

최적 슬라이딩모드 제어에 의한 영구자석 동기전동기의 위치제어

*윤 병도 *김 윤호 ** 정 재륜 * 이 병승 * 김 수열
*중앙 대학교 ** 유한 전문 대학

The Position Control of PMSM using Optimal Sliding-mode Control

*Byung-Do Yoon, *Yoon-Ho Kim, **Jae-Ruon Jung, *Byung-Song Lee
* Su-Youl Kim

*Dept. of Electrical Eng., Chung-Ang Univ., ** Yu Han Tech. College

Abstract

This paper described an optimal control technique for position control of an inverter-fed PMSM drive. A control system of PM machine for position, speed and current control based on optimal sliding mode control system is discussed. This is an effective means to keep a system insensitive to parameter variation, disturbance and chattering reduction. The main purpose of the control is to improve the dynamic response of the PMSM with the load of the inertial plant. The optimal sliding mode control strategy is analyzed and the performance is investigated by the computer simulation using actual parameters of a drive system. Simulation results are given and discussed.

1. 서 론

현대 산업의 발달로 우주 항공산업 및 각종 산업 기기는 고기능화 고성능화 되어 우수한 성능의 서보 시스템을 필요로 한다. 이러한 이유로 교류 서어보 전동기의 개발 및 제어에 많은 연구가 진행되었으며 본 논문에서 적용한 교류 서어보 전동기는 영구자석 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor)로서 회전자가 영구자석으로 구성되어 관성이 작고 냉각이 용이하며 효율면에서 유도 전동기 보다 유리하다.[1][2]

그러나, 서어보 시스템의 동특성은 파라미터와 외란의 변화로 인한 비선형성으로 그 제어가 매우 어려운 단점이 있고, 미지의 외란이 전동기에 가해지면 서어보 시스템의 동특성은 저감된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 슬라이딩 모드 제어, 부하 관측기 등 여러가지 제어 이론이 발표되었다. 그러나 실제 구현하기가 어렵거나, 때때로 큰 외란에 대하여 효과적으로 보상하지 못하는 경우가 있다.

본 논문에서는 벡터제어에 의하여 구동되는 영구자석 동기 전동기를 대상으로 외란의 변화에 대하여 효과적으로 대응할 수 있는 최적 슬라이딩모드 제어이론을 적용한 서보 시스템을 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다.[5][6]

2. 영구자석 동기전동기의 수학적 모델링

영구자석 동기 전동기는 계자가 직류 전원에 의하여 여자되는 선선 계자형 동기 전동기의 구조와 유사하며, 동기 각속도 ω_e 로 회전하는 $d - q$ 좌표계에 의한 전압 방정식으로 표현하면 식(2.1)와 같다.

$$V_{qds} = r_{s1}i_{qds} + \omega_e \lambda_{qds} + p\lambda_{qds} \quad (2.1)$$

여기서

$$\lambda_{qds} = [\lambda_{ds} \quad -\lambda_{qs}]^T$$

식(2.1)을 $d - q$ 성분별로 나타내면

$$V_{qs} = r_{s1}i_{qs} + \omega_e \lambda_{qs} + p\lambda_{qs}$$

$$V_{ds} = r_{s1}i_{ds} - \omega_e \lambda_{ds} + p\lambda_{ds} \quad (2.2)$$

여기서

$$\lambda_{qs} = L_{q1}i_{qs}$$

$$\lambda_{ds} = L_{d1}i_{ds} + \lambda_m \quad (2.3)$$

여기서 λ_m 은 영구자석에 의한 쇠교자속 벡터이며, L_d, L_q 는

d, q 축 인덕턴스이다.

영구자석 동기전동기의 발생토크 T_e 는

$$T_e = (3/2)(P/2)(\lambda_{m1}i_{qs} - \lambda_{q1}i_{ds}) \quad (2.4)$$

이다.

식(2.3)의 관계를 고려하면 토크 T_e 는 식(2.5)과 같이 표현될 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} (\lambda_{m1}i_{qs} + (L_d - L_q)i_{qs}i_{ds}) \right) \quad (2.5)$$

식(2.5)에서 $i_{ds} = 0$ 로 하는 자속기준제어를 적용하면, 토크 T_e 는 식(2.6)과 같다.[3]

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \lambda_{m1}i_{qs} = K_t i_{qs} \quad (2.6)$$

여기서 $K_t = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \lambda_m$ 이다.

3. 최적 슬라이딩 모드 제어이론

영구자석 동기전동기의 동특성을 2계시스템으로 표현하면 속도와 위치오차 피드백에 의해서 식(3.1)과 같은 제어가 구성된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & B/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K/J \end{bmatrix} I_{qs} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/J \end{bmatrix} T_L \quad (3.1)$$

$x_1 = \theta - \theta_0$: 위치 오차

$x_2 = \dot{x}_1 = \omega$: 속도

여기서, I_{qs} 는 표면자석형 동기전동기를 벡터 제어할 경우의 입력, J 는 관성 모멘트, B 는 마찰계수이고, T_L 은 부하 토크이다.

이러한 서보 시스템의 우수한 동특성을 개선하기 위한 기법으로 적용되는 일반적인 가변구조제어에서는 추종해야 할 기준모델로서 슬라이딩 라인을 정의하여 외란이나 파라미터변화에 강인한 제어를 할 수 있었다. 그러나, 과도한 파라미터 변화로 인한 해 슬라이딩 라인이 존재하지 않을 경우 제어 알고리즘의 강인한 특성을 잃게된다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 플랜트의 파라미터 및 외란의 변화에 따라 제어기의 최적이득을 추정하여 구조의 가변순간 상태 공간좌표에서의 동작점이 새로운 구조에 따라 동작하는 기법을 고찰하였다.[4]

외란 T_L 이 $t=0$ 인 순간에 가해진다면 시간 영역에서의 상태방정식은 식(3.2)와 같다.

$$T \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = -K_0 T_L - K_0 u(t-\tau) \quad (3.2)$$

그림 1.에서 $u(t_0) = \int_0^{t_0} v(t)dt$ 이고, $v(t)$ 는 제어입력으로 식

(3.3)과 같다.

$$v(t) = \begin{cases} K_1 \frac{dx_1(t)}{dt} & \text{if } x_1(t) \geq 0 \\ 0 & \text{if } x_1(t) < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

여기서 $\sigma = x_2 + cx_1$ 이다.

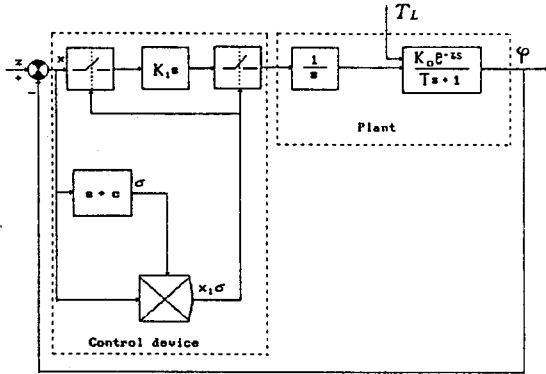


그림 1. 시스템의 블록도

제어입력신호가 상태공간표현계의 동작점 $\sigma=0$ 라인과 접하는 순간의 오차를 $x(t_i(c))$ 이라 하고, $\dot{x}(c, K_1)$ 을 식(3.4)와 같이 정의하자.

$$\dot{x}(c, K_1) = \left| \frac{x(t_i(c))}{K_0 T_L} \right| \quad (3.4)$$

여기서 $\dot{x}(c, K_1)$ 은 표준화된 오차값이다.

따라서, $u(t)$ 는 $K_1 x(t_i(c))$ 이 되어 $\sigma=0$ 라인을 접하는 순간에서 지연시간동안 시스템의 동작점은 식(3.5)와 같이된다.

$$T x_2 + x_1 = -K_0 T_L (1 - K \dot{x}(c, K_1)) \quad (3.5)$$

식(3.5)에서 정상상태 오차가 존재하지 않는 최적 이득은 식(3.6)과 같이되고,

$$K_{1,opt} = [\dot{x}(c, K_{1,opt}) K_0]^{-1} \quad (3.6)$$

존재범위는 다음과 같다.

$$K_0^{-1} (1 - e^{-\sqrt{T}})^{-1} > K_{1,opt} > K_0^{-1}$$

만약 정상상태 오차가 발생하면 이득을 증가시키고, 오버슈트가 발생하면 이득을 감소시키는 최적이득 입력은 식(3.7)과 같다.

$$v(t) = \begin{cases} K_1(t) \psi(t) \left[\frac{dx(t)}{dt} + kx(t) - \frac{dv(t)}{dt} \right] & \text{if } |x(t)| + \left| \frac{dx(t)}{dt} \right| > \varepsilon, \\ 0 & \text{if } |x(t)| + \left| \frac{dx(t)}{dt} \right| \leq \varepsilon, \end{cases}$$

$$\frac{dK_1(t)}{dt} = \begin{cases} a_1 v(t) \frac{dv(t)}{dt} - a_1 \left| \frac{d(\text{sign } x(t))}{dt} \right| & \text{if } |x(t)| + \left| \frac{dx(t)}{dt} \right| > \varepsilon, \\ 0 & \text{if } |x(t)| + \left| \frac{dx(t)}{dt} \right| \leq \varepsilon, \end{cases} \quad (3.7)$$

또한, 식(3.7)에서 제어 시스템이 노이즈에 강한 특성을 갖도록 ε 을 정의하면, 새로운 슬라이딩 라인은 식(3.8)과 같다.

$$\sigma_\varepsilon = |x_1| + |x_2| - \varepsilon \quad (3.8)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 논문에서 제안된 최적 슬라이딩모드 제어이론을 적용하여 시스템의 동특성을 고찰하였다. 영구자석 동기전동기의 파라미터는 표 1. 과 같고, 시뮬레이션 과정의 샘플링 타임은 1ms로 하여 실행하였다. 전체 시스템의 블록도는 그림 3. 과 같다.

그림 4. 는 위치명령 60[rad]에 따른 속도를 나타내고, 그림 5. 는 위치명령 60[rad]에 따른 위치오차를 나타낸다. 또한 그림 6. 은 속도 및 위치오차의 파형을 나타내며 제안된 최적 슬라이딩모드 제어이론의 우수성을 입증하고 있다.

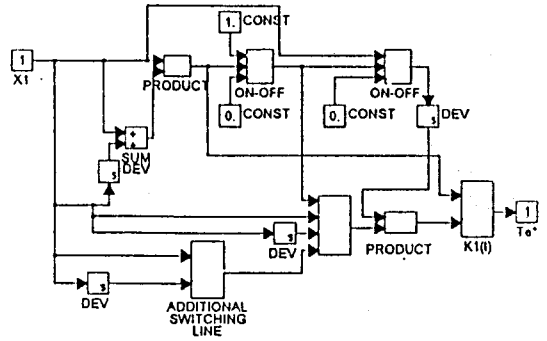


그림 2. 최적 슬라이딩모드 제어기

표 1. 영구자석 동기 전동기 파라미터

정격 출력	200	[watt]
정격 속도	2000	[rpm]
정격 전류	2.2	[A]
정격 전압	230	[V]
고정자 저항	2.6	[ohm]
고정자 인덕턴스	10.98	[mH]
최전자 관성모멘트	5.96	[kg-cm-cm]
극수	2	[poles]

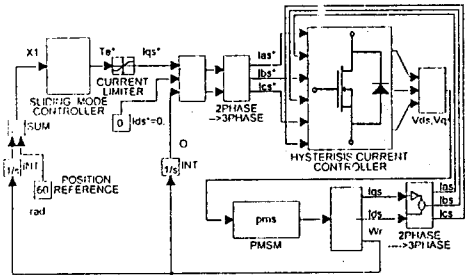


그림 3. 시뮬레이션 전체 블록도.

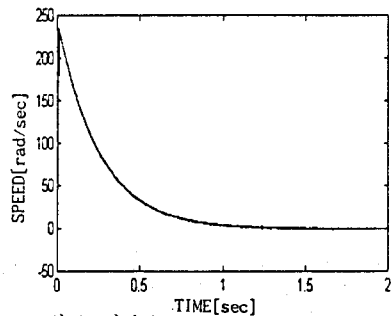


그림 4. 위치명령 60[rad]에 따른 속도

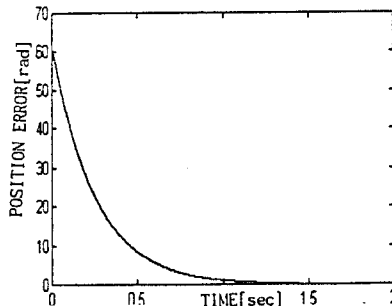


그림 5. 위치명령 60[rad]에 따른 위치오차

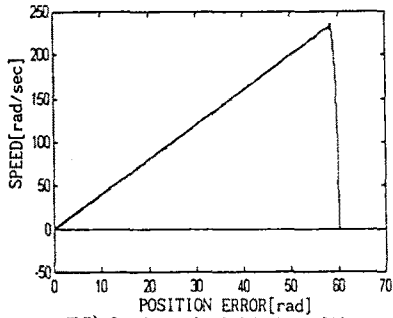


그림 6. 속도 및 위치오차의 파형

5. 결 론

본 논문에서는 최적 슬라이딩 모드제어이론을 적용하여 플랜트의 파라미터 및 외란의 변화에 따라 제어기의 최적이득을 추정하여 구조의 가변순간 상태 공간좌표에서의 동작점이 새로운 구조에 따라 동작하는 기법을 고찰하였다. 시스템의 파라미터 변화에 따라 슬라이딩 라인이 사라지게 되는 경우, 제안된 알고리즘을 시스템에 적용하여 제어기의 최적 이득을 추정하므로써 시스템의 동특성을 개선함은 물론, 기존의 슬라이딩 모드 제어기의 단점을 보완하였다. 또한, 정상상태에서 발생할 수 있는 위치오차 및 속도의 노이즈를 제거하는 필터 효과도 입증하였다.

참 고 문 헌

- (1) T. J. E. Miller "Brushless permanent-magnet and reluctance motor"
- (2) Shigeo Morimoto, Keita Hatanaka, Yi Tong, Yoji Takeda, and Takao Hirasaka, "Servo drive system and control characteristics of salient pole permanent magnet synchronous motor" IEEE Trans. Industry Application, Vol. 29, No. 2, March/April 1993
- (3) 윤 병도, 정 재훈, "전력전자 공학"
- (4) U. Itkis, "Control systems of variable structure"
- (5) C. Namuduri and P. C. Sen, "A servo control system using a self-controlled synchronous motor (SCSM) with sliding mode controller," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. IA-23, No. 2, March/April 1987.
- (6) Hideki Hashimoto, "Variable structure strategy for motion control systems", IECON 1987.