

적분스위칭평면을 갖는 바이너리 관측기를 이용한 영구자석 동기전동기의 속도 및 위치센서리스 제어

한윤석*, 김영석*, 김현중**

* 인하대학교 전자·전기·컴퓨터 공학부, ** 유한대학 제어계측학과

A Speed Sensorless Vector Control for Permanent Magnet Synchronous Motors using the Integral Binary Observer

Yoon-seok Han, Young-seok Kim, Hyun-joong Kim

School of Electrical and Computer Eng, Inha Univ. Dept. of Control & Instrumentation, Yuhan College

Abstract

This paper presents a speed and position sensorless control of permanent magnet synchronous motors using an integral binary observer. In order to improve the steady state performance of the binary observer, the binary observer is formed by adding extra integral dynamics to the switching hyperplane equation. The observer structure and its design method are described. The experimental results of the proposed algorithm are presented to demonstrate the effectiveness of the approach.

1. 서론

최근 들어 영구자석 동기전동기(PMSM)는 관성비에 대한 토크 비율 및 효율이 다른 전동기에 비해 월등히 높다는 장점을 가지고 있어 산업응용분야에 폭 넓게 사용되고 있다. 그러나, 영구자석 동기전동기는 회전자에 부착되어진 영구자석으로부터 자속을 공급받기 때문에 벡터제어를 위해서는 항상 회전자의 정확한 위치 정보를 알아야한다. 따라서, 전동기 회전자의 정확한 위치정보를 얻기 위해서 레졸버나 Absolute Encoder 또는 홀소자 등의 자기센서를 이용한 전자식 위치검출기가 사용되어지고 있다. 이러한 위치검출기는 일반적으로 가격이 고가일 뿐만 아니라 별도의 복잡한 하드웨어를 제어기에 구성해야 하는 단점이 있다. 또한 진동 및 습도 등의 주위 환경에 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[1]~[3].

본 논문은 적분 스위칭평면을 갖는 바이너리 관측

기를 이용한 영구자석 동기전동기의 새로운 센서리스 제어를 제안한다. 제안된 방법은 바이너리 관측기를 사용하였기 때문에 파라미터 변동, 측정잡음 등에 대해 우수한 추정성능을 가지며 비선형 시스템에도 적용이 가능하다. 또한 적분스위칭평면을 이용하였기 때문에 추정값에 대한 정상상태 오차를 줄였다. 제안된 관측기를 사용한 센서리스 제어의 타당성은 실험을 통하여 확인하였다.

2. 적분 스위칭평면을 갖는 바이너리 관측기

고정자 좌표계 ($\alpha-\beta$)에서 PMSM의 수학적 모델링은 식 (1)과 같다[5].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} i_\alpha + \frac{K_E}{L_a} \omega \sin \theta + \frac{1}{L_a} v_\alpha \\ -\frac{R_a}{L_a} i_\beta - \frac{K_E}{L_a} \omega \cos \theta + \frac{1}{L_a} v_\beta \\ -\frac{D}{J} \omega + \frac{K_T}{J} (-i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta) - \frac{T_l}{J} \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

PMSM의 센서리스 제어를 위한 바이너리 관측기는 전 차원(full-order)관측기의 형식으로 전동기에서 측정할 수 있는 전류에 대한 관측을 행하고, 이를 이용하여 식 (1)중에서 기계 방정식에 대한 관측을 행함으로써 전동기의 속도에 대한 정보를 얻을 수 있다.

PMSM의 센서리스 제어를 위한 바이너리 관측기는 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \\ \hat{\omega} \\ \hat{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} \hat{i}_\alpha + \frac{K_E}{L_a} \hat{\omega} \sin \hat{\theta} + \frac{1}{L_a} v_\alpha \\ -\frac{R_a}{L_a} \hat{i}_\beta - \frac{K_E}{L_a} \hat{\omega} \cos \hat{\theta} + \frac{1}{L_a} v_\beta \\ -\frac{D}{J} \hat{\omega} + \frac{K_T}{J} (-\hat{i}_\alpha \sin \hat{\theta} + \hat{i}_\beta \cos \hat{\theta}) - \frac{T_l}{J} \\ \hat{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{여기서 } K_1 = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_1 \end{bmatrix}, K_2 = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}$$

또한, 식 (1)~(2)를 이용하여 오차방정식을 구할 수 있으며, 선형화되어진 오차방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{E}_1 \\ \hat{E}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}E_1 + F_{12}E_2 \\ F_{21}E_1 + F_{22}E_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } E_1 = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix}, E_2 = \begin{bmatrix} \hat{\omega} - \omega \\ \hat{\theta}_e - \theta_e \end{bmatrix}$$

$$F_{11} = \begin{bmatrix} -R_a/L_a & 0 \\ 0 & -R_a/L_a \end{bmatrix}$$

$$F_{12} = \frac{K_e}{L} \cdot \begin{bmatrix} \sin \theta_e & \omega \cos \theta_e \\ -\cos \theta_e & \omega \sin \theta_e \end{bmatrix}$$

$$F_{21} = \frac{K_t}{J} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \theta_e & \cos \theta_e \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{22} = \frac{1}{J} \cdot \begin{bmatrix} -D & -K_t(i_\alpha \cos \theta_e + i_\beta \sin \theta_e) \\ J & 0 \end{bmatrix}$$

바이너리 이론을 적용한 관측기는 슬라이딩 모드 관측기와 비교해서 슬라이딩 모드 이론의 단점인 떨림현상을 개선할 수 있다[6]. 그림 1은 기존에 제안된 바이너리 관측기의 상태궤적으로 설정된 관측기의 영역은 초평면과 수평인 것을 볼 수 있다. 즉, 실제전류와 추정전류와의 오차는 영역을 벗어나지 못하지만, 영으로 수렴하는 것을 보장할 수 없는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하고자, 적분스위칭평면을 갖는 바이너리 관측기를 제안한다. 제안된 바이너리 관측기의 상태궤적을 그림 2에 나타내었다. 그림으로부터 오차는 일단 바이너리 관측기의 경계면에 도달한후, $E_1=0$ 이 될 때까지 수평축으로 수렴해 들어간다.

제안된 적분 스위칭평면을 갖는 바이너리 관측기에서, 적분 스위칭평면 $\sigma(t)$ 는 다음과 같이 전류의 실제값과 추정값을 이용하여 정의한다.

$$\sigma = (\sigma_1, \sigma_2) = 0 \quad (4)$$

$$\text{여기서, } \sigma_1 = -c_1 \tilde{e}_{11} - \int_0^t \tilde{e}_{11} \tau, \quad \tilde{e}_{11} = \hat{i}_\alpha - i_\alpha$$

$$\sigma_2 = -c_2 \tilde{e}_{12} - \int_0^t \tilde{e}_{12} \tau, \quad \tilde{e}_{12} = \hat{i}_\beta - i_\beta$$

c_1, c_2 : 양의 상수

또한 바이너리 관측기에서 정의되는 영역 G_δ 는 다음과 같이 정의한다.

바이너리 관측기의 영역 :

$$G_\delta = \sigma^+(t) \sigma^-(t) \leq 0 \quad (5)$$

$$\sigma^+(t) = \sigma(t) - c \cdot \delta$$

$$\sigma^-(t) = \sigma(t) + c \cdot \delta \quad 0 \leq \delta < 1$$

바이너리 관측기의 주루프 조정기와 보조루프 조정기는 다음과 같다.

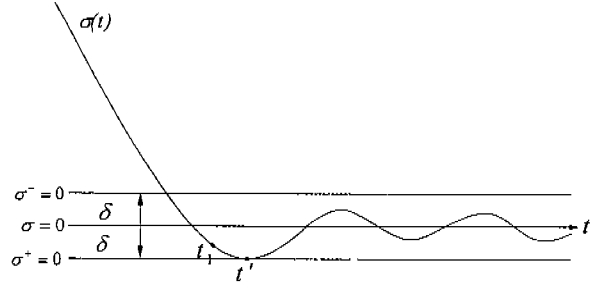


그림 1. 기존 바이너리 관측기의 상태궤적

Fig. 1. Phase plane trajectory of the conventional binary observer

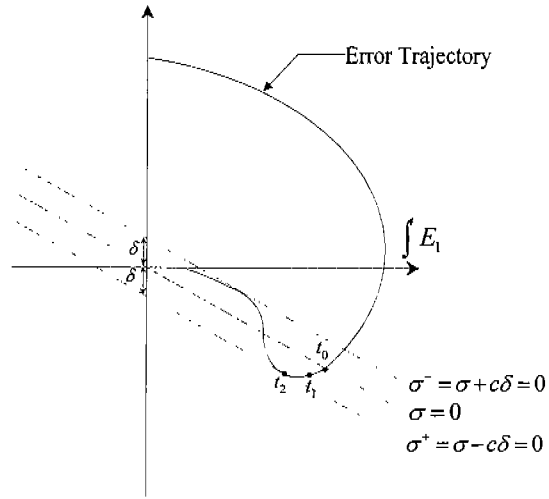


그림 2. 제안된 바이너리 관측기의 상태궤적

Fig. 2 Phase plane trajectory of the proposed binary observer

주루프조정기 :

$$\begin{bmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_\alpha & \tilde{e}_{11} \\ \mu_\beta & \tilde{e}_{12} \end{bmatrix} \quad (6)$$

보조루프조정기 :

$$\begin{bmatrix} \dot{\mu}_\alpha \\ \dot{\mu}_\beta \end{bmatrix} = -\alpha \begin{bmatrix} \mu_\alpha + \text{sat}(\lambda_1) \\ \mu_\beta + \text{sat}(\lambda_2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, $\lambda_1 = \sigma_1/c_1\delta, \lambda_2 = \sigma_2/c_2\delta$

그림 3은 제안된 바이너리 관측기의 블록도이다.

바이너리 이론에서 오차가 영역 G_δ 를 떠나지 않고 영역안에 머물하게 하는 조건을 G_δ 불변조건이라하며, 이 조건은 슬라이딩모드 존재조건과 유사하다. 따라서 G_δ 불변조건을 만족하도록 주루프 및 보조루프 조정기의 이득을 설정하면 슬라이딩 모드 관측기와 같은 강인성이 확보되어 진다. G_δ 불변조건은 영역 G_δ 의 경계면에서 다음의 식이 만족되어야 한다.

$$\sigma^+(t) \cdot \dot{\sigma}^+(t) < 0, \quad \sigma^-(t) \cdot \dot{\sigma}^-(t) < 0 \quad (8)$$

i) 주루프 조정기 이득 K 설정

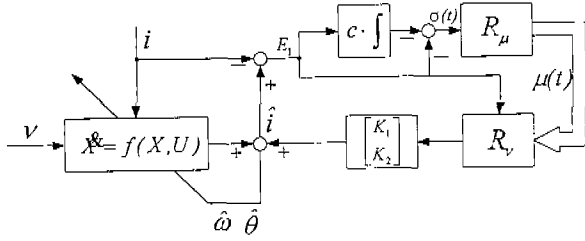


그림 3. 제안된 바이너리 관측기의 블럭도
Fig. 3 Proposed binary observer for speed sensorless drives

일단 영역 G_δ 내에 들어온 $\sigma(t)$ 가 영역을 벗어나지 않고 계속 영역내에 머물러 있을 조건은 이득 K_1 을 적절하게 선택함으로써 확보되어질 수 있다.

먼저, $\sigma > 0$ 이라 가정하고, 식 (8)을 만족하도록 이득 K_1 을 구해야한다.

$$\sigma \cdot \dot{\sigma} = \sigma \{-c[F_{11}E_1 + F_{12}E_2 + K_1\nu] - E_1\} < 0 \quad (9)$$

위의 부등식으로부터, 이득 K_1 는 다음과 같다.

$$K_1 > \frac{1}{(1-h)\delta} [(F_{11} + E_1/c)\delta + F_{12}E_2] \quad (10)$$

$\sigma < 0$ 인 경우에 대해서도 식 (10)과 같은 결과를 얻는다.

이득 K_2 는 이득 K_1 이 구해진후 방정식의 점근적인 수렴조건으로부터 구할 수 있다. E_1 이 영역 G_δ 안에 머물고 있다고 가정하면, \dot{E}_2 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{E}_2 = (F_{21} - K_2K_1^{-1}F_{11})\delta + (F_{22} - K_2K_1^{-1}F_{12})E_2 + K_2K_1^{-1}d \quad (11)$$

만약, $(F_{22} - K_2K_1^{-1}F_{12})$ 가 음의 부호를 갖는다면, E_2 는 영으로 수렴하게 된다. 따라서, 이득 K_2 는 다음과 같다.

$$K_2 > \frac{F_{22}K_1}{F_{12}} \quad (12)$$

ii) 보조루프 조정기 이득 α 설정

보조루프 조정기 이득 α 는 $\mu(t)$ 가 영역의 경계에서 $|\mu| \geq 1-h$ 의 크기를 만족하도록 하는 이득으로 함수 $\lambda = \sigma(t)/c\delta$ 를 이용하여 구한다. 먼저 시스템의 상태가 $\sigma = 0$ 을 통과하는 시간을 t_1 , $\sigma > 0$ 에서 영역의 경계에 도달하는 시간을 t_2 라 놓고 식 (7)을 시간에 대해 정리하면

$$t_2 - t_1 < \frac{1}{\alpha} \frac{4}{2h-1} \quad (13)$$

여기서, $t > t_0$

t_1 is time when $\lambda = 1/2$

t_2 is time when $\lambda = 1$

$1/2 < h < 1$

$\sigma > 0$ 의 경우에 대해 $\mu \leq -(1-h)$ 가 되도록 하는 α 는 다음과 같이 구할 수 있다. 여기서 반증을 위해 $\mu(t_2) > -(1-h)$ 라고 가정하고, t_1 에서부터 t_2 까지 $\lambda(t)$ 를 조사하면,

$$\lambda(t_2) \leq \frac{1}{2} + \frac{1}{c\delta} \overline{K}_o(t_2 - t_1) \quad (14)$$

여기서 $\overline{K}_o = \sup_{t \geq t_0} |c[F_{11}E_1 + F_{12}E_2 + K_1\nu] - E_1|$

관측기의 외부루프 조정기 이득 α 가 식 (15)과 같은 부등식을 만족한다고 가정한다.

$$\alpha \geq \frac{2\overline{K}_o}{c\delta} \ln \frac{4}{2h-1} \quad (15)$$

식 (13)을 이용하여 식 (14)를 정리하고, 여기에 식 (15)를 대입하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\lambda(t_2) < 1 \quad (16)$$

λ 의 크기는 위에서 정의한 것에 의하면 영역의 경계 즉, t_2 에서 $\lambda(t_2) = 1$ 이 되어야 하는데 $\lambda(t_2) < 1$ 이 되어 모순이 되므로 α 가 식 (15)를 만족하도록 설정되면 $|\mu(t_2)| \geq 1-h$ 의 관계가 항상 성립하게 된다.

$\sigma > 0$ 의 경우에 대해서도, 식 (15)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

3. 실험결과

제안한 관측기 시스템의 타당성을 확인하기 위하여 실험을 행하였다. 실험에 사용된 전동기는 400W급 8극의 PMSM이 사용되어 졌으며, PMSM에 전력을 공급하기 위한 전력 변환부는 IGBT로 구성되어졌다. 또한 제안된 알고리즘의 성능비교를 위하여 전동기의 실제속도 및 회전자의 위치를 2024[ppr]의 분해능을 갖는 펄스 엔코더를 4채배하여 사용하였다. 또한 모든 제어알고리즘은 DSP TMS320C31를 사용하여 구현하였으며, 실험파형은 DSP에 부착되어진 D/A 컨버터에 의해 출력된 값을 오실로스코프로 나타내었다. 다음의 실험결과들은 제안된 적분 스위칭평면을 갖는 바이너리 관측기를 사용한 것으로, 그림 4는 정지상태에서 스텝형태로 500 [rpm]의 지령속도를 인가했을 경우이다. 실험결과에서 보는것과 같이 실제속도 및 추정속도 모두 지령속도를 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 실제 및 추정 위치에 대한 결과이다. 따라서 제안된 관측기를 사용함으로써 위치 센서를 사용하지 않고 정확한 전동기의 속도 및 회전자의 위치추정 특성을 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 그림 6은 제안된 관측기의 정역특성을 나타낸 것으로 500[rpm]에서 -500[rpm]으로 지령속도를 인가하였다. 실험결과에서 볼 수 있는 것과 같이 양호한 정역특성을 확인할 수 있다. 그림 7은 고정자 좌표계의 α 축 실제 및 추정전류로 실제전류와 추정전류로 바이너리 이론을 적용하였기 때문에 추정전류에서의 떨림현상이 없음을 볼 수 있으며, 전류오차 역시 거의 없는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

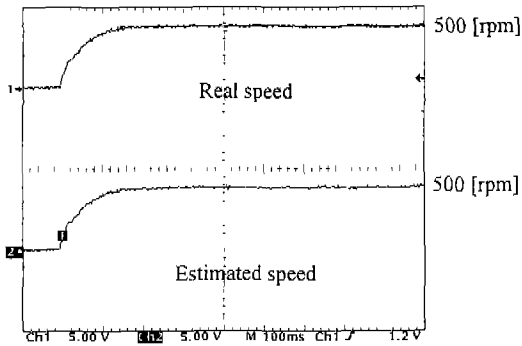


그림 4. 추정 및 실제 회전자 속도
Fig. 4. Estimated and real rotor speed

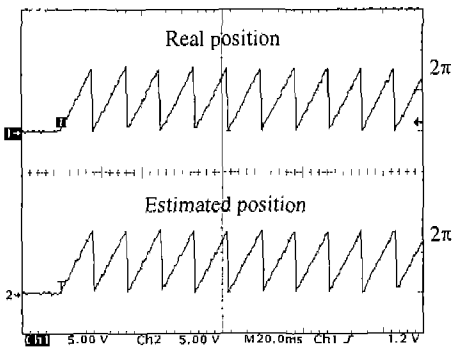


그림 5. 추정 및 실제 회전자 위치(전기각)
Fig. 5. Estimated and real rotor position(Elec. Deg)

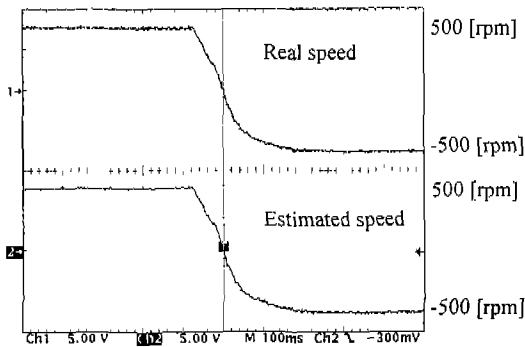


그림 6. 추정 및 실제 회전자 속도
Fig. 6 Estimated and real rotor speed

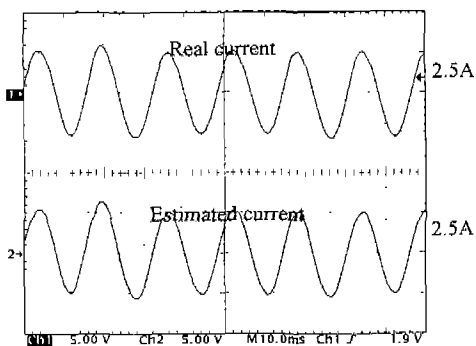


그림 6. 추정 및 실제 전류
Fig. 6 Estimated and real current

본 논문에서는 적분 스위칭평면을 갖는 바이너리관측기를 제안하고 이를 영구자석 동기전동기의 속도 및 위치센없는 제어에 대해 적용하였으며, 이를 통한 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 제안한 관측기 시스템은 정상상태 뿐만 아니라 속도가 급변하는 과도상태에서도 전동기의 속도 및 회전자의 위치를 잘 추정할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 제안된 관측기는 바이너리 이론을 적용하였기 때문에 추정전류에서의 떨림현상이 없음을 볼 수 있으며, 적분 스위칭평면을 이용하여 정상상태에서의 전류오차가 거의 없음을 확인하였다.

본 연구는 한국전력(기초전력공학 공동연구소)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 과제번호(95-075)

참 고 문 헌

- [1] H.Watanabe et al., "DC-Brushless Servo System Without Rotor Position and Speed Sensor", in Proceedings of the 1987 International Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 228-234, 1987.
- [2] N. Matsui, "Sensorless Operation of Brushless DC Motor Drives", in Proceedings of the 1993 International Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.739-744, 1993.
- [3] T.Furuhashi et al., "A Position-and-Velocity Sensorless Control for Brushless DC Motors Using an Adaptive Sliding Observer" IEEE Trans. Industrial Electronics, vol.IE-39, no.2, Apr., 1992, pp.89-95.
- [4] Slotine, J.-J. E. et al., "Sliding Observers for Robot Manipulators", Automatica, vol.27, no.5, 1991, pp.859-864.
- [5] Young-seok Kim et. al., "A Speed Sensroless Vector Control for Brushless DC Motor using Binary Observer," in Proceedings of IECON'96, pp.1746-1751.
- [6] S.V. Emelyanov, *Binary Automatic Control Systems*, Mir Publishers, Moscow, 1987, pp14-128.
- [7] H. Tan, "Integral Augmented Variable Structure Control : Design and Testing", IEEE IECON., pp.1956-1961, 1993.