

상태관측기에 의한 영구자석동기전동기의 위치제어에 관한 연구

조광승 · 박성원 · 문백영 · 신동률 · 우정인
 동아대학교

A Study on the Position Control of Permanent Magnet Synchronous Motor using the State Observer

Cho, Kwang-Seung · Park, Sung-Won · Moon, Baek-Young · Shin, Dong-Ryul · Woo, Jung-In
 Dong-A University

Abstract - According to the rapid growth of high speed and precise industry, the application of synchronous motor has been increased. In the application fields, the fast dynamic response is of prime importance. In particular, since the PMSM has characteristics of high speed, high thrust, it has used in high-performance servo drive. From these reasons, it is recently used for high precise position control, and machine tool. In this paper, using the state observer, robust vector position control method for the purpose of improving the system performance deterioration caused by parameter variations is proposed.

1. 서 론

정밀 산업용 기계에서 위치제어를 위한 서보 전동기의 이용이 급부상하고 있다. 최근에는 NeFeB 영구 자석이 개발되면서 회로계의 영구자석을 사용한 동기형 서보 전동기는 효율 및 역률이 높고, 또한 소형 및 저관성으로써 제작이 용이하게 되므로 중소용량의 속도 정밀 제어 응용에 적용이 되고 있다[1][2]. 영구자석 동기전동기(PMSM)의 동특성은 상들이 서로 결합되어 다입력 다출력의 시스템의 특성을 나타내므로 파라미터의 변화에 대하여 크게 변동된다. 더욱이 외부 외란이 인가될 때 구동시스템은 이에 의해 심각한 영향을 받게 된다. 이러한 비선형 특성을 제어하기 위해서 슬라이딩 모드 제어 방식이 채택되어 시스템의 매개변수 변동이나 외란에 대처하고, 빠른 속응성을 얻고 있다.[3]. 또한, PMSM은 동작원리상 회전자 위치의 정확한 위치 검출에 의해서 전류제어가 가능하고, 최근에는 디지털제어계에서 A/D변환이 요구되는 위치검출기를 지양하고, 관측기에 의한 위치 검출법이 제시되고 있다[4].

본 논문에서는 PMSM의 부하외란 변동 및 내부 파라미터의 변동에 민감한 동특성을 고려하여 슬라이딩 모드 제어를 주제어기로 구성하고, 주제어기의 제어 입력값을 추정하기 위하여 연산에 의한 속도관측기를 설치함으로써 측정노이즈의 감소와 경제성을 향상시키고자 하였다. 또한, 영구자석 동기전동기는 전류제어가 필수적이므로 공간벡터 펄스폭변조법을 적용하여 시스템을 구성하였다. 제안된 시스템이 부하 외란이나 부하변동 및 내부 파라미터 변동에도 강인한 특성을 가지는 것을 검증하고자 한다.

2. 영구자석 동기전동기의 해석

2.1 영구자석 동기전동기의 수학적 모델링

영구자석에 의한 기자력은 일정하므로 이를 일정 전류원에 의한 것으로 간주 할 수 있으며, PMSM의 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + p((L_s + L_{md})i_{ds} + \phi_r \cos \theta_r) - \omega_e((L_s + L_{mq})i_{qs}) \quad (1)$$

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + p((L_s + L_{mq})i_{qs}) + \omega_e((L_s + L_{md})i_{ds} + \phi_r \cos \theta_r) \quad (2)$$

여기서, V_{dqs} 는 입력전압이고, i_{dqs} , L_{mdq} , ϕ_r , p 는 각각 입력전류, d-q축 상호 인덕턴스, 영구자석의 쇄교자속, 미분연산자이다.

2.2 영구자석 동기전동기의 출력특성해석

기계적 동특성식을 도출하기 위하여 3상으로 공급되는 전동기 입력전력은 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{in} = \frac{3}{2} [r_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + i_{ds}p((L_s + L_{md})i_{ds} + \phi_r \cos \theta_r) + i_{qs}p((L_s + L_{mq})i_{qs}) + \omega_e(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds})] \quad (3)$$

여기서, 동손분전력, 수직력성분, 토오크성분으로 나누어 질 수 있다.

전기 입력 에너지 P_{in} 이 전부 토오크로 변환된다고 가정하면, 전자기적 출력 P_G 는 식(4)가, 토오크는 식(5)와 같이 된다.

$$P_G = T_e \omega_m = \frac{3}{2} \omega_e [\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}] \quad (4)$$

$$\text{단, } \omega_m = \frac{\omega_e}{P}, \omega_m \text{은 기계적 각속도.}$$

$$T_e = \frac{3P}{2} [(\phi_r \cos \theta_r)] i_{qs} \quad (5)$$

그리고, 관성모멘트를 J 라하고 했을 때 기계적 동특성식은 식(6)와 같다.

$$T_e = Jp\omega_m + T_d \quad (6)$$

여기서, $T_d = B_r \omega_m + T_L$ (T_d 는 제동력)이며, B_r , T_L 는 영구자석 동기전동기의 마찰계수, 부하 토오크이다.

2.3 영구자석 동기전동기의 상태시스템

d, q변환된 영구자석 동기전동기의 모델을 상태방정식으로 표현하면 식(7), (8), (9)와 같으며, 영구자석 동기전동기의 모델 식(1), (2)는 직축, 횡축의 전압, 전류가 서로의 전류의 항을 포함하고 있기 때문에 비선형 함수가 되고 있다.

$$p i_{ds} = \frac{1}{(L_s + L_{md})} (V_{ds} - r_s i_{ds} - \phi_r p \cos \theta_r + \omega_e (L_s + L_{mq}) i_{qs}) \quad (7)$$

$$p i_{qs} = \frac{1}{(L_s + L_{mq})} (V_{qs} - r_s i_{qs} - \omega_e ((L_s + L_{md}) i_{ds} + \phi_r \cos \theta_r)) \quad (8)$$

$$p \omega_m = (T_e - B_r \omega_m - T_L) / J \quad (9)$$

3. 위치제어 시스템

3.1 슬라이딩 모드 위치제어기의 설계

본 논문에서 제안하는 슬라이딩 모드 제어기법을 이용한 위치제어 시스템은 그림 1과 같다.

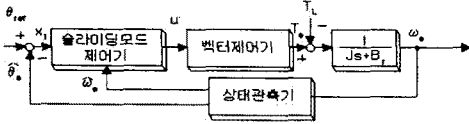


그림 1. 슬라이딩모드 위치제어시스템의 블록선도

슬라이딩 모드 위치제어기를 설계하기 위해 x_1 을 위치 오차, x_2 를 그 미분으로 두고 시스템의 상태벡터를 식 (10)와 같이 둔다.

$$x = [\theta_{ref} - \theta_r, -\omega_e] = [x_1, x_2] \quad (10)$$

또한, 식 (9)의 기계적 동특성식은 다음과 같은 2계 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{p} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -B_r/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -K_T/J \end{bmatrix} i_{qs} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J \end{bmatrix} T_L \quad (11)$$

여기서, 추력상수 $K_T = \frac{3P}{2} \psi_r \cos \theta_r$ 이다.

식 (11)에서 정의된 벡터제어 모터의 기계적 동특성식에서, 제어변수인 위치와 속도를 이용하여 슬라이딩 모드 위치제어기를 구성할 수 있게 된다. 토오크 전류성분 i_{qs} 은 벡터제어 모터구동을 위한 제어 입력, 즉, 기준 토오크가 된다. 위상평면에서의 슬라이딩 궤적은 가속구간, 정속구간, 감속구간으로 나누어 정의한다.

영역 I : 정가속구간

$$s_1 = -B(x_1 - x_{10}) + x_2 \quad (12)$$

여기서, x_{10} 는 전동기의 초기위치

영역 II : 정속구간

$$s_2 = x_2 - x_{20} \quad (13)$$

여기서, $x_{20} \leq \omega_{emax}$ 이며, ω_{emax} 는 전동기의 최대속도

영역 III : 감속구간

$$s_3 = c x_1 + x_2 \quad (14)$$

여기서, c 는 슬라이딩 라인의 기울기

설정된 스위칭 궤적상에 슬라이딩 모드가 존재하도록 하는 제어입력은 식 (15)과 같이 구성한다.

$$u = \psi_1 x_1 + \psi_2 x_2 + K_f \text{sgn}(s_i) \quad i = 1, 2, 3 \quad (15)$$

여기서, 상수 K_f 는 쿨롱 마찰과 부하 효과에 의한 정상 상태 오차를 없애기 위해 사용되는 항이다. 그리고 궤환 제어기의 이득은 식 (16), (17)와 같다.

$$\psi_1 = \begin{cases} \alpha_i, & \text{if } s_i x_1 > 0 \\ \beta_i, & \text{if } s_i x_1 < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\psi_2 = \begin{cases} \gamma_i, & \text{if } s_i x_2 > 0 \\ \delta_i, & \text{if } s_i x_2 < 0 \end{cases} \quad (17)$$

각 구간에서의 이득상수는 슬라이딩 모드 존재조건을 사용하여 시스템의 존재 방정식은 식 (18), (19), (20)와 같다.

$$s_1 \dot{s}_1 = s_1 \left[-\frac{K_T}{J} \psi_1 x_1 - \left(\frac{B_r}{J} + B + \frac{K_T}{J} \psi_2 \right) x_2 + \left(\frac{T_L}{J} - \frac{K_T}{J} K_{sgn}(s_1) \right) \right] < 0 \quad (18)$$

$$s_2 \dot{s}_2 = s_2 \left[-\frac{K_T}{J} \psi_1 x_1 - \left(\frac{B_r}{J} + \frac{K_T}{J} \psi_2 \right) x_2 + \left(\frac{T_L}{J} - \frac{K_T}{J} K_{sgn}(s_2) \right) \right] < 0 \quad (19)$$

$$s_3 \dot{s}_3 = s_3 \left[-\frac{K_T}{J} \psi_1 x_1 + \left(c - \frac{B_r}{J} - \frac{K_T}{J} \psi_2 \right) x_2 + \left(\frac{T_L}{J} - \frac{K_T}{J} K_{sgn}(s_3) \right) \right] < 0 \quad (20)$$

식 (18), (19), (20)의 충분조건으로부터 이득상수를 결정한다.

3.2 최소차원 상태관측기를 이용한 속도 관측기 설계

슬라이딩 모드 위치제어기의 입력변수인 속도 및 위치를 추종하기 위하여 계산이 간단하고 적분연산이 적은 최소차원 상태관측기를 사용하였다.

식 (8), (9)를 기초로 하여 속도 ω_e 에 관한 속도관측기를 설계하면 식 (20), (21)과 같다.

$$\hat{\omega}_e = \xi + L_r \cdot i_{qs} \quad (20)$$

$$p \xi = (a_{22} - L_r \cdot a_{12}) \xi + [(a_{22} - L_r \cdot a_{12}) L_r + (a_{21} -$$

$$L_r \cdot a_{11})] i_{qs} + (b_2 - L_r \cdot b_1) V_d$$

여기서, L_r 은 상태관측기 이득, ξ 는 중간변수

4. 시스템 구성

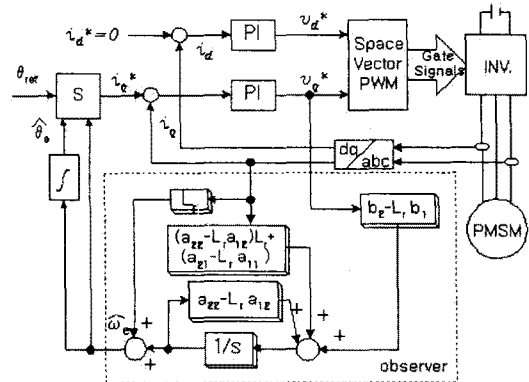


그림 2. 제안한 시스템의 구성도

본 논문에서 제안하는 전체 시스템의 구성도는 그림 2와 같다. 인버터의 출력전압과 전류는 3상/2상 변환 후 속도관측기의 입력이 된다. 속도관측기에서 추정된 회전자 각속도 $\hat{\omega}_e$ 와 위치정보 $\hat{\theta}_e$ 와 θ_{ref} 를 입력으로 하는 슬라이딩 모드 제어기를 구성한다. 슬라이딩 모드 제어기에서 고정자 전류의 전류지령치를 얻는다. 이 전류 지령치와 2상/3상 변환된 전류값에 의해서 지령치에 정확히 추종하도록 각각의 샘플링 순간에서 공간벡터 펄스폭 변조 패턴이 결정된다.

5. 시뮬레이션 결과

슬라이딩 모드 위치제어기의 동특성인 외부 외란과 내부 파라미터의 변동에도 강한 면을 평가하기 위하여

시뮬레이션을 수행하였다. 무부하시와 운전상태에서 어느 순간 외부 외란을 가하였을 때, 그리고 내부 파라메타인 점성 마찰계수의 값을 변동시켰을 경우에 대하여 위치를 추종 파형과 전류를 비교함으로써 제한한 시스템의 타당성을 검증하였다.

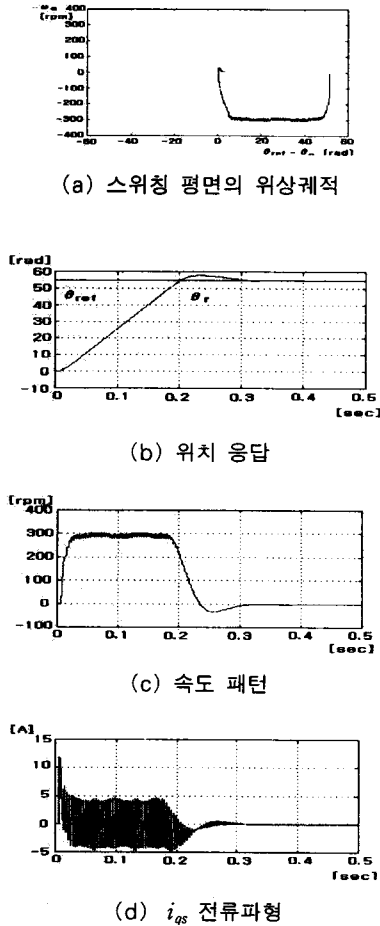


그림 3. 무부하시 시스템 응답특성

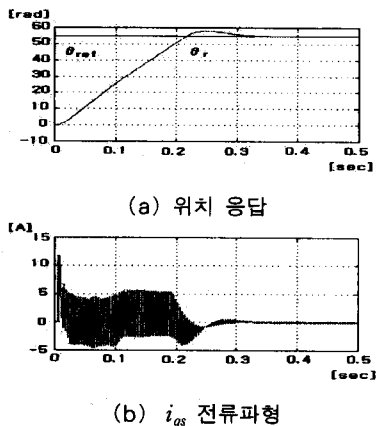
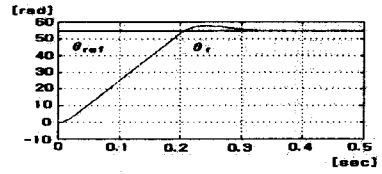
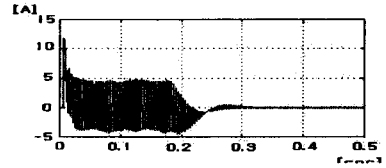


그림 4. 시스템 응답특성
(외부외란인가시 (0.1, 0.2)sec.)



(a) 위치 응답



(b) i_{qs} 전류파형

그림 5. 시스템 응답 특성
(B_r 이 3배일 경우, 무부하)

그림 3에서 그림 5까지의 모든 경우에 대하여 위치추종 특성을 비교했을 때 5% 정도의 오버슈트가 발생하고, i_{qs} 의 토오크 전류값은 시동시에 10A정도까지 올라가며, 약 0.3초후의 정상상태에서는 약 1A정도의 전류만 흐르는 것을 관찰할 수가 있다. 따라서, 속도관측기를 사용한 슬라이딩 모드 제어기는 내부 파라메타의 변동과 외부 외란의 변동에 강인함을 검증할 수가 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 비선형 특성을 가지고 있으며, 상들이 서로 결합된 다입력 다출력 시스템의 특성을 가지고 있으므로 제어가 다소 복잡한 영구자석 동기전동기의 정확한 위치제어를 위하여 상태관측기에 의한 슬라이딩 모드 위치 제어 시스템을 구성하여 PMSM의 위치제어 특성을 고찰하였다. 슬라이딩 모드 제어를 함으로써 외부 부하 토오크의 변동할 때나 내부 파라메타의 값이 변동할 경우에도 강인한 위치제어 특성을 가진다는 것을 시뮬레이션 결과를 통하여 고찰해 보았다.

(참 고 문 헌)

- [1] B.K. Bose, "A High-Performance Inverter-Fed Drive System of an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine", IEEE Transactions in Industrial Applications, vol. IA-24, pp.987-997, 1988
- [2] T.M.Jahns, G.B.Kliman, T.W.Neumann, "Interior permanent magnet synchronous motors for adjustable-speed drives", IEEE Transactions in Industrial Applications, vol. IA-22, No.4, 1986
- [3] Vadim I. Utkin, "Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. IE-40, No.1, 1993
- [4] N. Matsui, "Sensorless PM Brushless DC Motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. IE-43, No.2, pp.300-308, 1996