

적응관측기를 이용한 SPMSM의 센서리스 벡터제어

정택기, 이정철, 이홍균, 이영실, 정동화
국립순천대학교 정보통신공학부

Sensorless Vector Control of SPMSM using Adaptive Observer

Tack-Gi Jung, Jung-Chul Lee, Hong-Gyun Lee, Young-Sil Lee, Dong-Hwa Chung
School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ.

Abstract - This paper is proposed to position and speed control of surface permanent magnet synchronous motor(SPMSM) drive without mechanical sensor. A adaptive state observer is used for the mechanical state estimation of the motor. The observer was developed based on nonlinear model of SPMSM, that employs a d-q rotating reference frame attached to the rotor. A adaptive observer is implemented to compute the speed and position feedback signal. The validity of the proposed sensorless scheme is confirmed by various response characteristics.

1. 서 론

최근, SPMSM(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)은 높은 에너지를 갖는 영구자석을 사용하는 경제적인 장점 때문에 산업용 드라이브의 적용분야에 호응을 받고 있다. SPMSM은 회전자 위치의 정확한 정보를 알기 위하여 엔코더와 리졸버와 같은 위치센서를 사용한다. 센서와 신호선은 전자기적인 잡음 및 기계적인 충격에 약하기 때문에 시스템의 신뢰성을 저하시키며 센서의 장작으로 시스템의 공간을 많이 차지하게 된다.[1] 전압방정식을 이용하는 방법은 고정자전압에서 고정자저항에 의한 전압 강하분을 제거한 항을 적분하여 자속의 위치를 추정한다.[2] 이 방법은 간단하고 효과적이지만 위치추정의 성능이 고정자 저항값의 설정에 영향을 많이 받고 역기전력이 작아 데드타임 등의 외란이 현저하게 나타나는 저속영역에서 사용하기 어려운 점이 있다. INFORM 방법은 큰 전압이 인가되었을 경우 포화현상에 의해 나타나는 고정자 인덕턴스의 변화를 이용하여 회전자자속을 추정한다.[3] 고주파 전압을 주입하는 방법은 전동기에 회전하는 전압벡터를 인가하여 회전자위치를 추종한다. 적응제어 방식으로 MRAC 및 EKF 등이 있다.[4] 이러한 연구들은 드라이브 시스템의 성능을 개선시킬 수 있는 방법이었다. 그러나 시스템의 동정 및 상태추정은 일반적으로 시스템 모델의 구조가 설정된 가정에 기초한다. 본 논문에서는 적응 관측기를 이용한 SPMSM의 속도 및 위치의 센서리스 제어를 제시한다. 그리고 추정 전류치는 회전자의 속도와 위치정보를 얻기 위하여 측정치와 비교한다. 본 논문에서 제시한 상태관측기를 SPMSM 드라이브에 적용하여 다양한 응답특성을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2. SPMSM의 모델링

전기 각속도에 의해 동기회전 d-q 기준축에서 전동기의 모델을 구할 수 있다. Fig. 1은 IPMSM의 d와 q축

의 등가회로를 나타낸다.

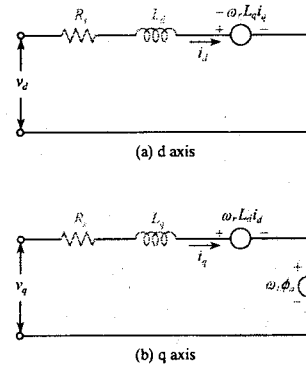


Fig. 1 Equivalent circuit of IPMSM

그림 1의 등가회로에서 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (1)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_a \quad (2)$$

IPMSM의 발생토크는 전류의 성분 i_d 와 i_q 에 비례한다.

$$T_e = P_n [\phi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

여기서, $P_n = \frac{3P}{2}$ 이다.

IPMSM에서 구한 모델식에서 $L_d = L_q = L$ 로 대체하면 S PMSM의 모델식이 성립된다.

$$v_d = R_s i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_r L i_q \quad (4)$$

$$v_q = R_s i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_r L i_d + \omega_r \phi_a \quad (5)$$

$$T_e = P_n \phi_a i_q \quad (6)$$

3. 적응 관측기의 설계

식(4)와 (5)를 정리하여 미분방정식으로 변환하여 행렬형태로 나타내면 다음과 같다.

$$P \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\phi_a \end{bmatrix} \omega_r \quad (7)$$

적용 관측기는 조절모델을 고려하여 식(8)에서 얻는다.

$$P \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \hat{\omega}_r \\ -\hat{\omega}_r & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\phi_a}{L} \end{bmatrix} \hat{\omega}_r \quad (8)$$

여기서, $\hat{\omega}_r$ 는 추정속도이며 \hat{i}_d, \hat{i}_q 은 추정전류이다.

식(8)에서 식(7)을 빼면 다음 식을 얻는다.

$$P \begin{bmatrix} e_{id} \\ e_{iq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \hat{\omega}_r \\ \hat{\omega}_r & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{id} \\ e_{iq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_q \\ -i_d - \frac{\phi_a}{L} \end{bmatrix} e_{\omega} \quad (9)$$

이 오차 방정식을 다음 형태로 표현한다.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{W} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{W} \end{cases} \quad (10)$$

여기서,

$$\mathbf{X} = (e_{id}, e_{iq})^T, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \hat{\omega}_r \\ -\hat{\omega}_r & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = I_{2 \times 2}$$

$$\mathbf{C} = I_{2 \times 2}, \mathbf{D} = 0, \mathbf{W} = \begin{bmatrix} -i_q \\ i_d + \frac{\phi_a}{L} \end{bmatrix} e_{\omega}$$

Popov의 초안정도 이론에 의하여 식(9)는 다음 조건을 만족한다면 점근 안정 ($\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{X} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_{\omega} = 0$)이 된다.

- (1) (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 는 절대 가제어성이고 (\mathbf{C}, \mathbf{A}) 는 절대 가 관측성이다.
- (2) 포워드루프의 전달함수 행렬 $\mathbf{G}(s) = \mathbf{D} + \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}$ 은 정실이다.
- (3) Popov 부등식은 다음 식을 만족한다.

$$\eta(0, t_1) = \int_0^{t_1} \mathbf{W}^T(t) \mathbf{X}(t) dt \geq -r_0^2 \quad (11)$$

$$\forall t_1 \geq 0, r_0^2 \geq 0$$

\mathbf{B}, \mathbf{C} 는 단위행렬이기 때문에 항상 만족한다. \mathbf{B} 가 단위행렬이고, \mathbf{D} 가 0이므로 $\mathbf{G}(s)$ 는 $\mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 와 같이 간단하게 할 수 있으며 다음 식을 만족한다면 정실이다.

$$\begin{cases} PA + A^T P = -Q, P = P^T > 0, Q = Q^T > 0 \\ IP = C \end{cases} \quad (12)$$

\mathbf{C} 가 단위행렬이고 $\mathbf{A} < 0$ 이기 때문에 (2)의 조건을 만족한다. 부등식(11)을 고려하면 다음과 같다.

$$\int_0^t e_{\omega} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_d + \frac{\phi_a}{L} \end{bmatrix}^T X d\tau \geq -r_0^2, \forall t_1 \geq 0, r_0^2 \geq 0 \quad (13)$$

$$m = -i_q e_{id} + (i_d + \frac{\phi_a}{L}) e_{iq} \quad (14)$$

적용규칙은 다음과 같이 선정한다.

$$e_{\omega} = K_p m + K_i \int_0^t m d\tau \quad (15)$$

그림 2는 적용 관측기에 의한 SPMSM 드라이브 시스템의 간단한 블록도를 나타낸다.

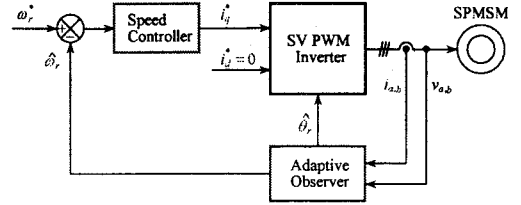


Fig. 2 Block diagram of drive system with adaptive observer

그림 3은 위치제어를 위한 블록도이다. 지령위치와 추정 위치를 비교하여 지령속도를 구하고 지령속도를 추정 속도와 비교하여 제어한다. 속도제어기는 PI 제어기와 리미터로 구성되어 있으며 출력은 지령 q 축 전류 i_q^* 를 발생시킨다. 지령 $d-q$ 축 전류를 SV(Space Vector) PWM 인버터의 블록에서 전류제어기와 좌표변환을 수행하고 PWM에 의해 실제 3상 전류를 발생시킨다.

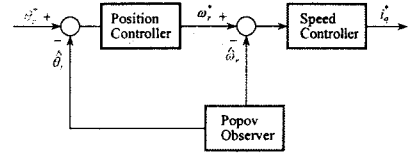


Fig. 3 Block diagram of position controller

4. 시스템의 성능결과

그림 4는 본 연구에서 제시한 센서리스 벡터제어의 결과이다. 0.2[sec]에서 지령속도를 1000[rpm]으로 운전하다가 0.6[sec]에서 속도를 1800[rpm]으로 변화시켰을 때의 응답특성을 나타낸다. 그림 4(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내며 그림(b)는 지령속도와 추정속도를 나타낸다. 추정속도는 지령속도 및 실제속도에 양호하게 추종되고 있다. 그림(c)는 실제 회전각을 나타내며 그림(d)는 추정 회전각을 나타낸다. 추정 회전각도 실제 회전각에 양호하게 추종하고 있으며 그림(e)는 q 축 전류를 나타낸다.

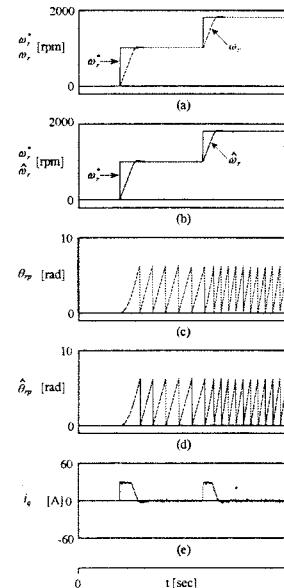


Fig. 4 Response characteristics with change of step command speed

그림 5은 지령속도를 4상한으로 운전시켰을 경우 나타나는 응답특성이다. 지령속도를 전동기의 정·역회전인 4상한으로 운전하였을 경우에도 추종속도는 지령속도 및 실제속도에 양호하게 추종되고 있으며 추정 회전각도 실제 회전각에 양호하게 추정하고 있다.

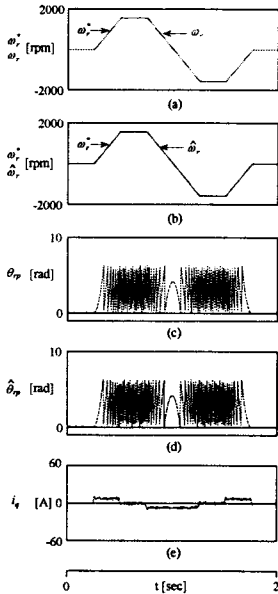


Fig. 5 Response characteristics with quadrant drive

그림 6은 무부하 상태에서 1800[rpm]으로 정상상태로 운전하다가 0.5[sec]에서 0.7[sec]까지 부하토크 2[N·m]인가했을 경우 나타나는 응답결과이다. 부하토크를 인가한 경우에도 추종속도는 지령속도 및 실제속도에 양호하게 추종되고 있다. 또한 추정 회전각도 실제 회전각에 양호하게 추정하고 있다.

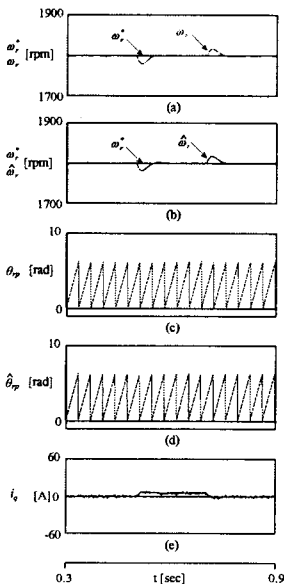


Fig. 6 Response with step variation of load torque

그림 7은 지령위치가 0.2[sec]에서 10π[rad]로 운전하다가 1[sec]에서 -10π[rad]운전했을 경우이다. 그림 7(a)는 지령위치, 실제위치 및 추정위치를 나타낸다. 그림(b)는 실제속도와 추정속도를 나타내고 그림(c)는 실제각과 추정각을 나타내며 그림(d)는 q축 전류를 나타낸다. 추정 위치는 실제위치에 양호하게 추정되고 있으며 추정속도도 실제속도에 매우 양호하게 추정되고 있다. 그리고 추정 회전각도 실제 회전각에 양호하게 추정되고 있다.

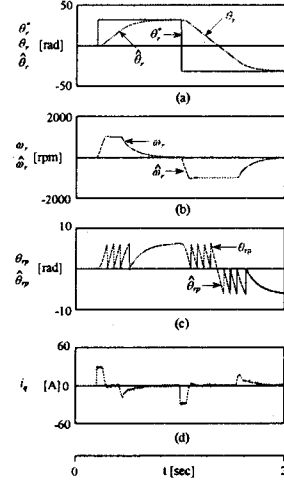


Fig. 7 Response characteristics of position control

5. 결 론

본 논문에서는 적응 관측기를 이용한 SPMSM의 센서리스 벡터제어를 제시하였다. 적응 관측기는 Popov의 초안정도 이론에 기초하였으며 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 지령속도의 변화에도 추정속도 및 위치는 실제속도 및 위치에 양호하게 추정하였다.
- (2) 지령속도를 4상한 운전시켰을 경우에도 추정속도 및 위치는 실제속도 및 위치에 양호하게 추정하였다.
- (3) 부하토크를 인가할 경우에도 추정속도 및 위치는 실제속도 및 위치에 양호하게 추정하였다.
- (4) 스텝 지령위치에서 위치제어의 응답특성도 양호하였다.

본 논문에서는 시스템의 응답특성이 양호하게 나타났으며 제시한 센서리스 알고리즘의 타당성을 입증할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. P. Alves and S. Sathikumar, "Brushless permanent magnet motor position estimator," IEEE IECON Conf. Rec. Meet., vol. 2, pp. 808-813, 1995.
- [2] D. Antic, J. B. Klaassens and W. Deleroi, "Side effects in low speed AC drives," IEEE PESC '94 Rec., pp. 998-1002, 1994.
- [3] M. Schroedl, "Sensorless control of AC machines at low speed and standstill based on the "INFORM" method," IEEE IAS Conf. Rec. Ann. Meet., pp. 270-277, 1996.
- [4] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "Adaptive control," Addison-Wesley, 1989.