

# 새로운 적응 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 PMSM 센서리스 속도 응답특성 향상

|         |
|---------|
| 논문      |
| 59-1-29 |

## Enhancement of the Speed Response of PMSM Sensorless Control Using A New Adaptive Sliding Mode Observer

김 홍 열\* · 손 주 범\*\* · 이 장 명†  
(HongRyel Kim · JuBeom Son · JangMyung Lee)

**Abstract** - This paper proposes an adaptive sliding mode observer (SMO), which adds the estimation function of the stator resistance to a new sliding mode observer for the robust sensorless control of permanent magnet synchronous motor (PMSM) with variable parameters. To reduce the chattering problem commonly found in the conventional sliding mode observer where the low-pass filter and additional position compensation of the rotor are used, the sigmoid function is used for the control of a switching function in this research. With the estimation of the stator resistance, the proposed observer can improve the control performance by reducing the estimation error of the motor's speed. Note that the stator resistance is varying with the ambient temperature and becomes an error source for the sensorless control of PMSM. The new sliding mode observer has better efficiency than the conventional adaptive sliding mode observer by reducing the time consuming integral calculations. The stability of the proposed adaptive sliding mode observer is verified by the Lyapunov function in determining the observer gains, and the effectiveness of the observer is demonstrated by simulations and experiments.

**Key Words** : Permanent Magnet Synchronous Motor, Sliding Mode Control, Adaptive Sliding Mode Observer, Sensorless Control

### 1. 서 론

최근 들어 공작기계나 산업용 로봇, 전자자동차 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 있는 장점이 있다. 일반적으로 교류전동기 중에서 유도전동기(Induction Motor, IM)와 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 가변속 응용의 드라이브 시스템에서 가장 널리 사용되고 있다. 하지만, 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].

따라서 정밀제어를 요구하는 산업계에서는 유도전동기의 사용은 적합하지 않다. 영구자석 동기전동기는 회전자의 영구자석으로부터 정현파 형태의 자속을 공급받기 때문에 원

활한 제어를 위해서는 회전자의 정확한 위치를 알아야 한다. 일반적으로 회전자의 정확한 위치정보를 얻기 위해 리졸버(Resolver)나 절대 인코더 (Absolute Encoder) 등의 위치검출기가 사용된다. 하지만 이러한 위치검출기는 가격이 고가일 뿐만 아니라 진동 및 온도 등의 환경적 제약을 받게 되며, 전동기 축에 장착함으로써 부피를 증가시키는 단점이 발생되게 된다[2]. 따라서 이와 같은 문제점을 극복하고자 위치검출기를 사용하지 않고 간접적으로 회전자의 위치 및 속도를 추정하는 센서리스 제어에 관한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다[3]-[6].

본 논문에서는 외란에 강인하며 파라미터 변동에 적응 가능한 영구자석 동기전동기의 센서리스(Sensorless) 제어를 위해 슬라이딩 모드 제어에 활용하기 위한 새로운 슬라이딩 모드 관측기의 구조를 제안하며, 아울러 변동 가능한 파라미터인 고정자 저항을 추정하는 기능을 추가한 새로운 적응 슬라이딩 모드 관측기를 제안한다. 제안된 관측기는 슬라이딩 모드 제어이론을 이용하여 관측기의 강인성 및 설계의 용이함을 얻을 수 있었으며, 관측기의 안정성은 Lyapunov 안정도 이론을 이용하여 관측기의 이득을 설계하는 과정에서 안정조건을 만족하도록 하였다. 특히, 제안한 적응 관측기는 기존의 적응 관측기와 비교하여 회전자의 위치 및 속도를 추정함에 있어 시스템의 성능에 영향을 미치는 적분연산을 줄임으로써 결과적으로 전체 시스템의 응답속도를 향상시키는 효과를 가질 수 있었다. 제안한 적응 관측기의 타당성은 기존의 적응 관측기와 응답특성 비교실험 등을 통하여 검증하였다.

\* 비 회 원 : 부산대학교 전자공학과 박사과정

\*\* 비 회 원 : 부산대학교 메카트로닉스협동 석사과정

† 교신저자, 정회원 : 부산대학교 전자전기공학과 교수

E-mail : jmlee@pusan.ac.kr

접수일자 : 2009년 7월 31일

최종완료 : 2009년 10월 26일

## 2. 슬라이딩 모드 관측기

### 2.1 PMSM MODEL

관측기를 구성하기 위해서는 전동기에 대한 모델을 구해야 한다. PMSM의 센서리스 제어의 경우 회전자의 위치 정보가 추정에 의한 것이므로 회전자의 위치와 무관한 고정자 축의 정지좌표계 모델 식을 이용하여 모델을 구하는 것이 용이하다.

PMSM 정지 좌표계의 전압방정식에서 고정자 전류를 상태변수로 하는 미분방정식으로 전동기 모델을 표시하면 다음과 같다.

$$\dot{i}_\alpha = -\frac{R_s}{L_s}i_\alpha + \frac{1}{L_s}v_\alpha - \frac{1}{L_s}e_\alpha \quad (1a)$$

$$\dot{i}_\beta = -\frac{R_s}{L_s}i_\beta + \frac{1}{L_s}v_\beta - \frac{1}{L_s}e_\beta \quad (1b)$$

여기서,  $i_{\alpha,\beta}$ ,  $v_{\alpha,\beta}$ ,  $e_{\alpha,\beta}$ 는 각각 정지좌표계에서의 고정자  $\alpha, \beta$  전류, 전압 및 역기전력을 나타내며  $R_s$  및  $L_s$ 는 고정자 저항과 인덕턴스를 나타낸다. 또한, 정지좌표계의 역기전력은

$$e_\alpha = -\lambda_f \omega_r \sin \theta \quad (2a)$$

$$e_\beta = \lambda_f \omega_r \cos \theta \quad (2b)$$

와 같으며, 여기서  $\lambda_f$ 는 영구자석의 자속 밀도에 비례하는 상수,  $\omega_r$ 는 회전자의 전기각속도,  $\theta$ 는 전기적 회전자 위치이다. 만일 회전자의 속도가 천천히 변화한다고 가정하면 ( $\dot{\omega}_r \approx 0$ ) 역기전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{e}_\alpha = -\lambda_f e_\beta \quad (3a)$$

$$\dot{e}_\beta = \lambda_f e_\alpha \quad (3b)$$

### 2.2 새로운 슬라이딩 모드 관측기

슬라이딩 모드 제어[7]는 시스템의 구조를 변경하여 시스템의 상태를 슬라이딩 평면상에 구속시킴으로써 강인성을 얻을 수 있는 비선형 제어 방식으로 가변구조 제어 이론의 대표적인 예이다. 모델의 불확실성과 외란이 존재하더라도 상태 궤적이 슬라이딩 평면상을 향하도록 제어 입력이 주어지므로 시스템의 동작은 원래의 시스템과 무관하게 슬라이딩 평면상에서 안정하게 된다. 따라서 파라미터 변동이나 부하변동과 같은 시스템의 비선형성과 제어 입력의 영역 내로 한정된 외란에는 둔감한 특성을 가지는 제어 시스템을 구성할 수 있다.

기존의 슬라이딩 모드 관측기는 스위칭 함수로 이산시간 함수를 사용하여 발생하는 채터링 (Chattering) 문제를 해결하고 역기전력을 추정하기 위해 저역통과필터 (Low-pass filter)를 사용한다. 이러한 필터의 추가로 인한 시간 지연으로 인하여 회전자의 위치 추정에 있어서 발생하는 오차를

별도로 보상해 주어야 하는 단점이 있다[8]. 하지만 제안된 새로운 슬라이딩 모드 관측기에서는 스위칭 함수로 이산시간 함수가 아닌 sigmoid 함수[9]를 채택함으로써 채터링 문제를 해결하였으며 저역통과필터를 사용하지 않고도 역기전력의 추정이 가능하도록 하여 이러한 시간 지연 문제를 해결하도록 하였다.

식 (1)로부터, 스위칭 함수로 sigmoid 함수를 사용하는 슬라이딩 모드 관측기는 다음과 같이 구성된다.

$$\dot{\hat{i}}_\alpha = -\frac{R_s}{L_s}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s}v_\alpha - \frac{1}{L_s}kH(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \quad (4a)$$

$$\dot{\hat{i}}_\beta = -\frac{R_s}{L_s}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s}v_\beta - \frac{1}{L_s}kH(\hat{i}_\beta - i_\beta) \quad (4b)$$

여기서  $k$ 는 관측기 이득 상수를,  $H$ 는 sigmoid 함수를 나타내며 sigmoid 함수는 다음의 정규화된 함수로 사용한다.

$$\begin{bmatrix} H(\bar{i}_\alpha) \\ H(\bar{i}_\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{2}{1 + \exp(-a\bar{i}_\alpha)} \right) - 1 \\ \left( \frac{2}{1 + \exp(-a\bar{i}_\beta)} \right) - 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $a$ 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 정지좌표계의 고정자  $\alpha, \beta$  전류의 추정오차를 나타낸다.

슬라이딩 모드 평면  $s$ 를 고정자 전류의 추정오차로 정의하면,  $\dot{s}s < 0$ 일 때 슬라이딩 모드가 존재하며 이는  $t \rightarrow \infty$ 일 때  $s \rightarrow 0$ 임을 나타낸다. 슬라이딩 모드 존재 조건을 찾기 위한 Lyapunov 함수는 식 (6)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2}s^T s \\ &= \frac{1}{2}(s_\alpha^2 + s_\beta^2) \end{aligned} \quad (6)$$

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

관측기 이득  $k$ 에 의해서 일단 슬라이딩 모드가 일어나게 되면 슬라이딩 평면은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{s}_\alpha & \dot{s}_\beta \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} s_\alpha & s_\beta \end{bmatrix}^T \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

한편 식 (1)과 (4)에 의해서 다음의 식으로 추정된 역기전력이 슬라이딩 모드 관측기에 피드백 된다.

$$\hat{e}_\alpha = kH(\bar{i}_\alpha) \quad (8a)$$

$$\hat{e}_\beta = kH(\bar{i}_\beta) \quad (8b)$$

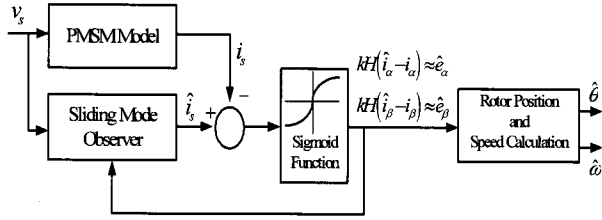


그림 1 제안된 슬라이딩 모드 관측기  
Fig. 1 Proposed Sliding Mode Observer

그림 1은 제안된 슬라이딩 모드 관측기의 블록도를 나타낸 그림으로 sigmoid 함수를 이용한 연속적인 슬라이딩 모드 제어를 통해서 채터링 문제는 해결하고자 하며, 식 (8)에 의하여 추정된 역기전력 값은 회전자의 속도와 위치를 계산하기 위해 활용되어질 수 있다

### 3. 제안한 적응 슬라이딩 모드 관측기

제안한 적응 관측기는 기존의 슬라이딩 모드 관측의 채터링 문제를 개선시킨 관측기 구조를 기반으로 하였다. 아울러, 파라미터 변동에 따른 추정오차의 영향을 저감시키기 위하여 변동 가능한 파라미터인 고정자 저항을 추정하는 적응 제어를 도입하여 제어의 성능을 향상시키고자 한다.

#### 3.1 적응 슬라이딩 모드 관측기

식 (1)의 정지좌표계에서의 PMSM 전류 미분방정식으로부터 적응 슬라이딩 모드 관측기를 다음과 같이 구성하였다.

$$\dot{\hat{i}}_\alpha = -\frac{\hat{R}_s}{L_s} \hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s} v_\alpha - \frac{1}{L_s} kH(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \quad (9a)$$

$$\dot{\hat{i}}_\beta = -\frac{\hat{R}_s}{L_s} \hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s} v_\beta - \frac{1}{L_s} kH(\hat{i}_\beta - i_\beta) \quad (9b)$$

제안된 관측기는 스위칭 함수로 sigmoid 함수를 사용하여 채터링 문제를 해결하였으며, 전동기의 고정자 저항 값을 일정한 값인 즉  $R_s$ 로 나타내는 것이 아니고 추정치인  $\hat{R}_s$ 로 나타내고 있다. 제안한 관측기의 슬라이딩 평면  $s$  는  $s = [s_\alpha \ s_\beta]^T = [\hat{i}_\alpha - i_\alpha \ \hat{i}_\beta - i_\beta]^T$  로 표시되며 실제 전류와 추정전류의 오차로 정의된다. Sigmoid함수는 채터링 문제는 해결하지만, 기존의 signum함수보다는 속도면에서 느리며 오차 값이 발생할 여지가 있다. 그러므로 고속 제어 시에는 오차 값을 최소화하기 위하여 본 제안에 의한 슬라이딩 모드 제어기는 큰 스위칭 이득 값을 활용하여야 한다. 큰 스위칭 이득의 설정이 가능하게 되면 모델의 불확실성과 외란이 존재할 경우에도 시스템의 상태를 슬라이딩 평면상에 구속시킴으로써 강인성을 확보할 수 있게 된다.

#### 3.2 고정자 저항 추정 및 관측기 이득 $k$

PMSM의 센서리스 제어에서 외란에 강인하며 변동 가능한 파라미터인 고정자 저항을 추정하기 위하여 Lyapunov 함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$V = \frac{1}{2} s^T s + \frac{1}{2} (\hat{R}_s - R_s)^2 \quad (10)$$

고정자 저항의 추정을 위한 한 주기 내에서의 전동기 속도가 일정하다고 가정하고 식 (10)을 미분하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있게 된다.

$$\dot{V} = s^T \dot{s} + (\hat{R}_s - R_s) \dot{\hat{R}}_s \quad (11)$$

또한, 슬라이딩 평면  $s$  를 미분하면 식 (1)과 식 (9)로부터 다음과 같이 나타난다.

$$\dot{s} = (\dot{\hat{i}}_s - \dot{i}_s) = (\hat{A} - A) \hat{i}_s + A(\hat{i}_s - i_s) + B(e_s - kH(\bar{i}_s)) \quad (12)$$

여기서,  $i_s = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ ,  $e_s = [e_\alpha \ e_\beta]^T$ ,  $\hat{A} = \frac{\hat{R}_s}{L_s} I$ ,  $A = \frac{R_s}{L_s} I$ ,

$B = \frac{1}{L_s} I$  를 각각 나타내며, 식 (12)을 식 (11)에 대입하면 Lyapunov 함수의 미분 값은 다음과 같이 된다.

$$\dot{V} = s^T \left[ (\hat{A} - A) \hat{i}_s + A(\hat{i}_s - i_s) + B(e_s - kH(\bar{i}_s)) \right] + \bar{R}_s \cdot \dot{\hat{R}}_s \quad (13)$$

여기서,  $\bar{R}_s = \hat{R}_s - R_s$  를 나타내며, 관측기의 시스템이 안정하기 위해서는 Lyapunov 안정도 이론으로부터  $V > 0$  일 때,  $\dot{V} < 0$  를 만족해야 한다. 따라서  $\dot{V} < 0$  를 만족하도록 하기 위하여 식 (13)을 아래와 같이 두 식으로 분리한다.

$$s^T \left[ (\hat{A} - A) \hat{i}_s \right] + \bar{R}_s \cdot \dot{\hat{R}}_s = 0 \quad (14)$$

$$s^T \left[ A(\hat{i}_s - i_s) + B(e_s - kH(\bar{i}_s)) \right] < 0 \quad (15)$$

식 (14)으로부터 고정자 저항 값은 추정된 전류와 슬라이딩 평면과 관계가 있는 것을 알 수 있다. 이 식을 정리하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\bar{i}_\alpha \ \bar{i}_\beta] \begin{bmatrix} -\frac{\bar{R}_s}{L_s} \cdot \hat{i}_\alpha \\ -\frac{\bar{R}_s}{L_s} \cdot \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \bar{R}_s \cdot \dot{\hat{R}}_s = 0 \quad (16)$$

위의 식을 정리하면 다음과 같은 고정자 저항의 추정 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\hat{R}}_s = \frac{1}{L_s} (\bar{i}_\alpha \cdot \hat{i}_\alpha + \bar{i}_\beta \cdot \hat{i}_\beta) \quad (17)$$

식 (17)으로부터 추정 전류와 슬라이딩 평면을 이용하여 고정자 저항 값에 대한 미분 식을 추정할 수 있음을 알 수 있으며, 추정된 고정자 저항 값은 식 (17)을 적분하여 얻을 수 있게 된다.

제안한 슬라이딩 모드 적응 관측기가 안정하기 위해서는 식 (15)를 만족하는 관측기 이득을 구해야 한다. 식 (15)를

정리하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$-\frac{R_s}{L_s}(\bar{i}_\alpha^2 + \bar{i}_\beta^2) + \frac{1}{L_s}(e_\alpha \cdot \bar{i}_\alpha - \bar{i}_\alpha \cdot kH(\bar{i}_\alpha)) + \frac{1}{L_s}(e_\beta \cdot \bar{i}_\beta - \bar{i}_\beta \cdot kH(\bar{i}_\beta)) < 0 \quad (18)$$

위의 식으로부터 아래와 같은 제안한 적응 관측기의 이득을 얻을 수 있다.

$$k \geq \max\left(\left|\hat{e}_\alpha\right|, \left|\hat{e}_\beta\right|\right) \quad (19)$$

식 (18)을 만족하도록 관측기 이득을 설정하면, 제안한 적응 관측기는 전체적으로 안정하게 된다. 역기전력은 식 (7)과 같이 전류 추정치 및 추정치로부터 추정할 수 있다. 또한, 추정된 역기전력을 이용하면 회전자의 위치 및 속도를 다음과 같이 추정할 수가 있게 된다.

$$\hat{\theta} = -\tan^{-1}\left(\frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}\right) \quad (20)$$

$$\hat{\omega} = \frac{d}{dt}\hat{\theta} \quad (21)$$

### 3.3 제안한 관측기의 성능

제안한 적응 관측기의 성능은 기존의 적응 슬라이딩 모드 관측기와의 비교를 통해서 개선된 점을 확인할 수가 있다. 다음은 기존의 적응 슬라이딩 모드 관측기의 구조를 나타내고 있다[10].

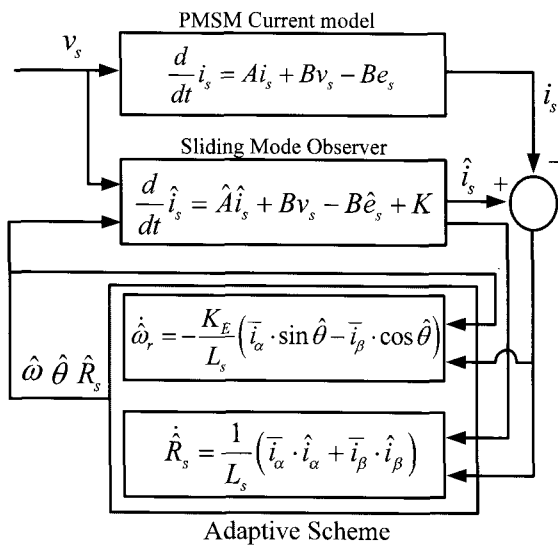


그림 2 기존의 적응 슬라이딩 모드 관측기  
Fig. 2 Conventional Adaptive Sliding Mode Observer

그림 2에서와 같이 기존의 적응 슬라이딩 모드 관측기는 외란에 강인하며 파라미터 변동에 적응하는 센서리스 제어

를 위해서 회전자 속도 및 고정자 저항을 추정하는 미분 식을 이용한 적응제어 기법을 통해서 전동기를 제어한다. 전동기 제어를 위한 회전자의 속도 및 위치는 아래와 같이 추정된 회전자 속도의 미분 치와 회전자 속도를 각각 적분함으로써 얻을 수 있게 된다.

$$\hat{\omega} = \int \hat{\omega} \quad (22)$$

$$\hat{\theta} = \int \hat{\omega} \quad (23)$$

식 (22)과 식 (23)과 같은 적분연산은 마이크로프로세서를 사용한 실제 제어기에서 구현할 때는 주로 저역 통과필터를 사용하여 구현하게 된다. 이러한 필터의 사용은 시간 지연을 초래하게 되므로 시스템의 성능을 저하시키는 요인으로 작용된다. 반면, 본 논문에서 제안한 적응 슬라이딩 모드 관측기에서는 기존의 적응 관측기의 장점인 파라미터 추정 방식을 유지하며 회전자의 위치 및 속도를 추정함에 있어서는 sigmoid 함수를 스위칭 함수로 사용하여 저역 통과필터의 사사용에 따른 시간 지연을 방지하고 있다. 또한,  $\hat{\theta}$ 와  $\hat{\omega}$ 를 추정함에 있어서 추정된 역기전력을 사용함으로써 하여 이중 적분연산에 따른 시스템 성능의 저하요인을 제거하였다. 그림 3은 이러한 특성을 지니고 있는 제안한 적응 슬라이딩 모드 관측기의 구조를 나타내고 있다.

그림 3에서와 같이 제안한 적응 관측기의 구조는  $\hat{\theta}$ 와  $\hat{\omega}$ 를 추정함에 있어 sigmoid 함수를 스위칭 함수로 사용하여 추정된 역기전력 값을 활용하고 있다. 즉, 식 (22)과 식 (23)에서와 같이  $\hat{\theta}$ 와  $\hat{\omega}$ 를 추정함에 있어 기존의 방식과는 달리 적분연산을 사용하지 않기 때문에 결과적으로 시스템의 응답특성을 향상시킬 수 있게 되었다.

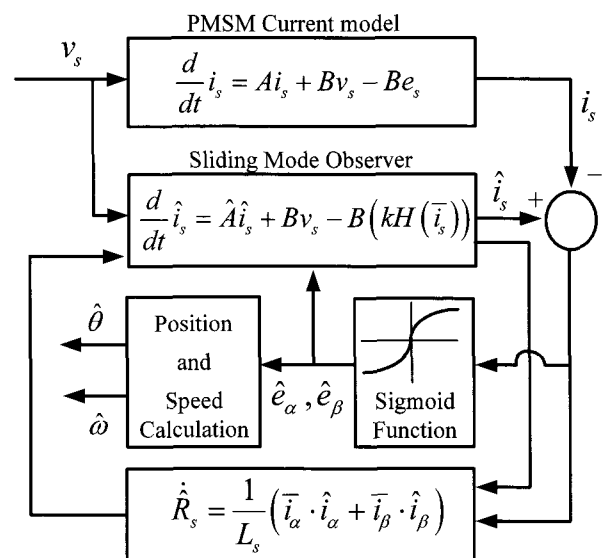


그림 3 제안한 적응 슬라이딩 모드 관측기  
Fig. 3 Proposed Adaptive Sliding Mode Observer

### 4. 실험 및 결과

#### 4.1 H/W 시스템의 구성

본 제안의 타당성을 검증하기 위하여 실제 제어시스템을 구성하였다.

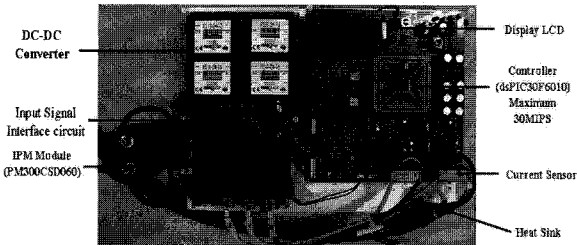


그림 4 센서리스 제어용 모터 제어기.  
Fig. 4 Motor controller for sensorless control

그림 4는 실험을 위해 제작된 센서리스 제어용 모터 제어기로 20KW급 모터까지 제어할 수 있도록 설계하였다. 제어기의 구조는 크게 제어연산 처리부와 IPM모듈부로 구성되어 있으며, 모터의 센서리스 제어 알고리즘 연산을 위한 프로세서로는 Microchip Corp. 의 DSP엔진이 탑재된 dsPIC30F6010A를 사용하였으며, 이는 최대 30 MIPS의 처리속도를 가진다. 또한 IGBT모듈과 과전류 보호회로가 내장되어있는 Mitsubishi Corp.의 IPM모듈인 PM300CSI060을 사용하였으며, 제어기의 상태를 나타내는 Display LCD를 추가적으로 장착하였다.

실험에 사용된 모터는 Rockwell Samsung Automation의 2KW급 PMSM CSMS-20B 모델로 자세한 사양은 표 1에서 나타나는 것과 같다.

표 1 영구자석 동기전동기의 규격  
Table 1 The specifications of PMSM

|      |              |          |  |
|------|--------------|----------|--|
| 정격용량 | 2 [KW]       | 고정자 저항   | 0.6 [ $\Omega$ ]                                       |
| 정격토크 | 6.36 [N·m]   | 고정자 인덕턴스 | 6.48 [mH]  |
| 정격속도 | 3000 [r/min] | 전기적 시정수  | 10.8 [ms]  |
| 정격전류 | 13 [A]       | 기계적 시정수  | 0.53 [ms]  |
| 극 수  | 8극           | 관성계수     | $3.46 \times 10^{-4}$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ] |

#### 4.2 실험 및 결과

본 실험에서는 기존의 적응 슬라이딩 모드 관측기와 제안한 적응 슬라이딩 모드 관측기에 대하여 Step 입력에 따른 응답특성과 속도 변화에 따른 속도 추정오차, 외란에 대한 추정속도 비교 실험을 행하였다. 전류제어기의 샘플링 주기를 200 usec, 속도제어기의 샘플링 주기를 2 msec 로 설정하여 실험을 하였다. 또한, 고정자 저항 값을 추정하는 것이

적응특성을 향상시킨다는 것을 보이기 위하여, 고정자 저항 값을 변화 시킨 후 고정자 저항을 추정하는 방식과 추정하지 않는 방식의 응답특성을 비교하여 제안한 적응 관측기의 성능이 우수함을 검증하고 있다.

표 2 제안한 SMO와 종래의 SMO 파라미터 설정  
Table 2 Parameters for the proposed and the conventional SMO's

| Proposed Adaptive SMO        |     | Conventional Adaptive SMO in Fig. 2, $K = \Phi_s + \Psi$ |     |
|------------------------------|-----|--|-----|
| Slope of sigmoid function, a | 4   | Observer gain, $\Phi$                                    | 100 |
| Observer gain, k             | 100 | Observer gain, $\Psi$                                    | 8   |

우선 역기전력의 추정 특성을 관찰하기 위하여 전류  $i_\alpha$  를 그림 5에 나타내었으며, 이 전류의 추정치로 k배로 증폭된 형태의 추정치를 그림 6에 나타내었다.

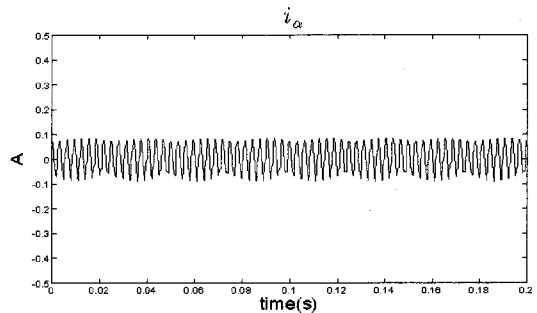


그림 5  $i_\alpha$  측정값  
Fig. 5 Measured value  $i_\alpha$

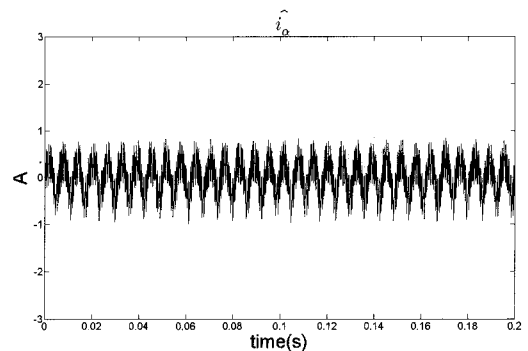


그림 6  $i_\alpha$  추정값 (k times)  
Fig. 6 Estimated  $i_\alpha$

그림 5와 6의 비교에서 알 수 있듯이 급격히 변화하는 전류를 정확히 추정하지는 못하나 저역 통과필터를 거친 형태의 출력을 가지고 그 크기를 쫓아가고 있는 것을 확인할 수 있었다.

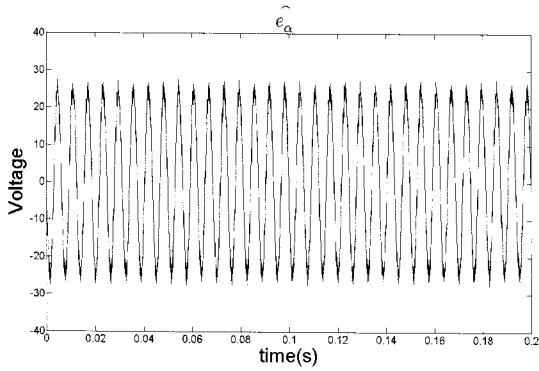


그림 7  $e_\alpha$  추정값

Fig. 7 Estimated value  $e_\alpha$

그림 7은 최종적인 추정된 역기전력 값을 나타내는 것으로 이 값이 슬라이딩 모드 관측기에 피드백 되어 활용되며 아울러 회전자의 각도와 속도를 구하는 식 (20) 및 (21)에 활용된다.

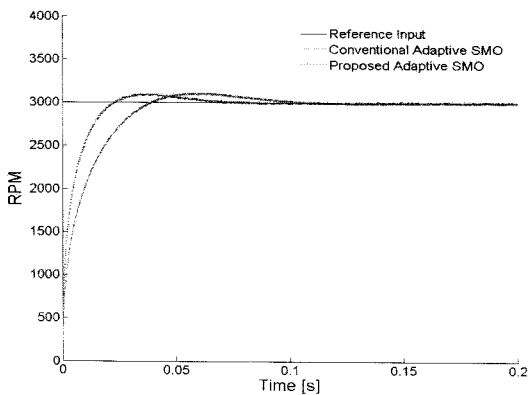


그림 8 Step 입력에 대한 응답특성 비교

Fig. 8 Comparison by step responses

그림 8은 3,000 RPM의 Step 입력에 대한 기존의 적응 슬라이딩 모드 관측기와 제안한 적응 슬라이딩 모드 관측기의 응답특성 결과를 나타내는 실험결과로 각각 3.3 %의 overshoot를 기준으로 기존의 적응 방식은 settling time이 약 180 msec인 반면에 제안한 방식에서는 약 120 msec로 기존의 방식에 비해 약 60 msec 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 제안한 적응 관측기가 기존의 적응 관측기에 비해 회전자의 위치와 속도를 추정함에 있어 적분연산을 사용하지 않은 결과로 판단된다. 즉, 그림 8의 실험을 통해서  $\hat{\theta}$  와  $\hat{\omega}$ 를 추종함에 있어 제안한 적응 관측기가 적분연산을 사용하지 않음으로써 기존의 적응관측기에 대해 상대적으로 빠르게 정상상태에 도달하는 결과를 얻을 수 있다는 것을 확인한 것이다.

이전의 실험은 외란을 배제한 상황에서의 실험을 나타낸 것이므로 모터의 운행 중 발생할 수 있는 외란에 대하여 제안한 관측기의 성능을 평가하는 실험을 추가로 행하였다. 즉, 모터가 일정한 속도로 정상 동작하는 도중에 임의의 시

점에 외부에서 강제로 미지의 부하를 인가했을 때 다시 정상상태로 되돌아오는데 응답특성에 관하여 기존의 적응 관측기와 비교한 실험을 행하였다.

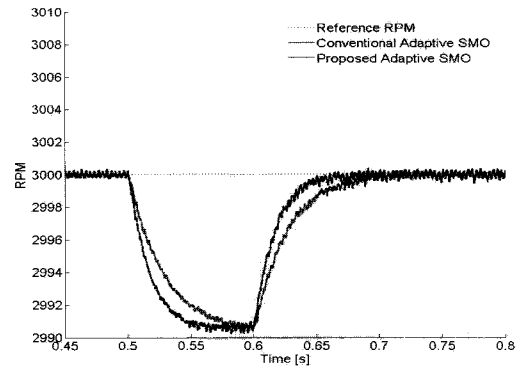


그림 9 외란에 대한 응답특성 비교.

Fig. 9 Comparison of the response by disturbance.

그림 9은 3,000 RPM의 일정한 정상 운행 중 0.5 sec인 시점에서 외부에서 임의로 정격토크의 약 1/10인 0.6 Nm의 부하를 인가했을 때의 추정속도를 비교한 실험에 대한 결과를 나타낸 그림으로 기존의 적응 관측기 방식에 비하여 약간 큰 오차를 나타내지만 두 제어기 모두 10 RPM 이하의 오차를 나타내므로 오차의 크기 면에서는 비슷한 수준이라 할 수 있으나 각각의 추정시간을 비교해 보면 기존의 적응 관측기 방식은 약 200 msec이며 제안한 적응 관측기 방식은 약 150 msec로 정상운행 중 외란에 대한 추정속도 역시 제안한 적응 관측기가 좀 더 우수하다는 것을 입증할 수가 있다.

다음은 변동 가능한 파라미터인 고정자 저항 값 변화에 따른 추정속도를 비교한 실험으로 파라미터 변화에 대한 적응제어를 배제한 개선된 슬라이딩 모드 관측기와 제안한 적응 관측기와의 추정속도 성능을 비교한 실험이다.

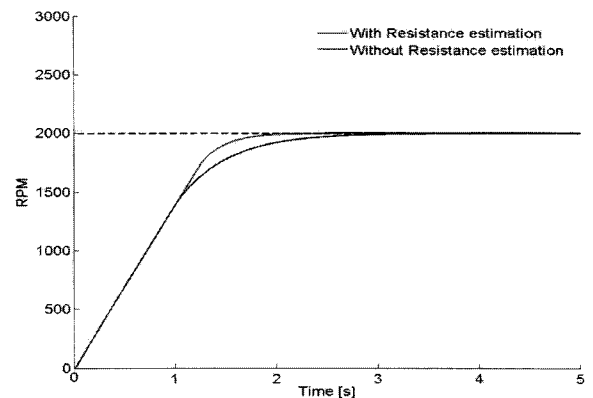


그림 10 초기 저항 값 변동에 대한 응답특성 비교.

Fig. 10 Comparison of the response by change of initial resistance.

그림 10은 초기 고정자 저항 값을 임의로 200 % 변화시켰을 때의 속도 추정에 관한 응답특성의 결과를 나타내는

것으로 기존의 파라미터 변동에 대한 적응 제어를 배제한 슬라이딩 모드 관측기는 변화한 저항 값에 대하여 속도를 추정하는데 약 3 sec의 시간이 소요되는 반면 제안한 적응 관측기에서는 약 2 sec 정도가 소요되는 것을 확인할 수 있다. 실제 시스템 상에서는 고정자 저항 값이 서서히 변화하는 경우에는 크게 문제가 되지 않을 것이나 급속히 열이 발생하는 등의 경우에는 고정자 저항 값의 변화가 모터의 속도 응답 특성에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다. 본 실험을 통해서 알 수 있듯이 제안한 적응 관측기는 특정 파라미터의 변화에 대한 적응을 고려하지 않는 슬라이딩 모드 관측기보다 파라미터 변동에 대해 더욱 빠른 추정속도를 가지고 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다.

**5. 결 론**

본 논문에서는 외란 및 파라미터 변동에 적응 강인한 PMSM의 위치센서가 없는 센서리스 시스템을 구현하기 위하여 슬라이딩 모드 제어 이론을 적용하였으며 슬라이딩 모드 제어에서의 채터링 문제는 스위칭 함수를 sigmoid 함수로 사용한 개선된 슬라이딩 모드를 사용함으로써 해결하고 파라미터 변동에 따른 추정오차 및 시간을 줄이기 위해 고정자 저항을 추정하는 기능을 추가하였다. 이렇게 개선된 슬라이딩 모드 관측기에 고정자 저항을 추정을 추가하여 외란 및 파라미터 변동에 적응 강인한 제어를 위해 제안한 적응 슬라이딩 모드 관측기는 기존의 적응 관측기에 비해 회전자 속도와 위치를 추정하는 과정에서 시스템의 응답특성에 영향을 미치는 적분기의 사용을 줄이는 효과를 통하여 기존의 적응 관측기에 비해 속도 추정 및 외란에 대한 응답특성이 개선된 점을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하였다. 또한, 파라미터 변화에 대한 적응을 배제한 개선된 슬라이딩 모드 관측기와 고정자 저항 값 변화에 대한 응답특성에 관한 추가적인 시뮬레이션을 통하여 제안한 적응 관측기의 우수성을 검증하였다.

**감사의 글**

본 연구는 (부산대학교 특수환경 NAVIGATION/LOCALIZATION 로봇기술 연구 센터를 통한) 지식경제부/한국산업기술진흥원 융복합형로봇전문인력양성사업의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

**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, July1997.  
 [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 sensor," 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, June1994.  
 [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. Sangwong wanich, 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, April1992.  
 [9] M. Ertugrul, O. Kaynak, A. Sabanovic and K. Ohnishi, "A generalized approach for Lyapunov design of sliding mode controller for motion applications," Proc. AMC'96-MIE Conf., vol.1, pp.407-412, March1996.  
 [10] 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.

**저 자 소 개**



**김 홍 열 (金 洪 烈)**

1998년 동의대학교 전자공학과 졸업.  
 2000년 동 대학원 석사. 2008년~현재 부산대학교 전자공학과 박사과정 재학중.  
 관심분야는 마이크로프로세서 응용 및 시스템 설계, 분산제어, 모션 및 모터구동 제어.



**손 주 범 (孫 周 範)**

2008년 동명대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2008년~현재 부산대학교 대학원 메카트로닉스협동과정 석사과정 재학 중. 관심분야는 모터 구동 제어, 지능 제어 시스템, 마이크로프로세서 응용제어.



**이 장 명 (李 章 明)**

1980년 서울대학교 전자공학부 졸업.  
1982년 동 대학원 석사. 1990년 USC(미국 남가주 대학교) 공학박사. 1992년~현재 부산대학교 정교수. 관심분야는 지능 로봇 시스템의 설계 및 제어, 마이크로프로세서 응용, 시스템 설계 및 모터 구동 제어.