

## 매입형 영구자석 동기전동기의 속도 센서리스에 관한 연구

강형석, 김영석  
인하대학교 전기공학과

## A study for speed sensorless of the Interior permanent magnet synchronous motors

Hyoung-Seok Kang, Young-Seok Kim

Dept. of Electrical Engineering of Inha University

**Abstract** - 본 논문은 매입형 영구자석 동기전동기의 속도 센서리스의 제어 방법에 관한 것이다. 매입형 영구자석 동기전동기의 센서리스 구동을 위하여 적응 적분 바이너리 관측기와 적응 슬라이딩 모드 관측기를 이용하였다. 두 관측기의 성능 비교를 위하여 매입형 영구자석 동기전동기의 고정자 전압방정식으로부터 각각 관측기를 구성하였고, 동일한 시스템에서의 실험을 통하여 관측기의 성능을 비교하였다.

## 1. 서 론

회전자 내부에 영구자석을 매입한 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)은 작은 체적의 회전자로 큰 토크를 발생할 수 있고, 저속영역에서는 최대토크를, 정격속도 이상의 고속영역에서는 액제자 제어를 함으로써 효율을 저하시키지 않고 운전영역을 확대시킬 수 있다. 이러한 IPMSM이 가지고 있는 특징은 광범위한 동작 범위에서 고효율이 요구되는 전기자동차, 에어콘컴프레셔, 공작기 등에 많은 호응을 받고 있다. 이러한 이유로 위치나 속도 센서 없이 IPMSM을 구동하는 알고리즘이 활발히 진행되고 있으며, 이러한 센서들을 제거함으로써 구동 시스템의 구조가 간단해지고, 산업사회에 폭넓게 응용되고 있다. IPMSM의 속도 센서리스 제어에 일반적인 선형관측기를 적용한 경우 전제 시스템이 비선형성이기 때문에 적절한 관측기 이득을 얻기가 어렵게 된다. 이러한 단점을 극복하기 위해 비선형 관측기로서 슬라이딩 모드가 적용되고 있지만, 제어상 멀림 현상이라는 단점을 가지고 있다[1].

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 IPMSM을 위한 상태관측기의 설계시에 스위칭 평면에 적분항을 추가시킴으로써 멀림 현상을 저감할 수 있고 관측기의 성능을 향상 시킬 수 있다[2]. 다음으로 슬라이딩 모드 관측기의 장점을 가지고, 단점을 보완할 수 있는 바이너리 관측기는 슬라이딩 모드 평면과 유사한 초평면에 있으며, 이 초평면을 중심으로 영역을 설정하고 이 영역을 벗어나지 않게 관측기의 이득을 설정함으로써 슬라이딩 모드 관측기와 같은 강인성을 가진다. 하지만 바이너리 관측기의 설정된 영역은 상태평면상에서 초평면과 평행하도록 설정되어, 추정되는 값은 영역내에 머무르게 되지만 '0'으로 수렴할 수 없는 단점을 가진다. 이러한 단점을 해결하기 위해 슬라이딩 모드에 적용한 스위칭 평면에 적분항을 추가함으로써 관측기의 성능을 향상 시킬 수 있다[3]. 또한, 전동기의 관성 계수나 마찰 계수와 같은 운동방정식의 파라미터들은 계측하기 어려우며, 관측기의 성능을 저하시키므로, 실제 구현에도 많은 제약이 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위해 적응적을 이용하여 속도를 추정한다. 그리고 IPMSM의 전압방정식만을 이용하기 하여 관측기를 설계하기 때문에 기계적 방정식에서 발생하는 기계적 제정수의 영향에 대해 강인한 특성을 갖는다. 각각의 관측기를 동일한 시스템

에서의 실험을 통하여 성능을 비교하였다.

## 2. 본 론

## 2.1 속도 센서리스 제어

## 2.1.1 적응 슬라이딩 모드 관측기

IPMSM의 고정자 전압방정식만을 이용하고, 이를 선형화 시키고자 한 제어주기 내에서는 전동기의 속도가 거의 일정하다는 가정 하에 슬라이딩 모드 관측기는 다음과 같이 구성되어 질 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \hat{i}_s = A \hat{i}_s + L_1 v_s + L_2 \hat{E}_s + B \hat{i}_s - K \quad (1)$$

여기서,  $K = \Phi S + \Psi$  : 관측기 입력

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix}, \quad \Psi = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}$$

 $i_s = [i_a \ i_\beta]^T$  : D축과 Q축 전류 $v_s = [v_a \ v_\beta]^T$  : D축과 Q축 입력전압
 $E_s = [E_a \ E_\beta]^T$  : 유도전압,  $E_a = K_E \omega \sin\theta$ ,  $\hat{\theta}$  : 추정  
 $E_\beta = -K_E \omega \cos\theta$ ,  $A = -R L_1$ ,  $B = -\omega (L_d - L_q) \cdot L_2$   
 $R$  : 고정자 저항,  $L_d$  : d축 인덕턴스,  $L_q$  : q축 인덕턴스  
 $K_E$  : 역기전력 상수,  $\omega$  : 전동기 속도,  $\theta$  : 전동기의 위치

$$L_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix}, \quad L_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_d} \\ \frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix}$$

식 (1)로부터 슬라이딩 모드 관측기에는 전동기의 운동 방정식이 사용되지 않으므로 따라서 IPMSM의 속도 및 위치 정보를 얻기 위해서는 식 (1)에서 속도와 위치에 대한 정보가 있는 항을 고려해야 한다.

관측기의 슬라이딩 평면은 다음과 같이 추정전류와 실제전류의 오차로 정의 한다.

$$S = [s_a \ s_\beta] = [\hat{i}_a - i_a, \ \hat{i}_\beta - i_\beta] = \hat{i}_s - i_s = e_s = 0 \quad (2)$$

## 2.1.2 속도 추정

IPMSM의 회전자의 속도 및 위치 정보를 얻기 위해 속도와 위치에 대한 추정식이 필요하므로 파라미터 변동에 강인한 전동기의 속도를 추정하기 위해 리아푸노프(Lyapunov)함수를 이용한다.

$$V = \frac{1}{2} S^T S + \frac{(\hat{\omega} - \omega)^2}{2} \quad (3)$$

식 (2)를 미분하고, 식 (1)로부터 다음과 같은 식을 얻

을 수 있다.

$$\begin{aligned} S &= \frac{d}{dt} (\hat{i}_s - i_s) \\ &= A(\hat{i}_s - i_s) + (\hat{B}\hat{i}_s - Bi_s) + L_1(\hat{E}_s - E_s) - K \end{aligned} \quad (4)$$

식 (2)을 미분하고, 식 (4)를 대입하고 관측기의 시스템이 안정하기 위해서 리아프노프 안정도 이론으로부터 다음과 같이 두 개의 식으로 분리 된다.

$$S^T [(\hat{B} - B)\hat{i}_s + L_1(\hat{E}_s - E_s)] + \Delta\omega \dot{\hat{\omega}} = 0 \quad (5)$$

$$S^T [A(\hat{i}_s - i_s) + B(\hat{i}_s - i_s) - K] < 0 \quad (6)$$

식 (5)로에서  $\theta = \hat{\theta}$ 라 가정하고, 정리하면 추정속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\omega}} &= -K_E \left( \frac{1}{L_d} s_\alpha \cdot \sin\hat{\theta} - \frac{1}{L_q} s_\beta \cdot \cos\hat{\theta} \right) \\ &\quad + \left[ \frac{(L_d - L_q)}{L_d} s_\alpha \hat{i}_\beta + \frac{(L_d - L_q)}{L_q} s_\beta \hat{i}_\alpha \right] \end{aligned} \quad (7)$$

또한, 적응 슬라이딩 모드 관측기가 안정하기 위해서 식 (6)을 만족하는 관측기 이득을 구해야 하며, 슬라이딩 모드 관측기 이득 K를 넣어 풀게 되면 다음과 같은 이득을 얻을 수 있다.

$\Phi > A + B$ 로부터,

$$\begin{aligned} \phi_{11} &> \frac{R}{L_d}, \quad \phi_{22} > \frac{R}{L_q} \\ \phi_{12} &> \frac{\omega(L_d - L_q)}{L_d}, \quad \phi_{21} > \frac{\omega(L_d - L_q)}{L_q} \end{aligned} \quad (8)$$

$$S^T \Psi > 0 \text{로부터, } \psi_i = \begin{cases} \alpha_i & \text{if } s_i > 0 \\ -\beta_i & \text{if } s_i < 0 \end{cases} \quad (9)$$

여기서,  $\alpha_i, \beta_i$ 는 양의 상수,  $i = 1, 2$

식 (8)과 식 (9)를 만족하도록 관측기 이득을 설정하면, 적응 슬라이딩 모드 관측기는 전체적으로 안정하게 된다.

### 2.2.1 적응 적분 바이너리 관측기

2.1.1의 적응 적분 바이너리 관측기는 적응 슬라이딩 모드 관측기에서 관측기의 입력항이 적분 스위칭 평면을 갖는 바이너리 관측기로 바뀌어 진다.

$$\frac{d}{dt} \hat{i}_s = \hat{A}\hat{i}_s + L_1 v_s + L_1 \hat{E}_s + \hat{B}\hat{i}_s - K\gamma_s \quad (10)$$

여기서  $K = \begin{bmatrix} k_\alpha & 0 \\ 0 & k_\beta \end{bmatrix}$  : 상수

$\gamma_s = [\gamma_\alpha \ \gamma_\beta]^T$  : 관측기 입력

정상상태의 오차를 줄이기 위해 초평면에 적분항을 추가하며, 관측기의 초평면은 추정전류와 실제전류의 오차로 정의한다. 적분 스위칭 면을 갖는 바이너리 관측기에서 적분 스위칭 면은 다음과 같이 정의 한다.

$$\sigma(t) = (\sigma_\alpha, \ \sigma_\beta) = 0 \quad (11)$$

여기서,  $\sigma_\alpha = -c_\alpha e_\alpha - \int_0^t e_\alpha d\tau, \ e_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha$

$\sigma_\beta = -c_\beta e_\beta - \int_0^t e_\beta d\tau, \ e_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta, \ c_\alpha, \ c_\beta$  : 양의 상수

관측기의 정의 되는 영역을 다음과 같이 정의하고, 관측기의 스위칭 함수를 결정하는 주루프와 보조루프 조정 기는 연속관성형 조정기로 다음과 같다.

$$G_\delta = x : \sigma^+ \cdot \sigma^- \leq 0 \quad (12)$$

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

$\delta$  : 상수,  $0 \leq \delta < 1$

보조루프 조정기 $\begin{bmatrix} \mu_\alpha \\ \mu_\beta \end{bmatrix} = -\alpha \begin{bmatrix} \mu_\alpha + sat(\lambda_\alpha) \\ \mu_\beta + sat(\lambda_\beta) \end{bmatrix}$ 여기서, $\lambda_\alpha = \sigma_\alpha/c_\alpha\delta, \ \lambda_\beta = \sigma_\beta/c_\beta\delta$	주루프 조정기 $\begin{bmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_\alpha  e_\alpha  \\ \mu_\beta  e_\beta  \end{bmatrix}$ 여기서, $\lambda_\alpha = \sigma_\alpha/c_\alpha\delta, \ \lambda_\beta = \sigma_\beta/c_\beta\delta$
--	---

$$\dot{e}_s = \frac{d}{dt} (\hat{i}_s - i_s) = A(\hat{i}_s - i_s) + (\hat{B}\hat{i}_s - Bi_s) + L_1(\hat{E}_s - E_s) - K\gamma_s \quad (14)$$

$$\text{여기서, } e_s = [e_\alpha \ e_\beta]^T = [\hat{i}_\alpha - i_\alpha \ \hat{i}_\beta - i_\beta]^T$$

적분 스위칭 평면을 갖는 바이너리 관측기의 오차방정식은 식 (14)와 같으며, 오차는 바이너리 관측기의 경계면에 도달한 후,  $e_s = 0$ 이 될 때까지 수평축을 따라 수렴해 간다.

### 2.2.2 적분 스위칭 평면을 갖는 관측기의 이득 설정

적분 스위칭 평면을 갖는 바이너리 관측기의 이득은  $G_\delta$  영역에 대한 불변조건으로부터 구할 수 있다.  $G_\delta$  영역 불변조건은 영역  $G_\delta$ 의 경계면에서 식(9)가 만족되어야 한다.

$$\sigma^+(t)\sigma^+(t) < 0, \ \sigma^-(t)\sigma^-(t) < 0 \quad (15)$$

가. K의 설정

$$\begin{aligned} K &> \frac{1}{(1-h)\delta} \max \left[ \sup_{t \geq 0} \left| \left( -\frac{R}{L_d} + \frac{1}{c_\alpha} \right) \delta - \left( \frac{L_d - L_q}{L_d} \right) (\hat{w}\hat{i}_\beta - wi_\beta) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{K_E}{L_d} (\hat{w}\sin\hat{\theta} - w\sin\theta) \right| \right. \\ &\quad \left. \sup_{t \geq 0} \left| \left( -\frac{R}{L_q} + \frac{1}{c_\beta} \right) \delta - \left( \frac{L_d - L_q}{L_q} \right) (\hat{w}\hat{i}_\alpha - wi_\alpha) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{K_E}{L_q} (-\hat{w}\cos\hat{\theta} + w\cos\theta) \right| \right] \end{aligned} \quad (16)$$

나.  $\alpha$ 의 설정

보조루프 조정기 이득  $\alpha$ 는  $\mu(t)$ 가 영역의 경계에서  $|t| \geq 1-h$ 의 크기를 만족하도록 하는 이득으로 함수  $\lambda = \sigma(t)/c\delta$ 를 이용하여 구한다.

$$\alpha \geq \frac{2\bar{K}_0}{c\delta} \ln \frac{4}{2h-1} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \bar{K}_0 &> \max \left[ \sup_{t \geq 0} \left| c_\alpha \left( \left( -\frac{R}{L_d} \right) \delta - \left( \frac{L_d - L_q}{L_d} \right) (\hat{w}\hat{i}_\beta - wi_\beta) \right. \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + \frac{K_E}{L_d} (\hat{w}\sin\hat{\theta} - w\sin\theta) + k_1\nu_\beta \right) - e_\beta \right| \right. \\ &\quad \left. \sup_{t \geq 0} \left| c_\alpha \left( \left( -\frac{R}{L_q} \right) \delta - \left( \frac{L_d - L_q}{L_q} \right) (\hat{w}\hat{i}_\alpha - wi_\alpha) \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + \frac{K_E}{L_q} (-\hat{w}\cos\hat{\theta} + w\cos\theta) + k_1\nu_\beta \right) - e_\beta \right| \right] \end{aligned}$$

### 2.2.3 속도 추정

2.1.2와 같은 방법으로 다음과 같이 회전자의 속도 추정식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\omega} = -K_E \left( \frac{1}{L_d} e_a \cdot \sin \hat{\theta} - \frac{1}{L_q} e_q \cdot \cos \hat{\theta} \right) + \left[ \frac{(L_d - L_q)}{L_d} e_a \hat{i}_d + \frac{(L_d - L_q)}{L_q} e_q \hat{i}_q \right] \quad (28)$$

### 2.3. 실험 결과

실험에 사용된 모터는 8극, 정격용량 2.5[kW], 고정자 저항 0.22[Ω], 정격토크 11.9[Nm], 정격속도 2000[rpm]의 매입형 영구자석 동기전동기이며, 파라미터 계측에 의한 d, q축 인덕턴스 값은 d축이 1.31[mH], q축이 1.61[mH]이다.

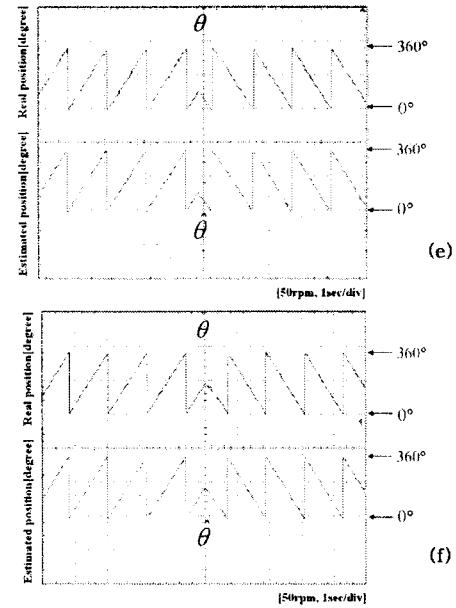
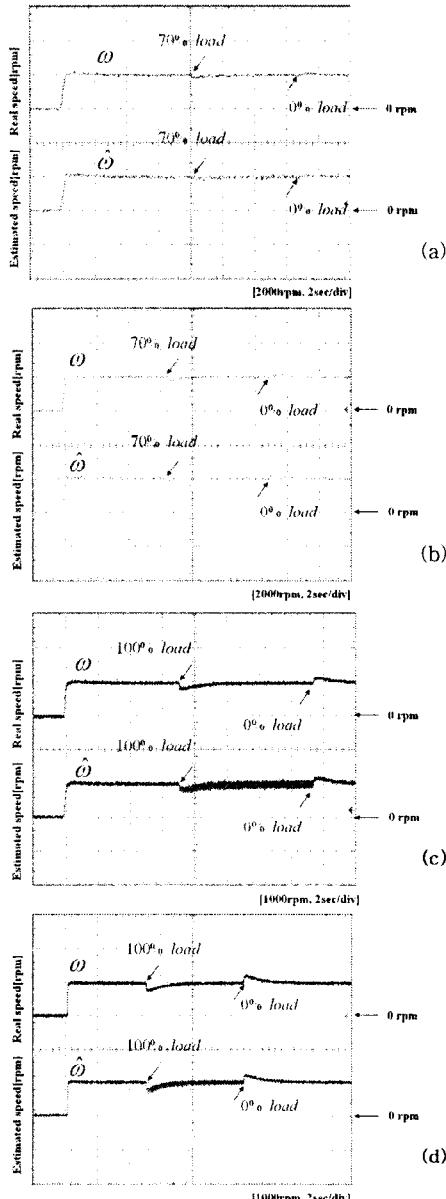


그림 1. 속도 센서리스 구동시 과정  
적용 슬라이딩 모드 관측기를 이용

- (a) 2000[rpm]에서 70% 부하 인가시 실제속도 및 추정속도
- (c) 1000[rpm]에서 100% 부하 인가시 실제속도 및 추정속도
- (e) 50[rpm]에서 무부하시 실제위치와 추정위치  
적용 적분 바이너리 관측기를 이용
- (b) 2000[rpm]에서 70% 부하 인가시 실제속도 및 추정속도
- (d) 1000[rpm]에서 100% 부하 인가시 실제속도 및 추정속도
- (f) 50[rpm]에서 무부하시 실제위치와 추정위치

### 3. 결론

본 논문에서는 IPMSM의 속도 센서리스 제어 방법 중에 슬라이딩 모드와 바이너리를 이용한 관측기의 성능을 비교하였다. 슬라이딩 모드의 멀림 현상을 저감한 적용 슬라이딩 모드 관측기의 성능은 실험으로 확인하였다. 또한, 슬라이딩 모드의 단점을 보완한 바이너리 관측기의 성능과 비교하였고, 슬라이딩 모드의 멀림 현상을 보다 저감 할 수 있음을 실험을 통하여 증명 하였다.

감사의 글  
이 논문은 2007년 중소기업 기술혁신개발 사업의 지원으로 연구되었음.

### 【참고문헌】

- [1] T. Takeshita, A. Usui, A. Sumiya and N. Matsui "Parameter Measurement of Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor" IEE Japan, vol.119-D, pp.1184-1191, 1999.
- [2] 강형석, 김원석, 김영석, "적용 슬라이딩 관측기를 이용한 매입형 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어", 대한전기학회 논문지 제55권 5호, pp.271-279, 2006.5.
- [3] 강형석, 김영석, "적용 적분바이너리 관측기를 이용한 매입형 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어", 대한전기학회 논문지 제56권 1호, pp.71~80, 2007.1.