

PMSM 속도 제어를 위한 외란 관측기 기반의 적응형 슬라이딩 모드 제어기

임재윤*, 최서영*, 김원희*
 중앙대학교*

Disturbance Observer based Adaptive Sliding Mode Control for Velocity Control of PMSM System

Jaeyun Yim*, Seoyoung Choi*, Wonhee Kim*
 Chung-Ang University*

Abstract - 본 논문에서는 sliding mode controller (SMC)의 채터링 현상을 효과적으로 줄이기 위한 새로운 적응형 SMC를 제안한다. 기존 외란 관측기로 외란을 보상한 뒤 SMC 게인 값을 줄여 채터링 크기를 크게 줄일 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 제안한 적응형 SMC의 성능 검증을 위해 기존 SMC와 외란 관측기의 결합과 기존의 적응형 SMC와 비교 분석을 MATLAB/Simulink를 통해 시뮬레이션 환경에서 수행하였다.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}T_e - \frac{1}{J}T_L - \frac{B}{J}\omega_m \quad (4)$$

여기서 J 는 회전자의 관성 모멘트; B 는 점성 마찰 계수; T_L 은 부하 토크이다. 일반적으로 많이 사용되는 표면 부착형 PMSM은 L_d 와 L_q 가 같다고 가정하고 모델링을 하며 본 논문에서도 표면 부착형 PMSM 모델링을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다 [4].

1. 서 론

SMC의 채터링 현상은 SMC를 사용했을 때 흔하게 발생하는 문제이다. 이 채터링 현상은 시스템 손상 및 소음을 유발하기 때문에 유해한 현상이라고 말할 수 있다. 이러한 채터링을 해결하기 위해 외란관측기 [4], 적응형 SMC [5], 고차항 SMC [6] 같은 방법들이 연구 되어왔다. 그러나 외란관측기의 경우 외란을 보상하여 작은 SMC 게인을 사용할 수 있지만, SMC의 스위칭 함수로 인해 외란 추정 성능이 저하 될 수 있다. 이는 제어 성능 악화로 이어지게된다. 그리고 적응형 SMC의 SMC 게인을 가능한 작게 가져갈 수 있지만, 잘 알려진 단점인 peaking 현상이 발생되게 된다.

본 논문에서는 위에 제시한 두 알고리즘의 문제점을 해결하기 위해서 외란관측기와 적응형 SMC를 결합한 새로운 형태인 적응형 SMC를 개발하였다. 개발된 적응형 SMC는 기존 적응형 SMC와 다르게 외란관측기를 이용하여 일단 외란을 보상하게 된다. 그러므로 기존 적응형 SMC에 비해 작은 제어 게인을 사용하게 된다. 또한 스위칭 함수로 인한 외란 추정 성능 저하 현상을 해결하기 위해서 제안한 적응형 SMC는 제어 게인값을 외란 에러 만큼 낮출 수 있도록 설계하였다. 제안한 적응형 SMC의 성능 검증을 위해 기존 SMC와 외란 관측기의 결합과 기존의 적응형 SMC와 비교 분석을 MATLAB/Simulink를 통해 시뮬레이션 환경에서 수행하였다.

2. 본 론

2.1 Permanent magnet synchronous motor modeling

PMSM에 속도 제어를 설계하기 위해선 PMSM의 모델링이 필요하다. PMSM의 3상 모델링을 d-q축 상에서의 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_m i_q + \frac{v_d}{L_d} \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}p\omega_m i_d - \frac{1}{L_q}p\lambda\omega_m + \frac{v_q}{L_q} \quad (2)$$

$$T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (3)$$

여기서 v_d, v_q 는 d, q축 전압; i_d, i_q 는 d, q축 전류; L_d, L_q 는 d, q축 인덕턴스; R 은 고정자 권선 저항; ω_m 은 회전자 각속도; λ 는 영구자석의 쇄교자속; p 는 극수; T_e 는 전기적인 토크이다.

또한, PMSM의 기계적인 모델링은 다음과 같다.

2.2 Proposed adaptive sliding mode controller

기존 SMC에 비해 채터링을 확실하게 줄이기 위해 향상된 적응형 SMC를 개발하였다. 제안된 적응형 SMC는 PMSM의 속도 제어 성능을 향상시키기 위해 사용되었다. 외란관측기 기반으로 설계하였기 때문에 외란에도 작은 채터링을 갖는 것이 가능하다.

일반적으로 SMC를 설계하기 위해서 두 가지 단계로 나눌 수 있다. 첫 번째는 제어 목적을 위한 슬라이딩 평면을 선택하는 것이다. 두 번째는 다음 조건을 만족하기 위한 제어 입력 설계하는 것이다.

$$s \cdot \dot{s} < 0 \quad (5)$$

여기서 s 는 슬라이딩 평면이다. PMSM 속도 제어를 위해 슬라이딩 평면과 이것의 미분수식은 다음과 같이 주어진다.

$$s = \omega_m^d - \omega_m \quad (6)$$

$$\dot{s} = \dot{\omega}_m^d - \frac{1}{J}(1.5p\lambda i_q - B\omega_m - T_L) \quad (7)$$

여기서 ω_m^d 은 회전자 각속도의 목표값이다. 그리고 제어 입력 i_q^* 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_q^* = \frac{J}{1.5p\lambda} \left(\dot{\omega}_m^d + \frac{1}{J}\hat{T}_L + \frac{B}{J}\omega_m + k\text{sign}(s) \right) \quad (8)$$

여기서 \hat{T}_L 은 추정된 부하 토크이며, k 는 적응형 SMC 게인이다. 그리고 이 게인은 다음과 같이 정의된다.

$$k_3 = \begin{cases} \lambda_1 |s|, & \text{if } s > \epsilon \\ \lambda_2 |s| \cdot \text{sign} \left(p \left| \frac{\hat{T}_L}{J} \right| - k_3 \right), & \text{if } s \leq \epsilon \end{cases} \quad (9)$$

여기서 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0, p > 1$, 그리고 $\epsilon > 0$ 이다. 파라미터 $\epsilon > 0$ 은 슬라이딩 평면의 발산 방지를 위해서 양수로 설계 되었다. λ_1 그리고 λ_2 는 적응형 게인으로서 원하는 제어 성능을 위해 적절하게 튜닝 되어야한다. p 는 식 (9)에서의 $|\hat{T}_L/J|$ 안정화를 위한 게인 파라미터이다.

식 (9)에서의 부하 토크 에러 \hat{T}_L 는 DOB0에 의해서 계산 된다 [5]. PMSM 부하 토크를 추정하기 위한 DOB0 수식은 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{T}_L = I(-J\omega_m - z) \quad (10)$$

$$\dot{z} = -1.5p\lambda i_q + B\omega_m + \hat{T}_L \quad (11)$$

여기서 I 는 외란관측기 게인이다. \hat{T}_L 를 설계하기 위해 \hat{T}_L 의 미분은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\hat{T}}_L = I(T_L - \hat{T}_L) \quad (12)$$

부하 토크 에러는 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{T}_L = T_L - \hat{T}_L \quad (13)$$

그러면 \tilde{T}_L 는 식 (12)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\tilde{T}_L = \frac{\hat{T}_L}{J} \quad (14)$$

추정된 부하 토크로 인해 실제 부하 토크가 보상되었지만 실제로 \tilde{T}_L 가 실제 PMSM 시스템에는 남아 있게된다. 그러므로 식 (9)의 적응형 SMC 게인값을 $p|\tilde{T}_L/J|$ 까지 줄이게 되면 아주 작은 채터링을 얻을 수 있다.

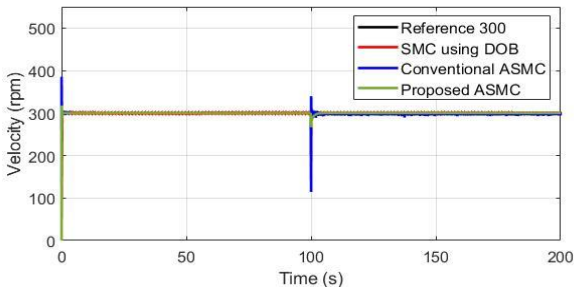
2.3 Simulation results

PMSM의 속도 제어를 하기 위해서 제안한 적응형 SMC를 설계하였다. 또한, 제안된 적응형 SMC와 비교를 위해 기존 SMC와 외란 관측기 설계와 기존 적응형 SMC를 설계하여 비교분석을 수행 하였다 [4],[5]. <표 1>은 PMSM의 기본 파라미터들과 적응형 SMC의 파라미터 게인들을 나타내었다. 시뮬레이션은 목표 속도 300RPM과 10N의 부하 토크를 Step형태로 100초에 인가하여 MATLAB/Simulink를 통해 수행하였다.

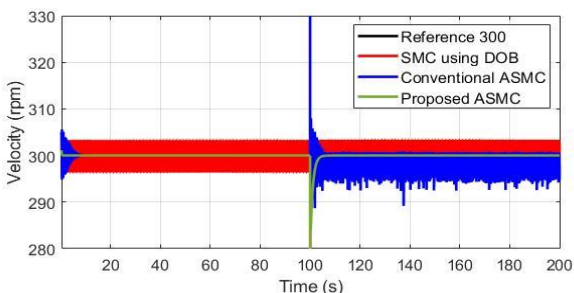
<표 1> PMSM 파라미터, 적응형 SMC 파라미터

PMSM		적응형 SMC	
Parameters	Values	Parameters	Values
L_d, L_q (d, q축 인덕턴스)	0.4mH	ω_m^d (각속도의 목표값)	300rpm
R (고정자 권선 저항)	0.2Ω	Γ (외란 관측기 게인)	1000
J (회전자 관성 모멘트)	0.000467kg · m ²	λ_1 (적응형 SMC 게인)	1500
B (점성 마찰 계수)	0.00374Nm · s/rad	λ_2 (적응형 SMC 게인)	2000
λ (영구자석의 쇄교자속)	0.017Wb		
p (극수)	4		

그림 1과 그림 2는 PMSM 속도 제어 결과를 보여준다. 제안한 적응형 SMC는 기존 기법들에 비해 채터링이 작은 것을 확인할 수 있다. 기존 적응형 SMC의 단점인 peaking 현상이 부하 토크가 인가된 뒤 보여진다. 그러나 제안한 적응형 SMC는 이러한 peaking 현상이 없는 것을 확인할 수 있다.



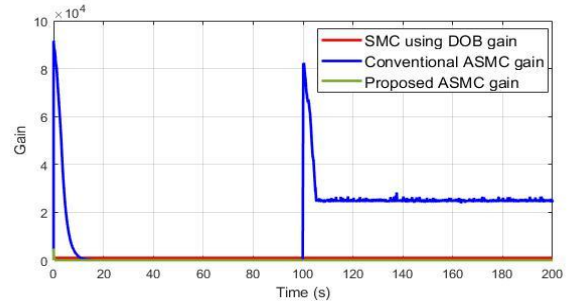
<그림 1> PMSM 속도 제어 결과, 스텝 부하 토크 100초 인가



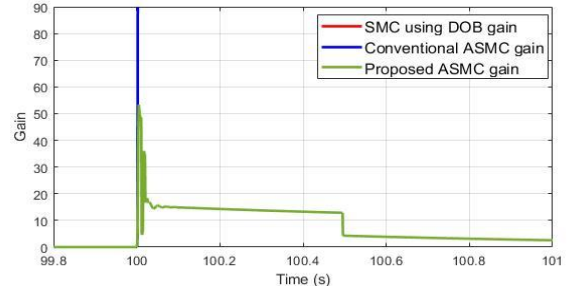
<그림 2> PMSM 속도 제어 결과, 스텝 부하 토크 100초 인가, 확대된 그래프 : velocity = 280 ~ 330 rpm

그림 3과 그림 4는 각각의 방법들의 제어 게인을 나타내었다.

부하 토크가 인가되기 전에는 기존 적응형 SMC 게인과 제안한 적응형 SMC 게인이 비슷한 것을 확인할 수 있다. 그러나 부하 토크가 인가된 뒤 기존 적응형 SMC는 부하 토크를 보상하기 위해 게인값이 커지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 제안한 적응형 SMC 게인은 부하 토크를 보상한 뒤 남은 부하 토크 에러만큼 게인값이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.



<그림 3> SMC 게인 값 결과



<그림 4> SMC 게인 값 결과, 확대된 그래프 : time = 99.8 ~ 101 s, gain = 0 ~ 90

3. 결 론

본 논문에서는 SMC 채터링 현상을 효과적으로 줄이기 위한 적응형 SMC 기법을 제안하였다. 제안한 방법은 시뮬레이션 환경에서 기존 기법들과 비교 분석이 수행되었다. 시뮬레이션 결과 제안한 적응형 SMC 기법은 기존 기법들에 비해 낮은 제어 게인을 사용하는 것을 확인하였다. 시뮬레이션은 PMSM 속도 제어로 검증이 되었고, 추후 실제 실험을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 검증할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. Linares, C. Garcia, H. Sira, and O. D. Ramirez, "Robust backstepping tracking controller for low-speed PMSM positioning System: Design, analysis, and implementation," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 11, no. 5, pp. 1130 - 1141, Oct. 2015.
- [2] X. Zhang, L. Sun, K. Zhao, and L. Sun, "Nonlinear speed control for PMSM system using sliding-mode control and disturbance compensation techniques," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 3, pp. 1358 - 1365, Mar. 2013.
- [3] W. Kim, D. Shin, and C. C. Chung, "Lyapunov-based controller with a passive nonlinear observer to improve position tracking performance of microstepping in permanent magnet stepper motors," *Automatica*, to be published.
- [4] F. Plestan, Y. Shtessel, V. Bregeault, and A. Poznyak, "New methodologies for adaptive sliding mode control," *Int. J. Control*, vol. 83, no. 9, pp. 1907-1919, Sep. 2010.
- [5] K. S. Kim, K. H. Rew, and S. Kim, "Disturbance observer for estimating higher order disturbances in time series expansion," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 55, no. 8, pp. 1905 - 1911, Aug. 2010.
- [6] Y. Chiu, K. Leung, and H. Chung, "High-order switching surface in boundary control of inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 5, pp. 1753-1765, Sep. 2007.