} = \omega_r K_e \cos \theta_r \quad (4)$$

† 교신저자, 正會員 : 釜山大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : yakwon@pusan.ac.kr

* 正會員 : 釜山大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正會員 : 釜山大 工大 電氣工學科 碩士

接受日字 : 2004年 9月 6日

最終完了 : 2004年 9月 30日

단, θ_r : 회전자의 전기 위치각, $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$,

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

3. 슬라이딩 모드 관측기에 의한 센서리스 제어

본 논문에서 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어방식으로서 개선된 슬라이딩 모드 관측기 방식을 제시한다. 일반적으로 슬라이딩 모드 관측기에 의한 센서리스 속도제어는 추정 전류와 측정전류의 오차를 이용하여 슬라이딩 함수를 구하고, 슬라이딩 함수를 치환하여 속도를 추정하는 방식을 사용한다. 고정자 기준 좌표계에서 고정자전류를 상태변수로 하는 슬라이딩 모드 관측기의 상태방정식은 식(1), (2)로부터 다음과 같다[7,8].

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

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

$$x = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix}, \quad v_s = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \end{bmatrix},$$

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

식(5)에서 슬라이딩 관측기는 속응성이 빠르고, 시스템의 파라미터 변동과 외란에 강한 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 제어입력을 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

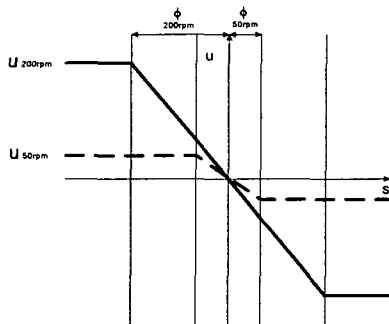


그림 1 가변 경계층을 가지는 제어 입력
Fig. 1 Control input with a variable boundary layer

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.

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

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

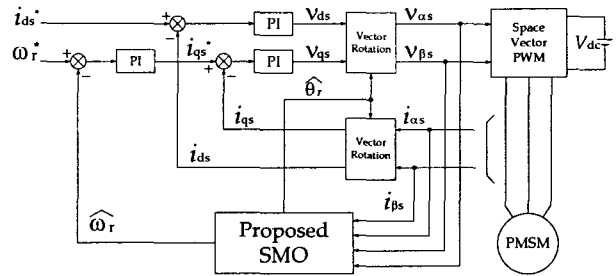


그림 2 전체시스템 구성도
Fig. 2 Configuration of overall system

4. 실험결과 및 검토

본 논문에서 제시한 센서리스 속도제어방식의 타당성을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션과 실험결과는 유사하게 구해졌으며 본 논문에서는 실험결과만을 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 200μsec이다.

표 1 전동기 사양

Table 1 Motor specification

극수	8 pole
정격출력	750 W
정격전류	5.3 A
역기전력상수(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 관측기방식은 정상상태에서 채터링이 크게 나타나고 있으며, 고속으로 갈수록 커져서 500rpm 이상에서는 속도제어가 거의 불가능하였다.

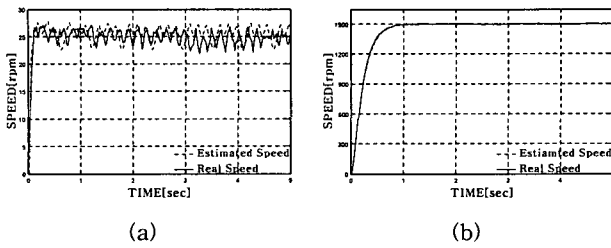


그림 3 속도응답 실험결과 (a) 25rpm (b) 1500rpm
 Fig. 3 Experimental speed responses (a)25rpm (b)1500rpm

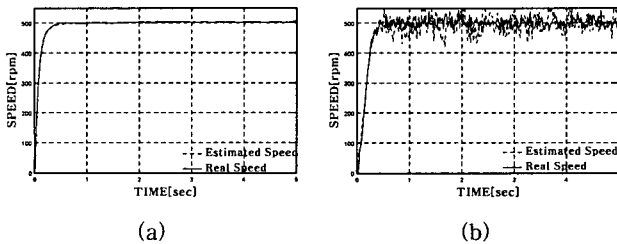


그림 4 속도응답 실험결과 (500rpm) (a) 제안한 슬라이딩 모드 관측기 (b) 종래의 슬라이딩 모드 관측기
 Fig. 4 Experimental speed responses (500rpm) (a) Proposed sliding mode observer (b) Conventional sliding mode observer

그림 5와 6은 전동기 고정자 저항의 변동 및 역기전력상수의 변동을 고려한 경우로서 각각 모델의 고정자 저항을 공칭 값보다 50% 증가한 경우와 역기전력상수를 공칭 값보다 20% 감소한 경우의 속도응답 실험결과이다. 그림 5는 200 rpm으로 운전 중에 2Nm의 부하를 변동하였을 때의 속도 응답을 보여준다. 그림 6은 무부하에서 200rpm으로 운전 중에 역기전력상수를 변동하였을 때의 속도응답 실험결과를 보여 준다. 또한 본 방식과 비교적 우수한 성능을 가지는 방식으로 잘 알려진 상태관측기에 의한 방식들[1-3] 비교하기 위하여 이들 방식에서 실험을 수행하였다. 결과에서 보면 파라미터 변동을 고려하는 경우에 강인한 제어방식으로 알려진 슬라이딩 모드 관측기 방식의 장점이 잘 나타나고 있다.

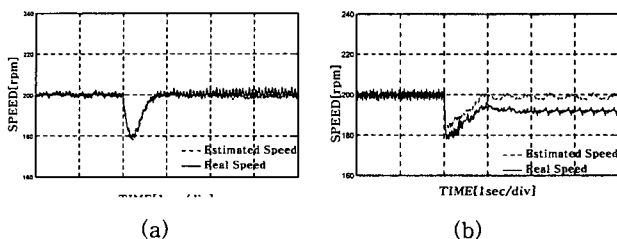


그림 5 고정자저항 변동에서 속도응답 실험결과($R_s = 1.5R_s$, 200rpm) (a) 제안한 슬라이딩 모드 관측기 (b) 상태 관측기
 Fig. 5 Experimental speed responses in the stator resistance variation ($R_s = 1.5R_s$, 200rpm) (a) Proposed sliding mode observer (b) State observer

5. 결 론

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어방식

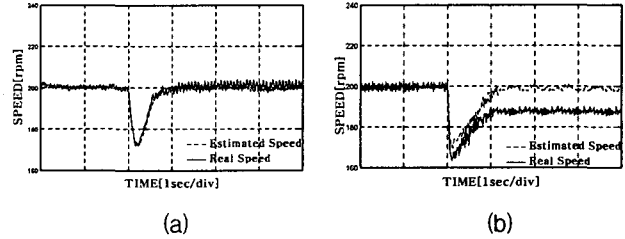


그림 6 역기전력상수 변동에서 속도응답 실험결과($\kappa_e = 0.8\kappa_e$, 200rpm) (a) 제안한 슬라이딩 모드 관측기 (b) 상태 관측기
 Fig. 6 Experimental speed responses in the back EMF constant variation ($\kappa_e = 0.8\kappa_e$, 200rpm) (a) Proposed sliding mode observer (b) State observer

으로서 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 모드 제어는 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.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술재단 목적기초연구(R05-2003-000-11955-0)지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] 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] Y. S. Kim, S. K. Kim and Y. A. Kwon, "MRAS based sensorless control of permanent magnet synchronous motor," Proc SICE, pp. 132-137, 2003.
- [5] 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.
- [6] Z. Yan and V. Utkin, "Sliding mode observers for electric machines-an overview," IEEE Proc IECON, pp. 1842-1847, 2002.

- [7] 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 Proc IECON, pp. 1023-1028, 1995.
- [8] C. Li and M. Elbuluk, "A sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motors," IEEE IAS Annual Meeting, pp. 1273-1278, 2001
- [9] Y. S. Kim, S. L. Ryu and Y. A. Kwon, "An improved sliding mode observer of sensorless permanent magnet synchronous motor," Proc SICE, pp. 192-197, 2004.