

IPMSM의 고성능 드라이브를 위한 센서리스 벡터제어

Sensorless Vector Control for High performance Drive of IPMSM

李 廷 喆* · 鄭 東 和**

(Jung-Chul Lee · Dong-Hwa Chung)

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.

Key Words : PMSM, Sensorless drives, vector control, Speed observer

1. 서 론

PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) 드라이브는 토크밀도가 높고 고 효율 및 규격이 작은 장점 때문에 드라이브의 적용분야에 매우 큰 호응을 얻고 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]-[5]

센서를 사용하지 않는 PMSM 드라이브를 위한 제어방식은 역기전력이 정현파인 SPMSM(Surface PMSM)[2]-[3]과 IPMSM(Interior PMSM)[4]-[5]에 관심을 가지고 연구가 진행되어 왔다. SPMSM은 토크리플이 작고 간단한 제어방법 때문에 고성능 드라이브의 적용분야에 많이 이용되고 있다. 그러나 IPMSM은 SPMSM에 비해 효율이 좋고 고온에서 손실이 작기 때문에 전기자동차 및 에어컨 컴프레서의 드라이브 등에 적용되고 있다. 센서리스 벡터제어를 위하여 제어 이론을 적용한 상태관측기[6] 및 EKF(Extended Kalman Filter)[7] 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 얻을 수 없다. 물리적인 현상을 이용한 IFORM[8]은 높은 전압이 인가되었을 때 포화현상에 의해 나타나는 고정자의 인덕턴스의 변화를 이용하여 회전자속의 위치를 추정하였으나 잡음에 의한 문제가 발생하였다.

본 논문에서는 센서리스 알고리즘에서 존재하는 문제점을 해결할 수 있는 IPMSM 드라이브의 센서리스 벡터제어를 제시한다. 전류와 전압을 측정하여 자속위치를 추정하고 자속 위치에 의하여 정확한 회전위치를 추정한다. 추정된 회전위치를 이용하여 빠르게 추종할 수 있고 노이즈가 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. IPMSM의 모델링

그림 1은 PMSM의 d 와 q 축의 등가회로를 나타낸다.

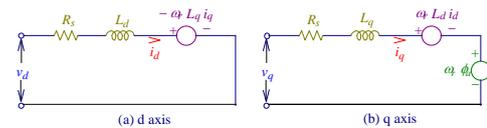


그림 1 IPMSM의 등가회로

Fig. 1 Equivalent circuit of IPMSM

그림 1의 등가회로에서 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

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

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

식(1),(2)를 상태 미분방정식 형태로 표시하면 다음과 같다.

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

* 正 會 員 : 順天大學 情報通信工學部 博士課程

** 正 會 員 : 順天大學 電氣制御工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2002年 5月 21日

最終完了 : 2002年 8月 2日

발생토크는 전류의 성분 i_d 와 i_q 에 비례한다.

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

또한 발생토크는 부하토크와 관련한 관계식은 다음과 같다.

$$T_e = T_L + B\omega_r + Jp\omega_r \quad (5)$$

3. 센서리스 벡터제어

3.1 회전자위치 및 속도 추정

3.1.1 위치추정

위치추정은 전압과 전류신호를 이용하여 자속을 추정하고 추정된 자속으로 위치각을 구한다. 그림 2는 그림 1의 등가 회로를 기본으로 하여 고정 및 회전좌표계의 자속벡터를 나타낸다. $d-q$ 상은 고정좌표계를 나타내고 d^e-q^e 상은 회전좌표계를 나타낸다. 영구자석의 쇠교 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 쇠교 자속 ϕ_s 와 영구자석의 쇠교 자속인 ϕ_a 의 사이각이 δ 이다

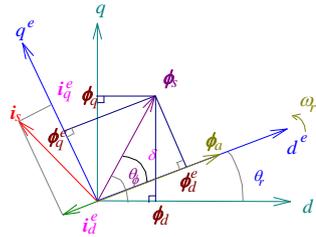


그림 2 IPMSM의 자속 벡터도

Fig. 2 Flux vector diagram of IPMSM

회전 좌표계의 추정자속은 다음과 같다.

$$\hat{\phi}_d^e = L_d i_d^e + \phi_a \quad (6)$$

$$\hat{\phi}_q^e = L_q i_q^e \quad (7)$$

식(6)과 (7)에서 회전자표계의 추정 자속각은 다음과 같다.

$$\hat{\delta} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\phi}_q^e}{\hat{\phi}_d^e} \right) \quad (8)$$

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

$$\hat{\phi}_d = \int (v_d - R_s i_d) dt + \phi_a \quad (9)$$

$$\hat{\phi}_q = \int (v_q - R_s i_q) dt \quad (10)$$

고정자 추정 자속각 $\hat{\theta}_\phi$ 는 식(9)와 (10)을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\phi}_q}{\hat{\phi}_d} \right) \quad (11)$$

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

$$\hat{\theta}_r = \hat{\theta}_\phi - \delta \quad (12)$$

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

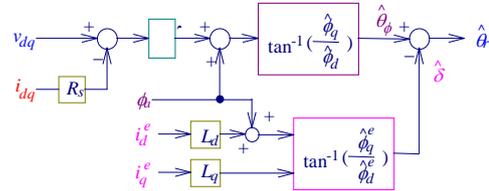


그림 3 고정자자속에 의한 회전자 위치추정

Fig. 3 Rotor angle estimated by stator flux estimation

3.1.2 속도추정

속도제어 시스템에 필요한 페루프 속도신호는 자속각에 의해 측정된 위치에 의해 추정하며 그림 4에 나타낸다. 그림 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_s 는 간단하지만 정확성에서 제한이 있고 많은 노이즈를 포함하고 있다. 페루프 시스템은 정확한 속도의 추정을 위해 필요하며 정상상태의 오차를 제거하기 위하여 적분항을 추가한다. 이러한 속도 관측기는 정격속도 뿐 아니라 저속과 영 속도까지도 정확하게 추정할 수 있다.

속도 관측기의 정밀한 속도 추정은 회전자위치를 정확하게 추정할 수 있어야 한다.

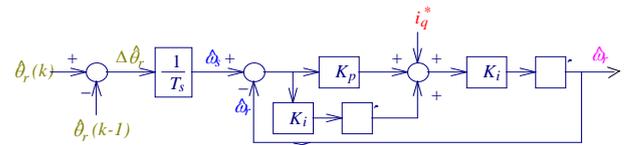


그림 4 속도관측기의 블록도

Fig. 4 Block diagram of speed observer

3.2 위치 및 속도 제어

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

그림 6은 위치제어를 위한 블록도이다. 지령위치와 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 연

속적인 추정에 의한 위치제어를 위해 이동 거리연산을 가능하게 하는 위치 카운터가 필요하다.

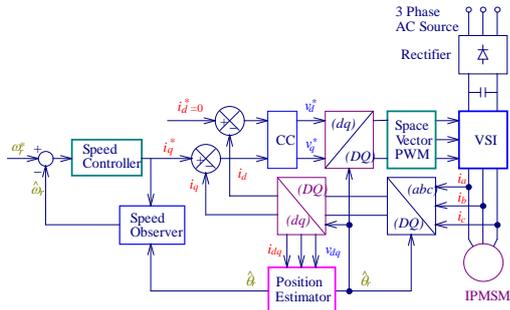


그림 5 센서리스 제어기의 블록도
Fig. 5 Block diagram of sensorless controller

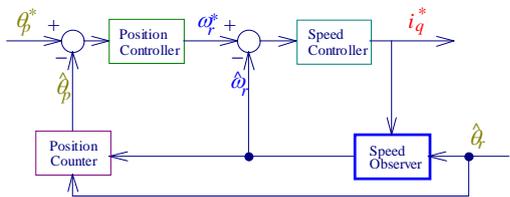


그림 6 센서리스 위치제어기의 블록도
Fig. 6 Block diagram of sensorless position controller

4. 해석 결과

본 연구에서 사용한 IPMSM의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 IPMSM의 파라미터
Table 1 Parameters of IPMSM

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

그림 7은 본 연구에서 제시한 센서리스 벡터제어이며 팬, 펌프 및 송풍기에 적용되는 속도의 2승에 비례하는 부하를 인가한다. 지령속도를 0.25[sec]에서 1800[rpm]으로 상승시켰을 경우 응답특성을 나타낸다. 부하를 인가한 상태에서 기동 상태는 안정된 성능으로 양호하게 나타난다. 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. 추정 회전각도 실제 회전각에 양호하게 추정하고 있으며 그림(e)는 a상 전류를 나타낸다.

그림 8은 그림 7의 응답에 대한 회전 좌표계의 추정자속 $\hat{\phi}_{dq}^*$ 과 고정좌표계 d-q 상의 추정 고정자자속 $\hat{\phi}_{dq}^c$ 의 변화를 나타내고 있다. 자속의 회전각 $\hat{\theta}_r$ 은 고정자 추정 자속각 $\hat{\theta}_\phi$ 와 회전자표계의 추정 자속각 δ 의 오차로서 추정한다.

그림 9는 무부하의 상태에서 지령속도의 역회전에 대한 스텝속도의 응답을 나타낸다. -2000[rpm]으로 운전한 상태에서

1[sec]에서 2000[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 경우에도 추정 회전각도 실제 회전각에 양호하게 추정하고 있으며 그림(e)는 a상 전류를 나타낸다. 그림 10은 부하토크가 1[pu]의 상태에서 지령속도의 역회전에 대한 스텝속도의 응답을 나타낸다. -100[rpm]으로 운전한 상태에서 2.8[sec]에서 100[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 추정하고 있으며 그림(e)는 a상 전류를 나타낸다.

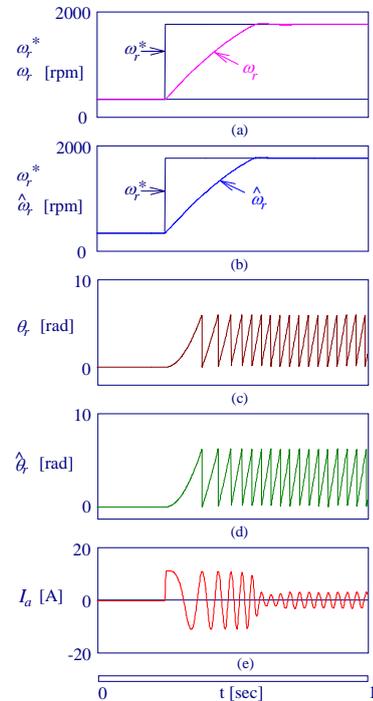


그림 7 스텝 지령속도에 의한 응답특성
Fig. 7 Response characteristics with step command speed

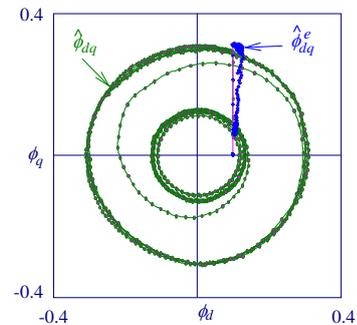


그림 8 스텝 지령속도 응답에 의한 자속변화
 Fig. 8 Variation of Flux with step command speed

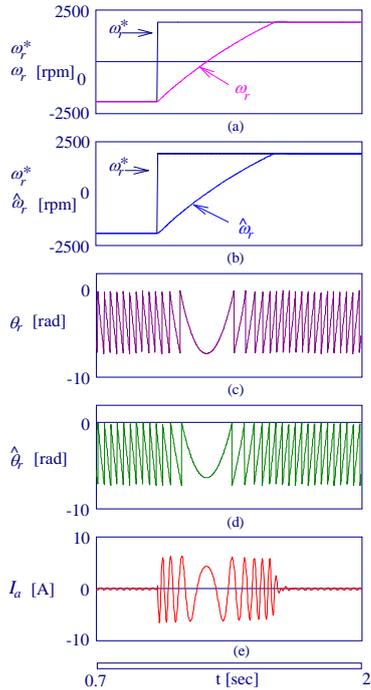


그림 9 고속에서 속도 역회전의 응답
 Fig. 9 Speed reversing response in high speed

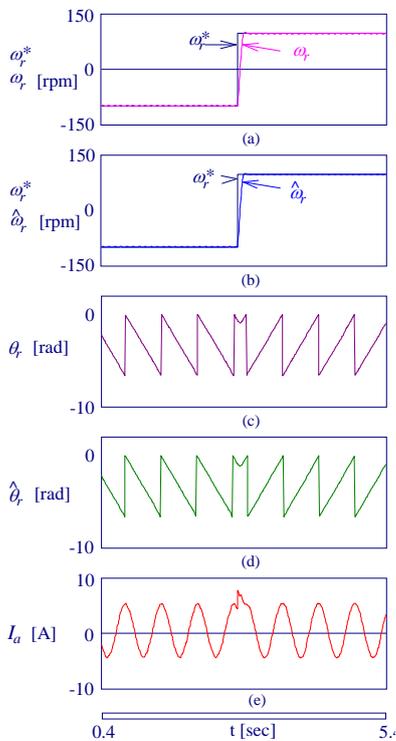


그림 10 저속에서 속도 역회전의 응답
 Fig. 10 Speed reversing response in low speed

그림 11은 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 있으며 그림(e)는 a상 전류를 나타낸다.

그림 12는 무부하 상태에서 1800[rpm]으로 정상상태로 운전하다가 0.8[sec]에서 1.2[sec]까지 부하토크 1[pu]인가했을 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 있으며 그림(e)는 q 축 전류를 나타낸다.

그림 13은 속도의 2승에 비례하는 부하를 인가하였을 경우 지령속도를 4상한으로 운전하였을 경우 나타나는 응답특성이다. 그림(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내며 그림(b)는 지령속도와 추정속도를 나타낸다. 지령속도를 전동기의 정·역회전인 4상한으로 운전하였을 경우에도 추종속도는 지령속도 및 실제속도에 양호하게 추종되고 있다. 그림(c)는 실제 회전각을 나타내며 그림(d)는 추정 회전각을 나타낸다. 추정 회전각도 실제 회전각에 양호하게 추정하고 있으며 그림(e)는 a상 전류를 나타낸다.

그림 14는 속도의 2승에 비례하는 부하를 인가한 상태에서 지령위치가 0.5[sec]에서 6π [rad]로 운전하다가 1[sec]에서 -6π [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 q 축 전류를 나타낸다. 추정위치는 실제위치에 양호하게 추정되고 있으며 추정속도도 실제속도에 매우 양호하게 추정되고 있다. 그리고 추정각은 실제각에 양호하게 추정되고 있다.

그림 15는 속도의 2승에 비례하는 부하를 인가한 상태에서 지령위치가 0.5[sec]에서 π [rad]로 운전하다가 1[sec]에서 $-\pi$ [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 q 축 전류를 나타낸다. 추정위치는 실제위치에 양호하게 추정되고 있으며 추정속도도 실제속도에 매우 양호하게 추정되고 있다. 그리고 추정각은 실제각에 양호하게 추정되고 있다.

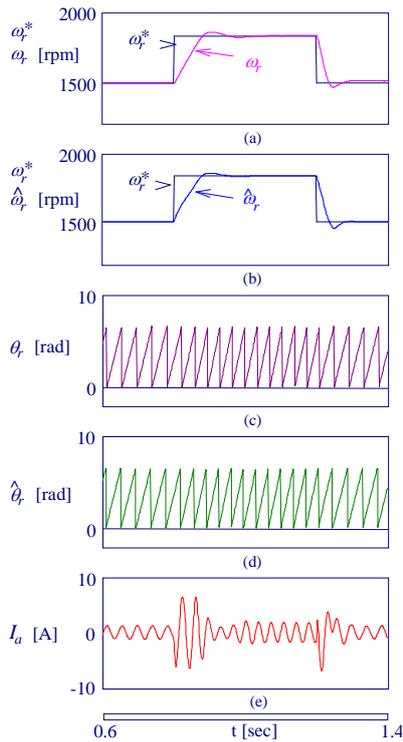


그림 11 속도의 스텝변화에 대한 응답
 Fig. 11 Response with step variation of speed

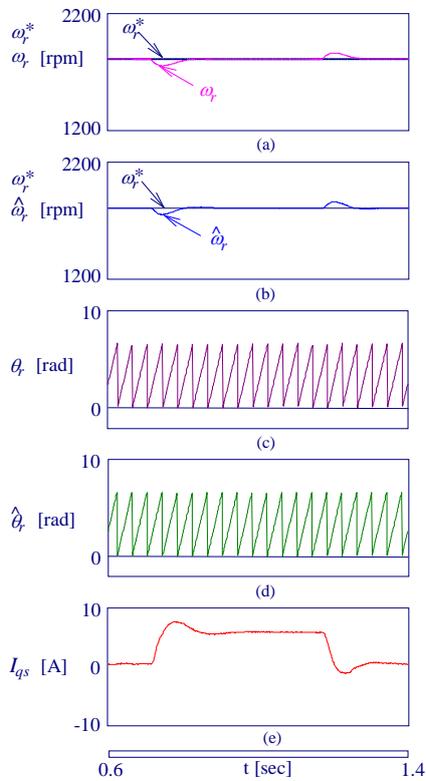


그림 12 부하토크의 스텝변화에 대한 응답
 Fig. 12 Response with step variation of load torque

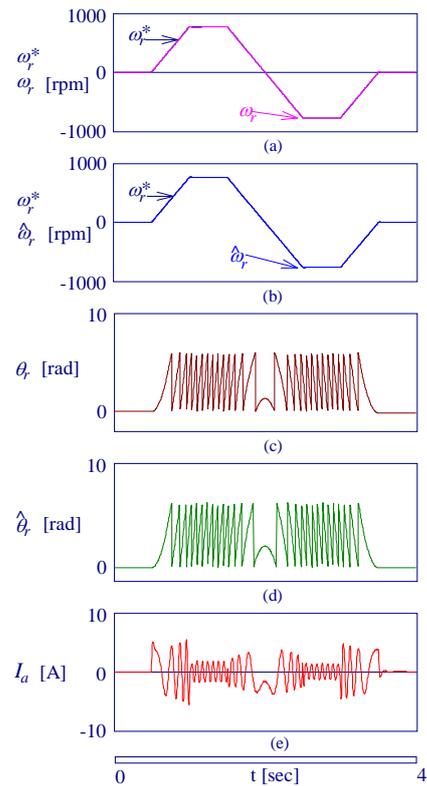


그림 13 지령속도의 4상한 운전특성
 Fig. 13 Drive characteristics of four quadrant of command speed

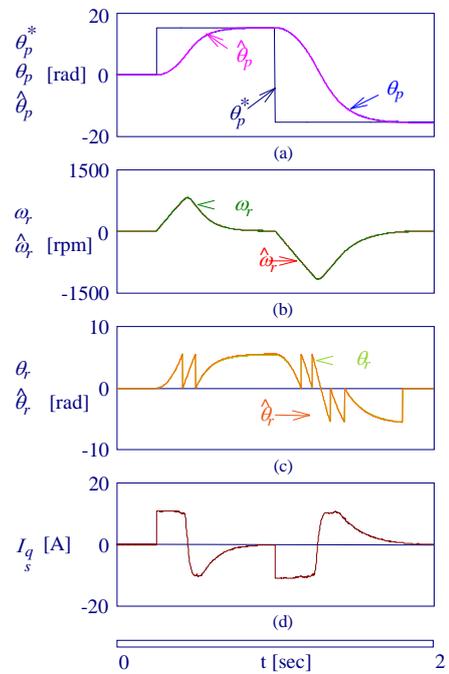


그림 14 위치제어의 응답특성 ($6\pi[\text{rad}] \rightarrow -6\pi[\text{rad}]$)
 Fig. 14 Response characteristics of position control

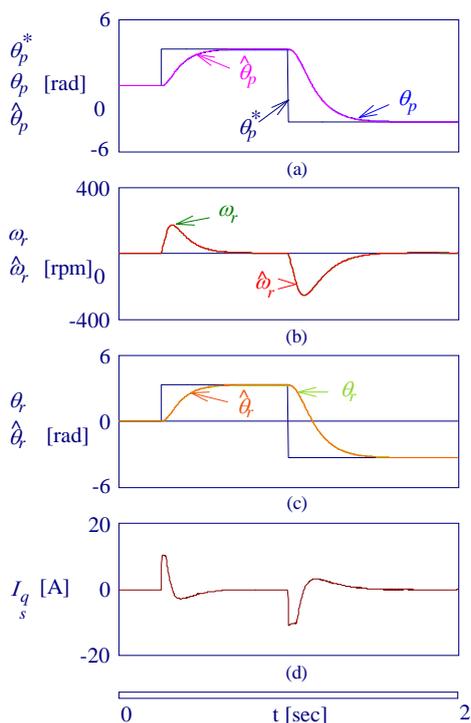


그림 15 위치제어의 응답특성($\pi[rad] \rightarrow -\pi[rad]$)
 Fig. 15 Response characteristics of position control

5. 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 4상한 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 시뮬레이션을 통하여 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. IECEI, pp. 2097-2102, 1994.
 [4] A. B. Kulkarni and M. Ehsani, "A novel position elimination technique for the interior permanent magnet synchronous motor drive," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, pp. 144-150, 1992.
 [5] R. Wu and G. R. Slemon, "A permanent magnet motor drive without shaft sensor," IEEE Trans. IA, vol. 27, pp. 1005-1011, 1991.
 [6] 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.
 [7] 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.
 [8] M. Schroedl, "Sensorless control of ac machines at low speed and standstill based on the "INFORM" method," IEEE Proc. IAS, pp. 270-277, 1996.

저 자 소 개



정 동 화 (鄭東和)

1979년 영남대 공대 전기공학과 졸업.
 1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
 1988년 ~ 1989년 현대중전기(주) 기술연구소 책임연구원.
 1989년 ~ 현재 순천대학교 정보통신공학부 교수

Tel : 061-750-3543
 Fax : 061-752-9841
 E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr



이 정 철 (李廷喆)

1995년 순천대 공대 전기공학과 졸업.
 1998년 순천대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 2002년 현재 동 대학원 박사과정 재학.
 2001년 ~ 현재 제일대학 차량기계학부 겸임교수.

Tel : 061-750-3543
 Fax : 061-752-9841
 E-mail : jcleee0123@hanmail.net