

## 파라미터 보정을 가지는 센서리스 영구자석 동기전동기의 슬라이딩 모드 관측기

이성훈, 문철, 남기현, 정문규, 권영안  
 부산대학교 전자전기공학부

### Sliding Mode Observer of Sensorless PMSM with Parameter Compensation

Sung Hun Lee, Cheol Moon, Kee Hyun Nam, Mun Kyu Jung, Young Ahn Kwon  
 School of Electrical Engineering, Pusan National University

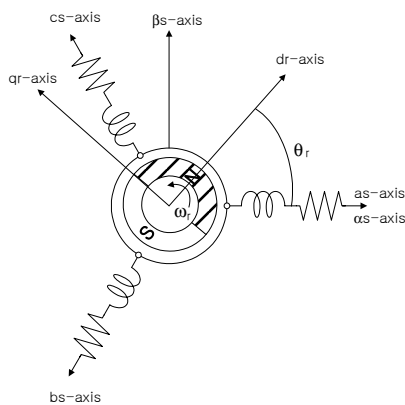
**Abstract** - 최근에 영구자석 동기전동기의 구동방식에서 회전자의 위치 및 속도 검출기가 없는 센서리스 방식이 많이 연구되고 있다. 대부분의 센서리스제어 방식에서 위치 및 속도추정은 전동기 전압방정식으로부터 계산된다. 따라서 파라미터 오차는 센서리스 제어성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구는 파라미터 보정에 의한 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어 성능 개선에 관한 연구로서 파라미터 보정을 가지는 슬라이딩 모드 관측기를 제안하고 종래의 방식과 비교하여 본 연구에서 제안한 방식을 검증한다.

#### 1. 서론

가변속 전동기의 구동 방식이 끊임없이 혁신되고 있다. 본 연구는 센서리스 영구자석 동기전동기의 구동방식에서 파라미터 보정에 관한 연구이다. 영구자석 전동기는 정확한 속도 및 토크제어를 위해서 회전자의 속도뿐만 아니라, 회전자의 위치정보가 반드시 요구된다. 회전자의 위치 및 속도 센서로는 엔코더, 레졸버와 같은 센서들이 사용되고 있는데, 이러한 센서를 사용할 경우 회전자의 위치 및 속도를 직접 검출할 수 있는 장점은 있으나, 경제적인 문제점과 센서의 안정성을 확보하기 위한 전동기의 설계 및 가공 공정이 복잡해지는 단점이 있다. 또한 센서는 사용 환경에 영향을 받기 때문에 주위 온도가 높거나 습기가 심한 곳 또는 진동이 심한 환경에서는 센서의 신뢰도가 감소한다. 따라서 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 회전자의 위치 검출기 및 속도 센서가 없는 센서리스 방식이 많이 연구되고 있다.[1-3] 대부분의 센서리스제어 방식에서 위치 및 속도추정은 전동기 전압방정식으로부터 계산된다. 따라서 파라미터 오차는 센서리스 제어성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 영구자석 동기전동기의 속도 추정에서 파라미터 오차에 의해 발생하는 속도 오차를 배제하기 위하여 파라미터 보정을 가지는 슬라이딩 모드 관측기를 제안하고 종래의 방식과 비교하여 본 연구에서 제안한 방식을 검증한다.

#### 2. 영구자석 동기전동기의 수학적 모델링

본 연구에서 사용된 영구자석 동기전동기는 원통형 영구자석 동기전동기로서 그림 1은 등가모델을 나타낸다.



〈그림 1〉 3상 영구자석 동기전동기의 등가모델

영구자석 동기전동기의 순시 전압방정식을 좌표변환에 의하여 2상 고정자 기준 좌표계  $\alpha s-\beta s$ 축의 전압방정식으로 나타내면 다음과 같다.

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

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

단,  $E_{\alpha s}, E_{\beta s}$  :  $\alpha s-\beta s$ 축 역기전력

영구자석 동기전동기의 토크방정식은 고정자 기준 좌표계에서 고정자 자속과 전류의 벡터 곱으로 구할 수 있다.

$$T = \frac{3}{2} P \Psi_s \times i_s \quad (3)$$

영구자석 동기 전동기의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m + T_L \quad (4)$$

단,  $T$ : 발생 토크,  $T_L$ : 부하토크,  $J$ : 관성계수,  $D$ : 마찰계수

#### 3. 파라미터 보정을 가지는 슬라이딩 모드 관측기

식 (1), (2)로부터 영구자석 동기전동기의 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ E_s \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_s \\ E_s \end{bmatrix} + B v_s \quad (5)$$

단,  $i_s = [i_{\alpha s} \ i_{\beta s}]^T$ ,  $E_s = [E_{\alpha s} \ E_{\beta s}]^T$ ,  $v_s = [v_{\alpha s} \ v_{\beta s}]^T$ ,

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

식(5)의 상태 공간 모델을 기준으로 한 상태 관측기는 다음과 같다.

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bv_s + Ku(i_s - \hat{i}_s) \quad (6)$$

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

영구자석 동기전동기의 역기전력 항에는 전동기의 위치가 삼각함수 형태로 포함되어 있으므로 추정된 역기전력을 이용하여 전동기 회전자의 위치를 추정할 수 있다.

$$E_{\alpha s} = -K_e \omega_r \sin \theta_r \quad (7)$$

$$E_{\beta s} = K_e \omega_r \cos \theta_r \quad (8)$$

$$\theta_r = \tan\left(\frac{-E_{\alpha s}}{E_{\beta s}}\right) \quad (9)$$

마찬가지로, 속도 제어를 수행하기 위한 속도 정보도 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\omega_r = \frac{1}{K_e} \sqrt{(E_{\alpha s})^2 + (E_{\beta s})^2} \operatorname{sgn}(\omega_r) \quad (10)$$

$$\text{단, } \operatorname{sgn}(\omega_r) = \begin{cases} +1 (\omega_r > 0) \\ -1 (\omega_r < 0) \end{cases}$$

영구자석 동기전동기의 회전자 기준 좌표계  $dr-q$  축의 전압방정식은 다음과 같다.

$$v_{dr} = R_s i_{dr} + L_s \frac{di_{dr}}{dt} - L_s i_{qr} \omega_r \quad (11)$$

$$v_{qr} = R_s i_{qr} + L_s \frac{di_{qr}}{dt} + L_s i_{dr} \omega_r + K_e \omega_r \quad (12)$$

추정된 전류와 측정된 전류의 오차로부터 평가함수를 구성하면 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2}(e_d^2 + e_q^2) \quad (13)$$

$$\text{단, } e_d = i_{dr} - \hat{i}_{dr}, \quad e_q = i_{qr} - \hat{i}_{qr}.$$

본 연구에서 제안하는 영구자석 동기전동기의 고정자권선 저항과 역기전력상수 추정은 다음과 같다.

$$R_{s, new} = R_{s, old} - \eta_R \frac{\partial E}{\partial R_s} = R_{s, old} - \frac{\eta_R}{L_s} (i_{dr} e_d + i_{qr} e_q) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} K_{e, new} &= K_{e, old} - \eta_K \frac{\partial E}{\partial K_e} \\ &= K_{e, old} + \frac{\eta_K}{L_s} \frac{\sqrt{E_{\alpha s}^2 + E_{\beta s}^2}}{K_e^2} (i_{qr} e_d - i_{dr} e_q) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{단, } E = \frac{1}{2}(e_d^2 + e_q^2), \quad e_d = i_{dr} - \hat{i}_{dr}, \quad e_q = i_{qr} - \hat{i}_{qr}.$$

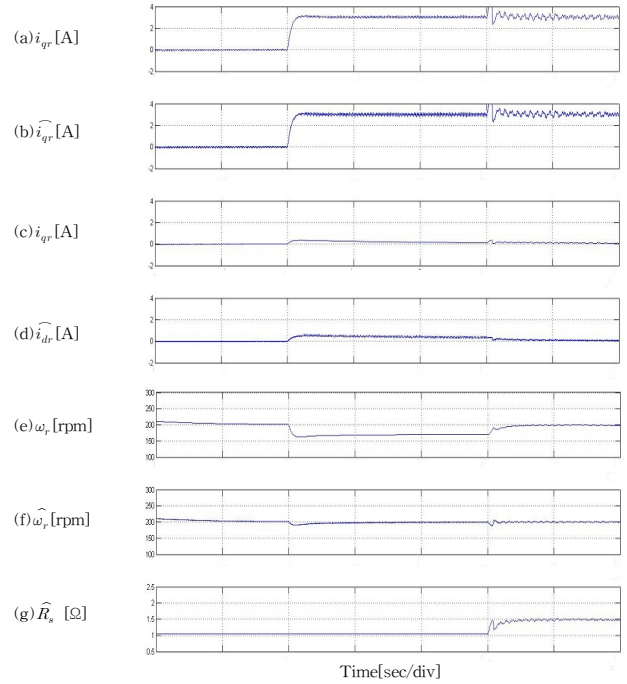
#### 4. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 연구에서 제안한 파라미터 보정을 가지는 슬라이딩 모드 관측기에 의한 센서리스 속도 제어 방식을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 사용된 영구자석 동기전동기는 8극, 750W 전동기이다. 그림 2와 3은 속도지령 값 200rpm으로 운전 중에 2Nm의 부하를 인가하는 경우에 대한 시뮬레이션으로서 각각 고정자권선 저항 및 역기전력 상수를 공칭 값보다 30% 증가한 경우의 속도 응답 결과이다. 결과에서 나타난 바와 같이 본 연구에서 제안한 고정자권선 저항 및 역기전력 상수 보상 방식이 양호한 특성을 나타내고 있다.

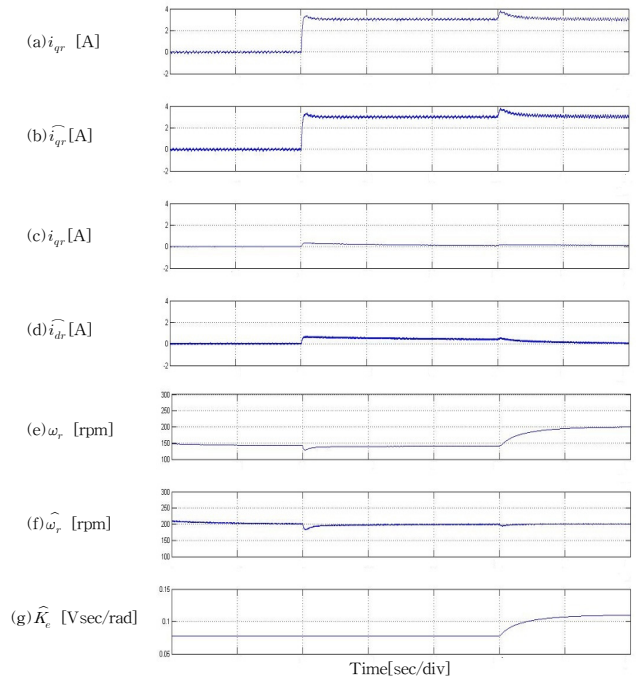
#### 5. 결 론

대부분의 센서리스제어 방식에서 위치 및 속도추정은 전동기 전압방정식으로부터 계산된다. 따라서 파라미터 오차는 센서리스 제어성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구는 파라미터 보정에 의한 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어 성능 개선에 관한 연구로서 고정자 저항 및 역기전력 상수 보상을 가지는 슬라이딩 모드 관측기를 제안하였으며 제안한 방식은 파라미터 보정이 없는 경우보다 양호한 특성을 보여주고 있다.

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 (No. 20104010100670) 이다.



<그림 2> 고정자저항 변동에서 속도응답 특성  
( $\hat{R}_s = 0.7R_s$ ,  $\omega_r^* = 200$  rpm,  $T_L: 0 \rightarrow 2$ Nm)



<그림 3> 역기전력 상수 변동에서 속도응답 특성  
( $\hat{K}_e = 0.7K_e$ ,  $\omega_r^* = 200$  rpm,  $T_L: 0 \rightarrow 2$ Nm)

#### [참 고 문 헌]

- [1] Edited by K. Rajashekara, A. Kawamura, and K. Matsue, *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. of Elect.*, vol.80, no.2, pp.249-263, 1996.
- [3] I. Boldea, "Control issues in adjustable speed drives." *IEEE Ind. Elect. Magazine*, vol.2, no.3, pp.32-50, Sept. 2008.