

PMSM 드라이브의 센서리스 벡터제어

이정철, 이홍균, 정택기, 정동화
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Sensorless Vector Control of PMSM

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

Abstract - This paper is proposed to position and speed control of interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM) drive without mechanical sensor. The rotor position, which is an essential component of any vector control schemes, is calculated through the instantaneous stator flux position and an estimated flux value of rotating reference frame. A closed-loop state observer is implemented to compute the speed feedback signal. The validity of the proposed sensorless scheme is confirmed by simulation and its dynamic performance is examined in detail.

1. 서 론

PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) 드라이브는 토크밀도가 높고 고 효율 및 규격이 작은 장점 때문에 드라이브의 적용분야 매우 큰 호응을 받고 있다. 최근에는 경제성과 신뢰성 향상을 위하여 PMSM의 위치 및 속도센서를 사용하지 않는 센서리스 방식이 많이 연구되고 있다. PMSM은 고정자 전류벡터를 동기화시키기 위하여 회전자의 절대 위치검출이 필요하다. 종래의 위치정보는 가격이 비싼 엔코더나 레졸버와 같은 변환기를 통해 검출하였다. 그러나 위치 검출기는 전체 시스템의 가격을 상승시키며 고온, 분진 및 진동 등의 열악한 환경에 노출되어 신뢰성을 저하시킨다.[1]-[3]

센서리스 벡터제어를 위하여 제어이론을 적용한 상태관측기[4] 및 EKF(Extended Kalman Filter)[5] 등이 제시되었다. 그러나 이 방법에서는 상태관측 이득, 시스템의 노이즈 및 칼만 이득 등의 결정이 복잡하고 갑작스런 부하변동 및 지령속도의 변화 등과 같은 과도상태에서 양호한 성능을 발휘하기가 어려웠다. 물리적인 현상을 이용한 IFORM[6]은 높은 전압이 인가되었을 때 포화현상에 의해 나타나는 고정자의 인덕턴스의 변화를 이용하여 회전자자속의 위치를 추정하였지만 잡음에 의한 문제가 발생하였다.

본 논문에서는 센서리스 알고리즘에서 존재하는 문제점을 해결할 수 있는 IPMSM 드라이브의 센서리스 벡터제어를 제시한다. 전류와 전압을 측정하여 자속위치를 추정하고 자속위치에 의하여 정확한 회전위치를 추정한다. 추정된 회전위치에 의하여 고속이고 노이즈 없는 정확한 속도추정을 위하여 페루프 속도제어기와 위치추정기를 설계한다. 저속을 포함한 다양한 속도와 부하의 변화에도 실제속도는 지령속도에 양호하게 추종할 수 있다. 본 논문에서 제시한 IPMSM 드라이브의 센서리스 벡터제어의 응답특성을 분석하고 타당성을 입증한다.

2. 본 론

2.1 IPMSM의 모델링

Fig. 1은 PMSM의 d와 q축의 등가회로를 나타낸다. Fig. 1의 등가회로에서 전압방정식을 구하면 식(1),(2)와

같다.

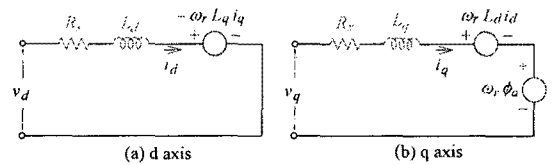


Fig. 1 Equivalent circuit of IPMSM

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

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

식(1)-(2)를 상태 미분방정식 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$P \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_a \\ L_q \end{bmatrix} \tag{3}$$

발생토크는 전류의 성분 i_d 와 i_q 에 비례한다.

$$T_e = \frac{3}{2} P [\phi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \tag{4}$$

2.2 센서리스 벡터제어

2.2.1 위치추정

위치추정은 전압과 전류신호를 이용하여 자속을 추정하고 추정된 자속으로 위치각을 구한다. Fig. 2는 Fig. 1의 등가회로를 기본으로 하여 고정 및 회전좌표계의 자속벡터를 나타낸다. $d-q$ 상은 고정좌표계를 나타내고 d^e-q^e 상은 회전좌표계를 나타낸다. 영구자석의 쇄교 자속인 ϕ_a 는 회전좌표계 d^e 축상에 고정되어 있다. 그리고 고정좌표계의 d 축과 회전좌표계 d^e 축 사이각이 자속의 회전각 θ_r 이고 회전자의 쇄교 자속 ϕ_s 와 영구자석의 쇄교 자속인 ϕ_a 의 사이각이 δ 이다.

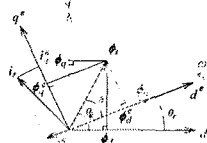


Fig. 2 Flux vector diagram of IPMSM

회전 좌표계의 추정자속은 다음과 같다.

$$\hat{\phi}_d^e = L_d i_d^e + \phi_a \tag{5}$$

$$\hat{\phi}_q^e = L_q i_q^e \tag{6}$$

식(5)와 (6)에서 회전자표계의 추정 자속각은 다음과 같다.

$$\hat{\delta} = \tan^{-1}\left(\frac{\hat{\phi}_d^e}{\hat{\phi}_q^e}\right) \quad (7)$$

고정좌표계 $d-q$ 상의 추정 고정자자속은 고정자전압을 적분하며 d 축 성분은 자석의 상호 자속쇄교수를 보상하여 구한다.

$$\hat{\phi}_d = \int (v_d - R_s i_d) dt + \phi_o \quad (8)$$

$$\hat{\phi}_q = \int (v_q - R_s i_q) dt \quad (9)$$

고정자 추정 자속각 $\hat{\theta}_\phi$ 는 식(8)과 (9)을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\hat{\phi}_q}{\hat{\phi}_d}\right) \quad (10)$$

자속의 회전각 $\hat{\theta}_r$ 은 고정자 자속각 $\hat{\theta}_\phi$ 과 회전자 자속각 $\hat{\delta}$ 에서 추정한다.

$$\hat{\theta}_r = \hat{\theta}_\phi - \hat{\delta} \quad (11)$$

Fig. 3은 자속의 회전각에 의한 회전자의 위치추정을 위한 블록도를 나타낸다.

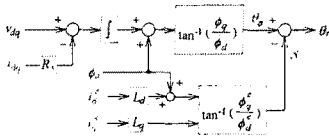


Fig. 3 Rotor angle estimated by stator flux estimation

2.2.2 속도추정

속도제어 시스템에 필요한 페루프 속도신호는 자속각에 의해 측정된 위치에 의해 추정하며 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4는 지령 q 축과 측정된 위치에 의해 속도를 추정하는 시스템이며 이는 근사화한 개루프 모델과 페루프 모델을 포함하고 있다. 개루프 시스템은 빠른 속도추정을 가능하게 하며 위치를 미분하여 얻은 속도 ω_r 는 간단하지만 정확성에서 제한이 있고 많은 노이즈를 포함하고 있다. 페루프 시스템은 정확한 속도의 추정을 위해 필요하며 정상상태의 오차를 제거하기 위하여 적분항을 추가한다. 이러한 속도 판측기는 정격속도 뿐 아니라 저속과 영 속도까지도 정확하게 추정할 수 있다. 속도 판측기의 정밀한 속도 추정은 회전자위치를 정확하게 추정할 수 있어야 한다.

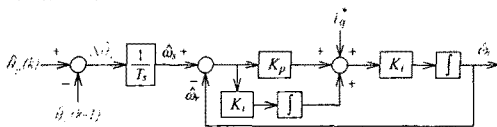


Fig. 4 Block diagram of speed observer

2.2.3 위치 및 속도제어

Fig. 5는 IPMSM 드라이브의 센서리스 제어기의 블록도를 나타낸다. 상전류와 전압을 측정하여 위치추정기를 통해 위치를 추정하고 속도판측기에서 추정속도를 구한다. 추정속도를 지령속도와 비교하여 속도제어기, 좌표변환 및 공간벡터 PWM를 통해 IPMSM을 제어한다.

Fig. 6은 위치제어를 위한 블록도이다. 지령 위치와 추정 위치를 비교하여 지령 속도를 구하고 지령 속도를 추정속도와 비교하여 제어한다. 위치제어를 할 경우 추정된 회전각은 주기적으로 변화한다. 이때 속도에 맥동이 발생하고 위치를 연속적으로 나타낼 수 없다. 그러므로 회전자각의 연속적인 추정에 의한 위치제어를 위해 이능거리연산을 가능하게 하는 위치 카운터가 필요하다.

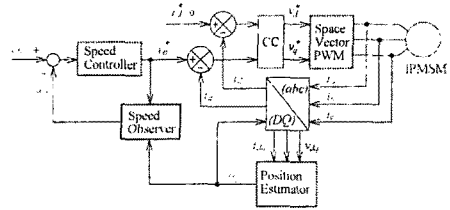


Fig. 5 Block diagram of sensorless controller

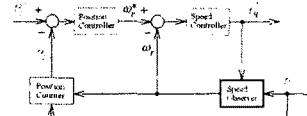


Fig. 6 Block diagram of sensorless position controller

2.3 해석결과

본 연구에서 사용한 IPMSM의 파라미터는 표 1과 같다.

Table 1 Parameters of IPMSM

$3[\text{Phase}], 60[\text{Hz}], P = 4, R_s = 0.57[\Omega], L_q = 8.72[\text{mH}]$ $L_d = 22.78[\text{mH}], \phi_o = 0.1077[\text{Wb}], J = 0.00658[\text{Kg} \cdot \text{m}^2]$ $B = 0.000658[\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec} / \text{rad}]$
--

Fig. 7은 무부하의 상태에서 지령속도의 역회전에 대한 스텝속도의 응답을 나타낸다. $-2000[\text{rpm}]$ 으로 운전한 상태에서 $1[\text{sec}]$ 에서 $2000[\text{rpm}]$ 으로 상승시켜 운전했을 경우에 나타나는 응답이다. 그림(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내며 그림(b)는 지령속도와 추정속도를 나타낸다. 추종속도는 지령속도 및 실제속도에 양호하게 추종되고 있다. 그림(c)는 실제 회전각을 나타내며 그림(d)는 추정 회전각을 나타낸다. 고속의 경우에 추정 회전각도 실제 회전각에 양호하게 추정하고 있다. Fig. 8은 부하토크가 $1[\text{pu}]$ 의 상태에서 지령속도의 역회전에 대한 스텝속도의 응답을 나타낸다. $-100[\text{rpm}]$ 으로 운전한 상태에서 $2.8[\text{sec}]$ 에서 $100[\text{rpm}]$ 으로 상승시켜 운전했을 경우에 나타나는 응답이다. 그림(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내며 그림(b)는 지령속도와 추정속도를 나타낸다. 추종속도는 지령속도 및 실제속도에 양호하게 추종되고 있다. 그림(c)는 실제 회전각을 나타내며 그림(d)는 추정 회전각을 나타낸다. 저속의 경우에도 추정 회전각도 실제 회전각에 양호하게 추정한다.

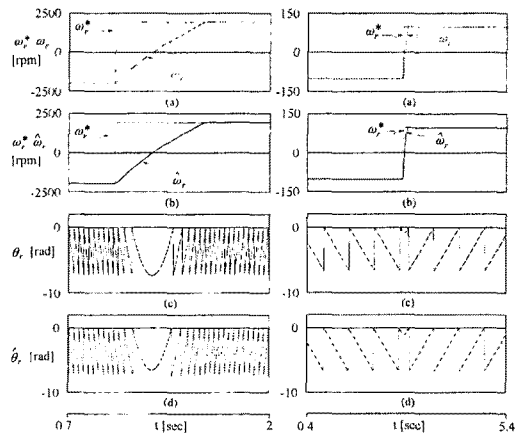


Fig. 7 Speed reversing response in high speed

Fig. 8 Speed reversing response in low speed

Fig. 9는 2승에 비례하는 팬부하를 인가한 상태에서 1500[rpm]으로 운전중 0.8[sec]에서 1800[rpm]으로 속도를 변화시키고 다시 1.2[sec]에서 1500[rpm]으로 속도를 변화시켰을 경우의 응답특성을 나타낸다. 그림(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내며 그림(b)는 지령속도와 추정속도를 나타낸다. 추종속도는 지령속도 및 실제속도에 양호하게 추종되고 있다. 그림(c)는 실제 회전각을 나타내며 그림(d)는 추정 회전각을 나타낸다. 지령속도를 스텝으로 변화시켰을 경우에도 추정 회전각도 실제 회전각에 양호하게 추정하고 있다.

Fig. 10은 무부하 상태에서 1800[rpm]으로 정상상태로 운전하다가 0.8[sec]에서 1.2[sec]까지 부하토크 1[pu]인 가했을 경우 나타나는 응답결과이다. 그림(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내며 그림(b)는 지령속도와 추정속도를 나타낸다. 추종속도는 지령속도 및 실제속도에 양호하게 추종되고 있다. 그림(c)는 실제 회전각을 나타내며 그림(d)는 추정 회전각을 나타낸다. 부하토크를 스텝으로 변화시켰을 경우에도 추정 회전각도 실제 회전각에 양호하게 추정하고 있다.

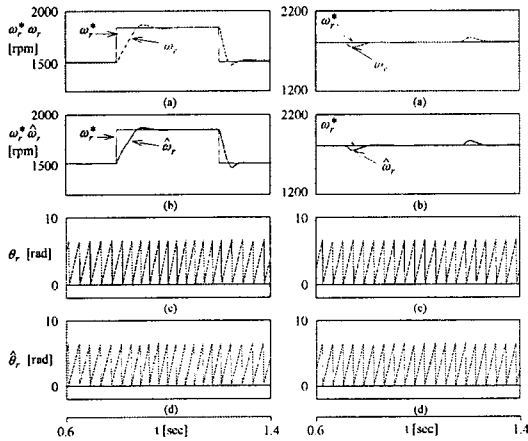


Fig. 9 Response with step variation of speed

Fig. 10 Response with step variation of load torque

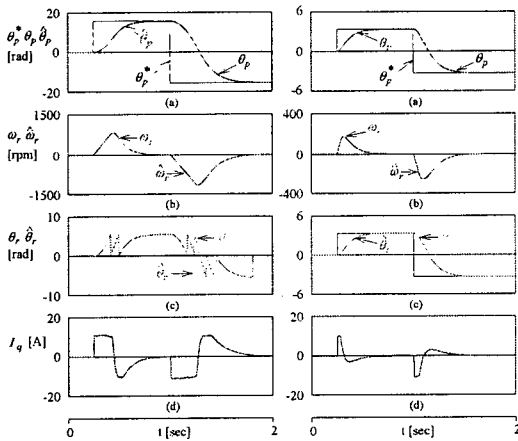


Fig. 11 Response of position control($6\pi[\text{rad}] \rightarrow -6\pi[\text{rad}]$)

Fig. 12 Response of position control($\pi[\text{rad}] \rightarrow -\pi[\text{rad}]$)

Fig. 11은 속도의 2승에 비례하는 부하를 인가한 상태에서 지령위치가 0.5[sec]에서 $6\pi[\text{rad}]$ 로 운전하다가 1[sec]에서 $-6\pi[\text{rad}]$ 운전했을 경우이며 그림(a)는 지령

위치, 실제위치 및 추정위치를 나타낸다. 그림(b)는 실제속도와 추정속도를 나타내고 그림(c)는 실제각과 추정각을 나타내며 그림(d)는 9축 전류를 나타낸다. 추정위치는 실제위치에 양호하게 추정되고 있으며 추정속도도 실제속도에 매우 양호하게 추정되고 있다. 그리고 추정각은 실제각에 양호하게 추정되고 있다.

Fig. 12는 속도의 2승에 비례하는 부하를 인가한 상태에서 지령위치가 0.5[sec]에서 $\pi[\text{rad}]$ 로 운전하다가 1[sec]에서 $-\pi[\text{rad}]$ 운전했을 경우이며 그림(a)는 지령위치, 실제위치 및 추정위치를 나타낸다. 그림(b)는 실제속도와 추정속도를 나타내고 그림(c)는 실제각과 추정각을 나타내며 그림(d)는 9축 전류를 나타낸다. 추정위치는 실제위치에 양호하게 추정되고 있으며 추정속도도 실제속도에 매우 양호하게 추정되고 있다. 그리고 추정각은 실제각에 양호하게 추정되고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 효율이 높고 토크밀도가 크며 다양한 속도와 부하변화에 적용 가능한 IPMSM 드라이브를 구현하기 위하여 위치 및 속도 검출기 없는 센서리스 벡터제어 알고리즘을 제시하였다. 센서리스 벡터제어의 알고리즘을 사용하여 본 논문에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 스텝 지령속도에 의한 추정속도 및 위치는 실제속도 및 위치에 양호하게 추정하였다.
- (2) 지령속도의 역회전에도 고속과 저속에서 추정속도 및 위치는 실제속도 및 위치에 양호하게 추정하였다.
- (3) 지령속도 및 부하토크의 변화에도 추정속도 및 위치는 실제속도 및 위치에 양호하게 추정하였다.
- (4) 지령속도의 4상 한 운전에도 추정속도 및 위치는 실제속도 및 위치에 양호하게 추정하였다.
- (5) 스텝 지령위치에서 위치제어의 응답특성은 양호하였다.

본 논문에서 제시한 센서리스 알고리즘의 응답특성이 양호하게 나타났으며 응답성능의 타당성을 입증하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] J. C. Brunsbach, G. Henneberger and T. Klepsch, "Position controlled permanent excited synchronous motor without mechanical sensors," EPE Con., pp. 38-43, 1993.
- [2] J. Davoine, R. Parret and H. Le-Huy, "Operation of a self controlled synchronous motor without a shaft position sensor," IEEE Trans., IA, vol. 19, no. 2, pp. 217-222, 1993.
- [3] S. Bolognani, R. Oboe and M. Zigliotto, "DSP-based extended kalman filter estimation of speed and rotor position of a PM synchronous motor," IEEE Conf. IECC, pp. 2097-2102, 1994.
- [4] L. A. Jones and J. H. Lang, "A state observer for permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. IE, vol. 36, no. 3, pp. 374-382.
- [5] R. Dhaouadi, N. Mohan and L. Norum, "Design and implementation of an extended kalman filter for the state estimation of a permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. PE, vol. 6, no. 3, pp.491-497, 1991.
- [6] M. Schroedi, "Sensorless control of ac machines at low speed and standstill based on the "INFORM" method," IEEE Proc. IAS, pp. 270-277, 1996.