

SMC를 이용한 PMSM의 강인한 PID 제어

주형렬, 박승규, 곽군평
창원대학교

A Robust PID control using SMC

Hyeong-Yeol Joo, Seung-Kyu Park, Gun-Pyong Kwak
Changwon National University

Abstract - This paper discusses about a robust servo system applying PID control to PMSM. The system has robustness by Sliding Mode Controller. A novel sliding surface is defined by virtual state. This sliding surface has nominal dynamics of an original PID control system. So Sliding Mode Control(SMC) technique can be used with PID controller. Its design is based on the augmented system whose dynamics have a higher order than that of the original system. The reaching phase is removed by using an initial virtual state which makes the initial sliding function equal to zero.

1. 서 론

영구 자석형 교류 동기전동기(PMSM : Permanent Magnet AC Synchronous Motor)는 직류 전동기에 비해서 상대적으로 소형, 경량이고, 직류 전동기와 같이 선형적인 토크 대 전류, 속도 대 전압 특성을 지닌 전동기로서 가변속 운전 및 제어가 용이하며, 토크 대 관성의 비가 높아 소형으로 높은 출력을 낼 수 있다. 또한 회전자에 영구자석을 이용하기 때문에 토크 성분과 계자 성분 전류가 요구되는 유도 전동기에 비해 효율과 역율이 높기 때문에 가변속 운전이 요구되는 응용에 적합하다. 이러한 모터의 가변속 운전시에 필수적으로 요구되는 사항은 시스템의 파라메타나 외란 그리고 기타 외부 환경의 변화에도 전동기의 동특성은 강인해야 한다는 것이다.[1],[2]

그러나, 실제 PMSM을 서보제어에 사용함에 있어서 가장 많이 사용되는 PID 제어방식은, 센서 출력이나 PMSM의 입력전압 등에 노이즈가 포함되어, 좋은 성능을 내지 못하는 경우가 있다. 특히, 부하가 변함에도 불구하고, 노이즈로 인해 부하변동률을 제대로 인식하지 못하여 그로 인해 발생하는 외란에 적절히 대처하지 못하는 경우가 있다.

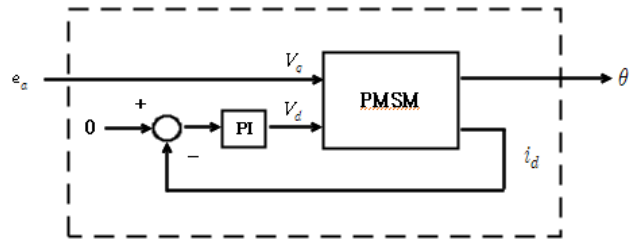
슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control:SMC)는 제어대상의 상태가 스위칭 평면에 도달하여 슬라이딩 운동을 하도록 고속 스위칭 입력을 인가하는 제어방식으로 슬라이딩 모드에서 파라미터 변화와 외란에 둔감하고 응답의 속응성 면에서도 다른 제어기법에 비하여 우수하다.[3] 그러나 슬라이딩 모드 제어는 근본적으로, 슬라이딩 평면에 도달하기 전까지는 계통의 동특성을 보장할 수 없다는 도달기간(reaching phase) 문제와 SMC 계통의 상태 궤적이 제어되는 계통보다 낮은 차수를 가지는 슬라이딩 평면의 동특성에 의해서 결정되기 때문에 SMC 외의 다른 제어기법과 함께 결합되어 사용되어야 할 수 없는 특성을 가지고 있다.[4]

본 논문에서는 외란이나 불확실성이 존재하지 않는 공칭계통의 PMSM 모델과 PID제어기를 결합한 공칭제어계통을 정의하고, 이 공칭제어계통의 가제어표준형 상태방정식을 기초로 하여, 새로운 가상상태를 정의한다. 가상 상태를 도입하여 슬라이딩 평면을 구성함으로써 슬라이딩 모드가 공칭제어계통의 동특성을 가지도록 하여 PID 제어기와 SMC의 결합형태의 제어기 구성을 가능하게 하고, 도달기간 또한 제거한다. 이 가상상태가 더해진 차수가 증가된 계통을 구성하고 이 계통을 외란이 존재하는 계통으로 고려하여 슬라이딩 모드 제어를 적용한다. 이를 통해 외란에 강인한 PID제어기를 설계한다.

2. 본 론

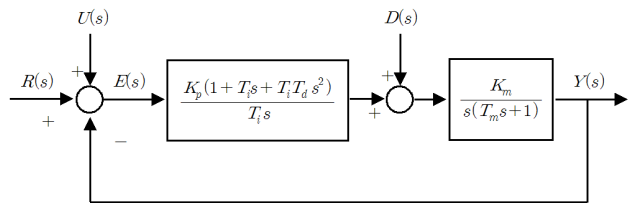
2.1 시스템 구성

PMSM은 고정자의 a, b, c상에 의해 회전자계가 만들어지고, 이와 같은 속도로 로터가 회전한다. 백터제어 기법을 이용하면, PMSM의 입력을 직류 전류 i_d, i_q 로만 구성할 수 있는데, 회전자 자속방향에 고정된 i_d 를 0으로 고정하면, i_q 만이 제어입력이 되는, 그림1과 같이 DC 모터와 정확히 같은 거동을 얻을 수 있다.[5],[6]



<그림 1> 선형화 된 PMSM Block Diagram

그림 1의 선형화된 PMSM의 모델로부터, 불확실성이 존재하지 않는 공칭계통을 얻는다. 그리고 이 공칭계통의 전달함수와 PID 제어기의 전달함수를 결합하여 공칭제어계통을 만든다. 이 공칭제어계통에 외란에 강인한 SMC제어계통을 결합한다. 그 결과는 그림2와 같다. 여기서 $R(s)$ 는 공칭제어기에 대한 기준입력, $U(s)$ 는 슬라이딩 모드 제어기의 입력, $D(s)$ 는 외란, 제어량은 위치값(θ)이다.



<그림 2> 공칭제어계통과 결합된 SMC제어계통의 전달함수

그림 2에서 사용된 상수값들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 K_p &= \text{비례 이득} & K_p/T_i &= \text{적분 이득} & K_p T_d &= \text{미분 이득} \\
 K_m &= \frac{K_t}{R_a b + K_t K_b} & T_m &= \frac{R_a J}{R_a b + K_t K_b} \\
 R_a &= \text{전기자 저항} & K_t &= \text{토크 상수} & K_b &= \text{역기전력 상수} \\
 J &= \text{샤프트 관성 모멘트} & b &= \text{샤프트 점성-마찰 계수}
 \end{aligned}$$

단, 전전자 인덕턴스는 일반적으로 작기 때문에 무시하였음

2.2 공칭제어계통

전달함수로 표현된 공칭제어계통을 상태 전도를 이용하여 (1)의 가제어 표준형의 상태방정식과 (2)의 출력방정식으로 변환한다.[7] 여기서 $r(t)$ 는 미분가능한 공칭제어입력이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{o1}(t) \\ \dot{x}_{o2}(t) \\ \dot{x}_{o3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{o1}(t) \\ x_{o2}(t) \\ x_{o3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \quad (1)$$

$$y(t) = [a_1 \ a_2 \ a_3] X_o \quad (2)$$

3. 결 론

PID 제어기는 서보제어에 가장 많이 사용되는 제어기이나, 외란이나 불확실성에 약한 단점이 있다. 본 논문에서는 공칭계통인 PMSM과 공칭제어기로 사용한 PID 제어기를 결합한 공칭제어계통 자체를 가상상태를 추가하여 차수가 증가된 슬라이딩 평면을 이용하여 설계되는 SMC로 제어하였다. SMC 계통의 상태는 PID제어기에 의해 공칭제어계통의 동특성을 가지게 된다.

SMC는 공칭제어계통을 보통의 제어대상으로 보고, 슬라이딩 평면 상에 존재하도록만 제어한다. 그로인해 불확실성이나, 외란의 영향에 강인하게 되면서, 상태 $x(t)$ 는 공칭제어입력 $r(t)$ 에 의해 제어되는 PID제어계통의 궤적을 따르게 된다.

PID 제어기를 공칭제어기로 사용하고 이를 SMC와 결합함으로써, 외란이 존재하는 계통에 대해서도 공칭제어계통의 궤적을 따라갈 수 있는 강인한 PID 제어기를 설계하였다. 또한 가상상태의 초기치를 적절하게 선택함으로써 도달기간을 쉽게 제거할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이동춘, "AC SERVO SYSTEM의 이론과 설계의 실제", 서울대학교 기초전력공학공동연구소, 1993.
- [2] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", Prentice Hall, 1998.
- [3] Danny Grant and Vincent Hayward, "Variable Structure Control of Shape Memory Alloy Actuators".
- [4] 박승규, 안호균, "가상의 상태를 이용한 새로운 슬라이딩 모드 제어기", Journal of Control, Automation and Systems, Vol 5, No. 5, July, 1999.
- [5] Utkin, Guldner and Shi "Sliding Mode Control in Electromechanical Systems", Taylor & Francis, 1999.
- [6] 설승기, "전기기기제어론", 브레인코리아, 2002.
- [7] Katsuhiko Ogata "Modern Control Engineering", Prentice Hall, 1999.

$$\text{단, } a_1 = \left(\frac{K_p K_m}{T_i T_m} \right), a_2 = \left(\frac{K_p K_m}{T_m} \right), a_3 = \left(\frac{1 + K_p K_m T_d}{T_m} \right)$$

2.3 새로운 슬라이딩 평면을 가지는 SMC

(1)의 가제어 표준형의 공칭제어계통으로부터 새로운 가상상태를 정의한다. X_v 의 3번째 상태 x_{o3} 을 미분한 공칭 가상상태 x_{ov} 를 (3)과 같이 정의하고, 이는 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{x}_{o3}(t) = x_{ov}(t) \quad (3)$$

$$\dot{x}_{ov}(t) = -a_3 x_{ov}(t) - a_2 x_{o3}(t) - a_1 x_{o2}(t) + \dot{r}(t) \quad (4)$$

새로운 가상상태 x_v 는 (4)의 공칭상태 x_{o1}, x_{o2}, x_{o3} 를 비공칭 상태인 x_1, x_2, x_3 로 대체함으로써 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{x}_v(t) = -a_3 x_v(t) - a_2 x_3(t) - a_1 x_2(t) + \dot{r}(t) \quad (5)$$

그림 2의 블록도에서 기준입력 $R(s)$ 를 0으로 가정된 상태에서의 전달함수를 구하고, 그로부터 가상상태를 포함하는 차수가 증가된 계통은 (6)과 같이 구성된다. 여기서 $u(t)$ 는 슬라이딩 평면위에서 슬라이딩 모드를 보장하는 SMC 입력이고, $d(t)$ 는 외란이다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX(t) + Bu(t) + Dd(t) \\ \dot{x}_v(t) &= -a_3 x_v(t) - a_2 x_3(t) - a_1 x_2(t) + \dot{r}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{단, } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$a_1 = \left(\frac{K_p K_m}{T_i T_m} \right), a_2 = \left(\frac{K_p K_m}{T_m} \right), a_3 = \left(\frac{1 + K_p K_m T_d}{T_m} \right)$$

위의 차수가 증가된 시스템에 대한 새로운 슬라이딩 평면을 다음과 같이 결정한다.

$$s = x_v(t) + a_3 x_3(t) + a_2 x_2(t) + a_1 x_1(t) - r(t) = 0 \quad (7)$$

가상 상태의 초기치를 다음과 같이 선택하면, s 의 초기치가 0이 되어 공칭제어계통의 상태들이 슬라이딩 평면위에서부터 시작하므로 도달기간이 제거된다.

$$x_v(t_0) = -a_3 x_3(t_0) - a_2 x_2(t_0) - a_1 x_1(t_0) + r(t_0) = 0 \quad (8)$$

또한, 계통(6)의 상태가 제안된 슬라이딩 평면(7) 위에 존재할 때, 실제 계통인 PMSM의 상태는 공칭제어입력인 $r(t)$ 에 의해서 제어되는 공칭제어계통(1)과 같은 동특성을 갖는다. 즉, 새로운 슬라이딩 평면 $s(x, x)$ 는 공칭제어계통과 같은 동특성을 갖게 되는 것이고, 이는 이미 증명되어있다.[4]

계통(6)의 상태들을 슬라이딩 평면 상에 머물도록 하기 위해서 다음 조건을 만족하는 SMC입력을 구해야 한다.

$$s(X, x_v) \dot{s}(X, x_v) < 0 \quad (9)$$

$\dot{s}(X, x_v)$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(X, x_v) &= \dot{x}_v(t) + a_3 \dot{x}_3(t) + a_2 \dot{x}_2(t) + a_1 \dot{x}_1(t) - \dot{r}(t) \\ &= -a_3 x_v(t) - (a_3)^2 x_3(t) - a_2 a_3 x_2(t) - a_1 a_3 x_1(t) \\ &\quad + u(t) + d(t) \end{aligned} \quad (10)$$

외란 $d(t)$ 의 범위를 $d(t) \leq d_{\max}$ 로 가정할 수 있다면, 슬라이딩 모드를 보장하는 SMC 입력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} u(t) &= a_3 x_v(t) + (a_3)^2 x_3(t) + a_2 a_3 x_2(t) + a_1 a_3 x_1(t) \\ &\quad - d_{\max} \text{sgn}(s) \end{aligned} \quad (11)$$