

개선된 슬라이딩 모드 적응 관측기를 이용한 PMSM 센서리스 제어

*전찬성, *엄위섭, **강임용, 이장명
 **부산대학교 전자공학과

Sensorless Vector Control of PMSM Using An Improved Sliding Mode Adaptive Observer

*ChanSung Jeon, *WeSub Eom, **ImYong Kang, JangMyung Lee
 *, **Department of Electronics Engineering, Pusan National University

Abstract - 본 논문은 파라미터 변동에 잘 적응하며 강인한 영구자석 동기전동기의 위치센서 없는 센서리스 제어를 위해 개선된 슬라이딩 모드 관측기에 고정자 저항 추정기능을 추가한 새로운 슬라이딩 모드 적응 관측기를 제안한다. 제안된 관측기는 개선된 슬라이딩 모드 관측기를 사용함으로써 기존의 슬라이딩 모드 관측기에서 채터링(Chattering) 문제 해결을 위해 저역통과필터(Low-pass filter)의 사용 및 추가적인 회전자 위치보상을 Sigmoid 함수를 스위칭 함수로 사용하므로 제거 할 수가 있다. 또한 고정자 저항 추정기능을 추가하여 센서리스 운행 중 환경적 요인으로 인한 고정자 저항값의 변동이나 초기에 고정자 저항값을 잘못 알고 있더라도 빠른 적응을 통해서 추정오차를 절감시켜 전동기의 속도추정 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 기존의 적응 슬라이딩 모드 관측기에서의 적분연산을 줄임으로써 제어시스템의 성능을 개선시켰다. 제안된 관측기의 안정성은 Lyapunov 후보 함수를 이용하여 관측기의 이득을 설정함으로써 검증하였으며 관측기의 성능은 시뮬레이션을 통한 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

최근 들어 공작기계나 산업용 로봇, 전기자동차 등의 구동을 위한 서보 운전용으로 직류전동기 대신 교류전동기의 사용이 급격히 증대되고 있다. 교류전동기는 직류전동기에 비해 제어기의 구성이 복잡하지만 전동기의 정류작용을 전기적 스위칭으로 대신하기 때문에 기계적 마모에 따른 유지보수가 필요 없고 동급용량의 직류전동기에 비해 크기를 줄일 수 있다. 일반적으로 교류전동기 중에서 유도전동기(Induction Motor : IM)와 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor : PMSM)는 가변속 응용의 교류전동기 드라이브 시스템에서 가장 널리 사용된다. 유도전동기는 다른 전동기에 비해 구조적으로 튼튼하며 제작이 용이하다는 장점이 있으나 영구자석 동기전동기에 비해 효율(Efficiency), 속응성(Dynamic Performance) 및 파워밀도(Power Density) 등이 떨어지는 단점이 있다[1].

PMSM은 회전자의 영구자석으로부터 정현파 형태의 자속을 공급받기 때문에 회전자의 정확한 위치를 알아야 벡터제어를 원활히 수행할 수 있다. 일반적으로 회전자의 위치정보를 얻기 위해 레졸버(Resolver)나 절대엔코더(Absolute Encoder)등의 위치 검출기가 필요하다. 하지만 이러한 위치 검출기는 가격이 고가일 뿐만 아니라 진동 및 온도 등의 환경적 제약과 전동기의 부피증가의 문제가 발생하게 된다[2]. 이와 같은 문제점을 극복하고자 위치센서를 사용하지 않고 간접적으로 회전자의 위치 및 속도를 추정하는 센서리스 제어에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다[3-6].

본 논문은 기존의 슬라이딩 모드 관측기의 성능을 개선한 관측기에 고정자 저항 추정기능이 추가된 새로운 PMSM의 센서리스 제어기법을 제안한다. 제안된 관측기는 슬라이딩 모드 제어이론을 적용하여 관측기의 강인성 및 설계의 용이함을 얻을 수 있다. 제안된 관측기가 안정하도록 리아프노프(Lyapunov) 함수를 설정하고 이로부터 관측기 이득을 설계하였다. 또한 개선된 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 속도 및 회전자의 위치를 추정하였으며, Lyapunov 함수로부터 도출된 추정식을 이용하여 고정자 저항을 추정함으로써 운전 중 변동 가능한 고정자 저항에 대한 변화를 고려하여 속도 및 회전자 위치를 추정할 수가 있다.

2. 본 론

2.1 PMSM MODEL

관측기를 구성하기 위해서는 전동기에 대한 모델식이 필요하다. PMSM의 센서리스 제어의 경우 회전자의 위치정보가 추정에 의한 것이므로 회전자의 위치와 무관한 고정자 축의 정지좌표계 모델식이 요구된다.

정지좌표계의 전압방정식에서 고정자 전류를 상태변수로 하는 상태방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_{\alpha} &= -\frac{R_s}{L_s} i_{\alpha} - \frac{1}{L_s} e_{\alpha} + \frac{1}{L_s} v_{\alpha} \\ \frac{d}{dt} i_{\beta} &= -\frac{R_s}{L_s} i_{\beta} - \frac{1}{L_s} e_{\beta} + \frac{1}{L_s} v_{\beta} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, i, e, v 는 각각 정지좌표계의 $\alpha-\beta$ 축의 전류, 역기전력, 전압을 나타내며, R_s 및 L_s 는 고정자 저항과 인덕턴스를 나타낸다.

회전자의 속도가 천천히 변화한다고 가정하면 ($\dot{\omega} \approx 0$), 역기전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{\alpha} = -\omega_r e_{\beta}, \quad e_{\beta} = -\omega_r e_{\alpha} \quad (2)$$

2.2 개선된 슬라이딩 모드 관측기[7]

기존의 슬라이딩 모드 관측기는 스위칭 함수로 이산시간 함수를 사용하여 발생하는 채터링(Chattering) 문제 해결과 역기전력을 추정하기 위해 저역통과필터(Low-pass filter)를 사용하였으며, 이로 인한 시간적 지연에 따른 회전자의 위치를 별도로 보상해 주어야 하는 단점이 있다[8]. 하지만 개선된 슬라이딩 모드 관측기에서는 sigmoid 함수를 스위칭 함수로 사용하여 Chattering 문제와 상태변수의 리플(ripple)을 감소시킴으로써 Low-pass filter를 사용하지 않고도 역기전력 추정이 가능하며 별도의 회전자 위치를 보상해 주지 않아도 된다.

sigmoid 함수는 다음과 같이 정규화 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H(\bar{i}_{\alpha}) \\ H(\bar{i}_{\beta}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{2}{1 + \exp(-a\bar{i}_{\alpha})} \right) - 1 \\ \left(\frac{2}{1 + \exp(-a\bar{i}_{\beta})} \right) - 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

a 는 sigmoid 함수의 기울기를 조정하는 양의 상수를 나타내며, $\bar{i}_{\alpha} = \hat{i}_{\alpha} - i_{\alpha}$, $\bar{i}_{\beta} = \hat{i}_{\beta} - i_{\beta}$ 는 각각 고정자 α, β 전류의 추정오차를 나타낸다. 슬라이딩 모드 존재 조건을 찾기 위한 Lyapunov 함수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

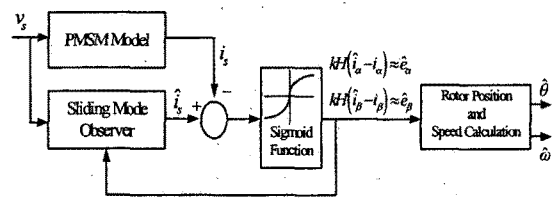
$$V = \frac{1}{2} s^T s = \frac{1}{2} (s_{\alpha}^2 + s_{\beta}^2) \quad (4)$$

$s_{\alpha} = \bar{i}_{\alpha}$, $s_{\beta} = \bar{i}_{\beta}$ 를 각각 나타내며 만약, $\dot{V} = s^T \dot{s} < 0$ 을 만족하게 되면 슬라이딩 모드가 존재하게 되며, 슬라이딩 모드가 일어나게 되면 슬라이딩 평면은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} s_{\alpha} \\ s_{\beta} \end{bmatrix}^T = [s_{\alpha} \ s_{\beta}]^T = [0 \ 0] \quad (5)$$

식(5)에 의해서 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} (kH(\bar{i}_{\alpha}))_{eq} &= \hat{e}_{\alpha} \\ (kH(\bar{i}_{\beta}))_{eq} &= \hat{e}_{\beta} \end{aligned} \quad (6)$$



〈그림 1〉 개선된 슬라이딩 모드 관측기

그림1은 개선된 슬라이딩 모드 관측기의 블록도를 나타낸 그림으로 sigmoid 함수를 이용한 연속적인 슬라이딩 모드 제어를 통해서 Chattering 문제는 해결되며, 식(6)의 역기전력 식은 회전자의 속도와 위치를 계산하기 위해 직접 사용될 수 있다.

2.3 제안한 슬라이딩 모드 관측기

제안한 관측기는 기존 슬라이딩 모드 관측기의 Chattering 문제를 개선시킨 관측기의 구조를 기반으로 하여 파라미터의 변동에 따른 추정오차의 영향을 저감시키고자 고정자 저항을 추정하는 적응제어를 도입하였다.

2.3.1 슬라이딩 모드 적응 관측기

식(1)의 정지좌표계에서의 PMSM 전류방정식에 의하여 슬라이딩 모드 관측기를 다음과 같이 구성한다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \hat{i}_{\alpha} &= -\frac{\hat{R}_s}{L_s} \hat{i}_{\alpha} + \frac{1}{L_s} v_{\alpha} - \frac{1}{L_s} kH(\hat{i}_{\alpha} - i_{\alpha}) \\ \frac{d}{dt} \hat{i}_{\beta} &= -\frac{\hat{R}_s}{L_s} \hat{i}_{\beta} + \frac{1}{L_s} v_{\beta} - \frac{1}{L_s} kH(\hat{i}_{\beta} - i_{\beta}) \end{aligned} \quad (7)$$

제한된 관측기는 스위칭 함수로 sigmoid 함수를 사용하여 Chattering 문제를 해결하고, 전동기의 고정자 저항값도 동시에 추정하므로 고정자 저항이 R_s 가 아닌 \hat{R}_s 로 나타나 있음을 확인할 수 있다. 제한된 관측기의 슬라이딩 평면 s 는 $(s = [s_\alpha \ s_\beta]^T = [\hat{i}_\alpha - i_\alpha \ \hat{i}_\beta - i_\beta]^T)$ 실제전류와 추정전류의 오차로 정의한다.

2.3.2 고정자 저항 추정 및 관측기 이득 k

PMSM의 센서리스 제어에서 파라미터 변동에 강한 전동기의 고정자 저항을 추정하기 위하여 Lyapunov 함수를 다음과 같이 설정한다.

$$V = \frac{1}{2} s^T s + \frac{1}{2} (\hat{R}_s - R_s)^2 \quad (8)$$

한 추정주기 내에서 전동기의 속도가 일정하다고 가정하고 식(8)을 미분한 식과 슬라이딩 평면 s 를 미분한 식을 이용하면 Lyapunov 함수의 미분값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V} = s^T [(\hat{A} - A)\hat{i}_s + A(\hat{i}_s - i_s) + B(e_s - kH(\hat{i}_s))] + \hat{R}_s \hat{R}_s \quad (9)$$

여기서, $\hat{A} = -\frac{\hat{R}_s}{L_s} I$, $A = -\frac{R_s}{L_s} I$, $B = \frac{1}{L_s} I$, $\hat{R}_s = \hat{R}_s - R_s$ 를 각각 나타내며, 관측기의 시스템이 안정하기 위해서는 Lyapunov 안정도 이론으로부터 $V > 0$ 일 때, $\dot{V} < 0$ 를 만족해야 하므로 식(9)를 다음과 같이 나타낸다.

$$s^T [(\hat{A} - A)\hat{i}_s] + \hat{R}_s \hat{R}_s = 0 \quad (10)$$

$$s^T [A(\hat{i}_s - i_s) + B(e_s - kH(\hat{i}_s))] < 0 \quad (11)$$

식(10)으로부터 다음의 고정자 저항 추정식을 얻을 수 있다.

$$\hat{R}_s = \frac{1}{L_s} (\hat{i}_\alpha \hat{i}_\alpha + \hat{i}_\beta \hat{i}_\beta) \quad (12)$$

추정 전류값과 슬라이딩 평면을 이용하여 고정자 저항값에 대한 미분값을 추정할 수 있음을 알 수 있으며, 추정된 고정자 저항값은 식(12)를 적용하여 얻을 수 있다.

제한된 슬라이딩 모드 관측기가 안정하기 위해서는 식(11)을 만족하는 관측기 이득을 구해야 한다. 식(11)을 정리하면 다음과 같다.

$$-\frac{R_s}{L_s} ((\hat{i}_\alpha)^2 - (i_\alpha)^2) + \frac{1}{L_s} (e_\alpha \hat{i}_\alpha - \hat{i}_\alpha kH(\hat{i}_\alpha)) + \frac{1}{L_s} (e_\beta \hat{i}_\beta - \hat{i}_\beta kH(\hat{i}_\beta)) < 0 \quad (13)$$

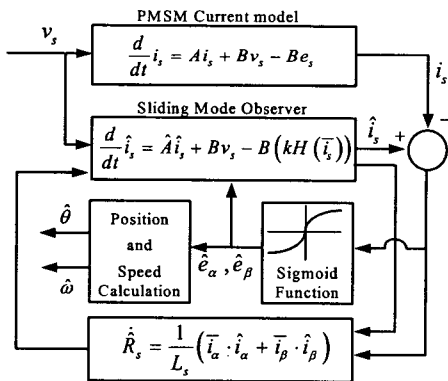
식(13)으로부터 관측기의 이득을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$k \geq \max(|e_\alpha|, |e_\beta|) \quad (14)$$

식(14)를 만족하도록 관측기 이득을 설정하면, 제한된 관측기는 전체적으로 안정하게 되며, 식(6)과 같이 역기전력을 추정할 수 있다. 추정된 역기전력을 이용하여 회전자 위치 및 속도를 추정할 수가 있게 된다.

2.3.3 개선된 슬라이딩 모드 적응 관측기

다음은 제안한 개선된 슬라이딩 모드 적응 관측기의 블록도를 나타낸다.



〈그림 2〉 제안한 슬라이딩 모드 적응 관측기

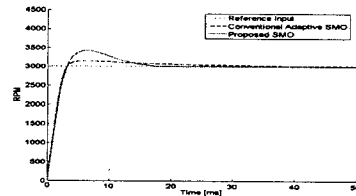
기존의 적응 슬라이딩 모드 관측기는 회전자의 위치, 속도 및 고정자 저항을 동시에 추정하는 구조로 회전자의 위치와 속도를 얻기 위해 다음의 적분 연산을 수행한다[9].

$$\hat{\omega}_r = \int \hat{\omega}_r, \hat{\theta} = \int \hat{\omega}_r \quad (15)$$

이러한 적분연산을 실제 시스템 상에서 구현을 하게 위해서 주로 디지털 Low-pass filter를 사용하며 이러한 filter의 사용은 Time-delay를 유발 시키므로 시스템의 성능을 저하시키는 요인이 된다. 반면에 본 논문의 저자가 제안한 관측기의 구조는 파라미터 변동에 따른 추정오차의 영향을 저감시키기 위해 기존의 적응제어를 유지하고 회전자의 위치 및 속도를 얻기 위해 개선된 슬라이딩 모드 관측기를 적용하여 회전자의 위치 및 속도를 식(16)과 같이 구함으로써 시스템의 성능을 개선할 수 있었다.

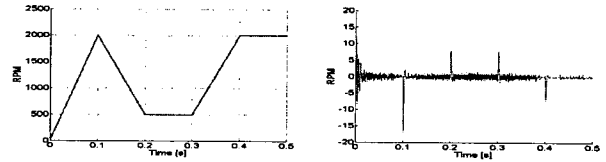
$$\hat{\theta} = -\tan^{-1} \left(\frac{e_\alpha}{e_\beta} \right), \hat{\omega}_r = \frac{d}{dt} \hat{\theta} \quad (16)$$

2.3.4 시뮬레이션 실험



〈그림 3〉 Step 입력에 따른 응답특성

그림3은 기존의 적응 슬라이딩 모드와 제안한 슬라이딩 모드 관측기에 3000rpm의 step 입력에 대한 순수 알고리즘의 속도 응답특성을 시뮬레이션한 결과로 기존의 방식에 비해 응답특성이 빠른 것을 확인할 수 있다. 그림4는 시간에 따라 빠르게 변하는 기준속도 변화에 대한 추정속도의 오차를 나타낸다.



〈그림 4〉 속도 변화에 대한 추정 오차

3. 결 론

본 논문에서는 파라미터 변동에 적응 강한 PMSM의 위치 센서없는 센서리스 시스템을 구현하기 위하여 슬라이딩 모드 제어 이론을 적용하였으며 슬라이딩 모드 제어에서의 Chattering 문제는 스위칭 함수를 sigmoid 함수로 사용한 개선된 슬라이딩 모드를 사용함으로써 해결하고 파라미터 변동에 따른 추정오차를 줄이기 위해 고정자 저항을 추정하는 기능을 추가하였다. 또한, 본 논문에서 제안된 관측기는 기존의 적응 슬라이딩 모드 관측기에서의 적분연산을 줄임으로써 시스템의 성능을 개선하는 효과를 나타내었으며 이는 시뮬레이션 실험을 통하여 확인하였다.

향후 연구에서는 고정자 저항 변동에 따른 응답특성 및 회전자의 위치 및 속도 추정에 관한 다양한 시뮬레이션 실험 및 실제 시스템에 적용한 실험을 통하여 제안한 관측기의 성능을 검증하는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산업자원의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Pillay and R. Krishnan, "Application characteristics of permanent magnet synchronous and brushless DC motor for servo drive," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 27, no. 5, pp. 986-996, Sept.-Oct. 1991.
- [2] F. Parasiliti, R. Petrella, M. Tursini, "Sensorless Speed Control of a PM Synchronous Motor by Sliding Mode Observer," *Proc. of the IEEE ISIE'97*, vol. 3, pp.1106-1111, July 1997.
- [3] R. Wu, G.R. Selmon, "A Permanent magnet motor drive without a shaft sensor," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 27, no. 5, pp.1005-1011, Sept.-Oct. 1991.
- [4] N. Matsui, M. Shigyo, "Brushless DC motor control without position and speed sensors," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 28, no. 1, pp.120-127, Jan.-Feb. 1992.
- [5] Jun Hu, Dongqi Zhu, YongDong Li, Jingde Gao, "Application of sliding observer to sensorless permanent magnet synchronous motor drive system," *IEEE PESC'94. Record*, vol. 1, pp.532-536, June 1994.
- [6] Li Changsheng, M. Elbuluk, "A sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motors," *IEEE IAS Annual Meeting*, vol. 2, pp.1273-1278, Sept.-Oct. 2001.
- [7] K. Paponpen, M. Konghirun, "An Improved Sliding Mode Observer for Speed Sensorless Vector Control Drive of PMSM," *CES /IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conf.*, vol. 2, pp.1-5, Aug. 2006.
- [8] T. Furuhashi, S. Sangwongwanich, S. Okuma, "A position-and-velocity sensorless control for Brushless DC motors using an adaptive sliding mode observer," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 39, no. 2, pp.89-95, April 1992.
- [9] Y S Han, J S Choi and Y S Kim "Sensorless PMSM Drive with a Sliding Mode Control Based Adaptive Speed and Stator Resistance Estimator," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 36, no. 5, pp.3588-3591, Sept. 2000.