

비선형 슬라이딩 면을 가진 가변구조제어기를 이용한 브리쉬없는 직류 전동기의 위치 제어

김 일송*, 이 정훈, 홍 찬호, 이 주강, 윤 명중
한국과학기술원 전기및 전자공학과

Position Control of BLDC Motor with Integral-Augmented Nonlinear Sliding Surface

IL song Kim^o, Jung Hoon Lee, Chan Ho Hong, Ju Jang Lee, and Myung Joong Youn
Department of Electrical Engineering
Korea Advanced Institute of Science & Technology

Abstract

This paper presents a integral-augmented nonlinear sliding surface without a reaching phase. The conventional linear sliding surface has reaching phase, and sliding mode can't realized during this phase, the trajectories may be sensitive to the load disturbances. An proposed algorithm does not have reaching phase, so robust to the load disturbances.

1. 서론

1950년대 말부터 소련에서 연구되어온 가변구조제어는 시스템의 구조를 알고 또한 내부 파라미터와 외란의 변화의 최대와 최소 값을 알고 있는 시스템에 적용가능한 제어 방법이다. 이러한 제어방법을 이용하면 대상 시스템의 동특성은 설계자에 의해 설정된 스위칭면(sliding surface)으로 결정된다. 대상시스템의 상태가 추종하기를 바라는 상태제어를 시스템의 전상태(full state)를 포함하는 함수로 나타내고 이를 슬라이딩 면(sliding surface)이라 한다. 시스템 상태의 변화에 따라 달라지는 이 함수의 값에 따라 제어 입력을 불연속적으로 시스템에 인가하여, 시스템의 상태가 슬라이딩 면을 추종할때 시스템 파라미터의 변화나 외란에 강인한 특성을 갖게되며 결과적으로 시스템의 과도 상태까지 제어가 가능한 특성을 갖는다. 이와같이 외란등에 강인한 제어를 위해 시스템의 스위칭은 무한대로 가정하고 있다. 시스템의 상태변수는 슬라이딩 면위에 있게되며 이러한 상태를 슬라이딩 모드(sliding mode)라 한다.

가변구조제어는 불연속적인 입력에 의해 특징지어지는 비선형 시스템의 특별한 경우가 되는데, 제어 입력에 의해 슬라이딩 면의 조건($s(x)=0$)에 의해 구조를 가변시키는 것이다. 결과적으로 시스템의 파라미터 변화와 외부 외란에 강인성이 미리 설정된 슬라이딩 면에 의해 얻어지는 것이다. 그러나 기존의 선형 슬라이딩면을 갖는 가변구조제어기는 외란에 대한 강인성, 예측가능한 출력 특성, 오버슈트가 없다는 점등의 장점을 갖는 반면, 채터링 문제와 리칭 페이즈(reaching phase)문제를 가지고 있다. 채터링 문제는 연속 제어 입력에 의해 거의 감소될 수 있다. 리칭 페이즈란 초기 상태값에서 슬라이딩면에 다다를 때까지의 구간을 의미하는데, 이 구간에서는 슬라이딩 모드가 구현되지 않기 때문에 파라미터 변화와 외부외란에 대해 민감하게 된다. 또한 슬라이딩 모드에 들어가는 순간을 알 수 없기 때문에 출력의 특성을 예측하기가 어렵게 된다. 이 논문에서는 적분항이 첨가된 비선형 슬라이딩 면을 가지는 가변구조제어기에 대해서 다루는데, 이렇게 하면 리칭 페이즈가 없어지고 과도 상태의 특성을 개선시킬 수 있다. 제시된 알고리즘을 BLDC 모터에 대해 적용하여 위치제어를 행하고 기존의 선형 슬라이딩면을 가지는 가변구조제어기와 비교 시뮬레이션을 행하였다.

2. 적분항이 첨가된 비선형 슬라이딩면을 갖는 가변구조제어기의 설계

2.1 위치 제어를 위한 BLDC 모터 모델링

영구자석형 동기전동기(PMSM)는 속도-토크 특성이 타여자식 직류 전동기와 비슷하고 이때문에 직류전동기와 같은 선형화 모델이 가능하다. 이때 전기적 시상수가 기계적 시상수 보다 훨씬 작아 전기적 응답이 기계적 응답보다 훨씬 빨리 나타난다면 전기적 동특성을 무시하여 다음과 같이 DC전동기로 등가화시킬 수 있다.

$$\dot{\theta} = \omega$$

$$\dot{\omega} = -a \cdot \omega + b \cdot u - F \quad \text{--- (1)}$$

위치 명령, r 에 대한 오차와 그의 미분을 다음과같이 정의하면

$$X_1 = \theta - r$$

$$\dot{X}_1 = \dot{\theta} - \dot{r} = \omega - \dot{r}$$

BLDC모터의 오차 상태 방정식은 다음과 같이 주어지게 된다.

$$\dot{X}_1 = X_2$$

$$\dot{X}_2 = -a \cdot X_2 + b \cdot u - F \quad \text{--- (2)}$$

여기서,

$$a = \frac{B}{J}, \quad b = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \frac{\lambda_m}{J}, \quad u = i_m,$$

$$F = F_{\max} \cos \omega t,$$

2.2 적분항이 첨가된 비선형 슬라이딩 면의 설계

기존의 슬라이딩면은 전상태(full state)의 선형 조합으로 주어지게 된다.

$$S(t) = c_1 X_1 + X_2 \quad \text{--- (3)}$$

이 경우 초기값에 의한 리칭 페이즈가 존재하게 되고 이 구간에서는 외란의 영향을 직접 받게 되어 원하는 출력 특성을 얻지 못하게 된다. (conventional- I)
그래서 리칭 페이즈를 없애기 위해 적분항을 첨가한 선형 가변구조제어기는 다음과 같이 주어진다. (conventional - II)

$$S(t) = C_0 Z_1 + C_1 X_1 + X_2$$

$$Z_1 = \int X_1, \quad Z_1(0) = 0 \quad \text{--- (4)}$$

이 경우 적분항때문에 출력응답의 속도가 늦어진다든 단점이 있게 되어 개선된 비선형 슬라이딩 면을 다음과 같이 설정하면 (proposed)

$$S = C_0 Z_1 + C_1 (X_1 - X_1^0) + (X_2 - X_2^0) + C_2 Z_2$$

$$Z_1 = \int X_1, \quad Z_2 = \int X_1^3$$

$$Z_1(0) = 0, \quad Z_2(0) = 0. \quad \text{--- (5)}$$

슬라이딩면은 초기 상태를 포함하는 초평면(hyperplane)으로 주어지고 초기 상태에서 부터 슬라이딩면이 시작되어 가변구조제어기의 특징을 가지게 되어 파라미터 변화와 외부 외란에 대한

여 강인한 특징을 가지게 된다. 슬라이딩 면의 계수들 C_0, C_1, C_2 은 Pole Assignment 방법에 의해서 정하게 된다.

2.3 제어 입력의 설계

제어 입력 u 는 다음과 같이 상태 피드백을 갖는 선형 제어입력 부분과 외란동을 상쇄 시키기 위한 비선형 제어 입력으로 이루어진다.

$$u = \psi_1 X_1 + \psi_2 X_2 + \psi_3 Z_1 + \psi_4 X_1^3 + K_f \operatorname{sgn}(S) \quad \text{--- (6)}$$

슬라이딩 모드 존재조건(sliding mode existence condition)을 만족시키기 위해

$$\begin{aligned} S &= C_0 Z_1 + C_1 X_1 + X_2 + C_2 X_1^3 \\ &= (C_0 + b\psi_1) X_1 + (C_1 - a + b\psi_2) X_2 + b\psi_3 X_3 \\ &\quad + (C_2 + b\psi_4) X_1^3 + b K_f \operatorname{sgn}(S) - F \quad \text{--- (7)} \end{aligned}$$

슬라이딩 모드 존재조건(sliding mode existence condition)을 만족시키기 위해서는

$$S \dot{S} < 0$$

이 되어야 하고, 각 스위칭 이득 조건을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \begin{cases} < -C_0/b & \text{for } SX_1 > 0 \\ > -C_0/b & \text{for } SX_1 < 0 \end{cases} \\ \psi_2 &= \begin{cases} < (a - C_1)/b & \text{for } SX_2 > 0 \\ > (a - C_1)/b & \text{for } SX_2 < 0 \end{cases} \\ \psi_3 &= \begin{cases} < 0 & \text{for } SZ_1 > 0 \\ > 0 & \text{for } SZ_1 < 0 \end{cases} \\ \psi_4 &= \begin{cases} < -C_2/b & \text{for } SX_1^3 > 0 \\ > -C_2/b & \text{for } SX_1^3 < 0 \end{cases} \\ K_f &= \begin{cases} < f_{\min}/b & \text{for } S > 0 \\ > -f_{\max}/b & \text{for } S < 0 \end{cases} \quad \text{--- (8)} \end{aligned}$$

제한된 슬라이딩 면에 이 제어입력을 인가하면, 플랜트는 $t \geq 0$ 인 순간부터 슬라이딩 모드에 들어가게 되어, 시스템의 파라미터 변화와 외부외란에 강인한 가변구조 제어가 이루어지게 된다.

3. 시뮬레이션

제한된 알고리즘의 강인성을 보여주기 위하여, 시뮬레이션을 통하여 외란을 가한 경우와 가하지 않는 경우에 대하여 기존의 가변구조제어기와 비교한다. 외부 외란은 정격부하(full load)의 80%를 cosine의 함수로 가하였다. 샘플링 시간은 0.1[msec]로 하였다. 슬라이딩 면의 설계에서 선정된 계수들의 값은 표 1에 정리하였다. 그림 1 은 슬라이딩 면의 식이 $S = C_1 X_1 + X_2$ 으로 주어지는 가변구조제어기의 응답 특성이고(Conventional-I), 그림 2는, 적분항이 첨가된 선형 가변구조제어기의 응답 특성이다(Conventional-II). 그리고 그림 3 은 슬라이딩면의 식이 $S = C_0 Z_1 + C_1 (X_1 - X_1^0) + (X_2 - X_2^0) + C_2 Z_2$ 으로 주어지는 비선형 가변구조제어기의 응답 특성이다 (Proposed). 그리고 시스템의 초기값은 $X^0 = [4, 1]^T$ 으로 주어진다. 전동기의 파라미터 값들은 $a=19.75$, $b=587.8$ 이다. 슬라이딩 면의 스위칭 이득 값들은 표 2 에 주어진다.

	C0	C1	C2
Conventional-I	0	6	0
Conventional-II	64	16	0
Proposed	64	16	2

표1. 설계된 슬라이딩 면의 계수

ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	K_f
-0.609	-0.494	-0.5	-0.101	-2.201
0.391	0.506	0.5	0.0987	2.201

표2. 선정된 스위칭 이득

시뮬레이션 그림에서 제안된 알고리즘이 기존의 가변구조 제어기와 비교하여 외란의 존재유무에 관계없이 robust 하다는 것을 알 수 있다. Conventional-I 은 리칭 페이즈가 존재하여 외란의 존재시 출력 특성이 달라짐을 알 수 있다. Conventional-II 와 제안된 알고리즘은 출력 특성에서는 거의 비슷하게 나타나지만 제안된 알고리즘이 비선형 슬라이딩 면을 갖기 때문에 선형 슬라이딩 면을 가지는 가변구조제어기에서는 볼 수 없던 특성을 나타내고 있다. 두 번째 그림은 외란이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 대하여 슬라이딩 면을 나타내고 있다. 여기서도 역시 제안된 알고리즘이 기존의 제어기에 비해 robust 함을 알 수 있다.

4. 결론

BLDC 모터의 강인한 위치제어를 위해서 적분항이 첨가된 비선형 슬라이딩 면을 가진 가변구조 제어기가 제시되었다. 종래의 제어기가 리칭 페이즈 문제를 가지고 있는데 반해 제안된 제어기는 새로운 슬라이딩 면을 사용하여 $t \geq 0$ 인 순간부터 파라미터 변화와 외부 외란에 대하여 강인한 특징을 보여주게 된다. 또한 선형 슬라이딩 면을 가진 가변구조제어기에서 볼 수 없었던 동특성(dynamics)을 가지게 된다. 제안된 제어기는 1) 리칭 페이즈를 갖지 않고 2) 전구간(entire trajectories)을 통하여 파라미터 변화와 외부외란에 대해 강인한 특징을 가지면서 3) 예측 가능한 출력 특성과 4) 선형 가변구조제어기에서 볼 수 없었던 개선된 과도상태의 동특성(dynamics)을 가지게 된다.

REFERENCE

- [1] T.L. Chern and Y.C. Wu "Design of brushless DC position servo systems using integral variable structure approach" *IEE Proc. D*, Vol 140, No. 1 January, 1993
- [2] FUMIO HARASHIMA, and et al., "MOSFET Converter-Fed Position Servo System with Sliding Mode Control" *IEEE Trans. I. E.* VOL. IE-32 NO. 3 AUGUST 1985
- [3] J.H. Lee and et al. "Position Control of DC MOTOR using Variable Structure Systems with a Novel Sliding Surface" *Proceedings of ISPE '92 seoul*
- [4] V.I. Utkin *Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems*, Moscow Soviet Union: MIR Publishing 1978
- [5] U. Itkis *Control Systems of Variable Structure*, John Wiley & Sons, New York, 1976
- [6] D.S. Lee and et al. "Controller Design of Multivariable Variable Structure Systems with Nonlinear Switching Surfaces," *IEE Proceeding-D*, VOL.138, PP 493-499, NO.5 1991
- [7] 이정훈 "새로운 슬라이딩 라인을 갖는 가변구조 제어 방식에 의한 직류 모터의 위치 제어에 관한 연구", 한국과학기술원, 1990

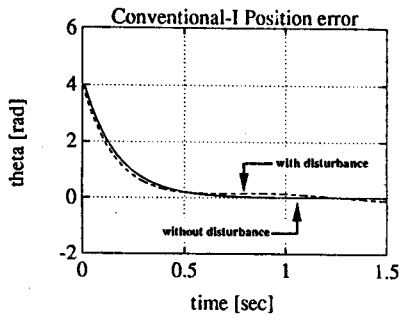


그림 1

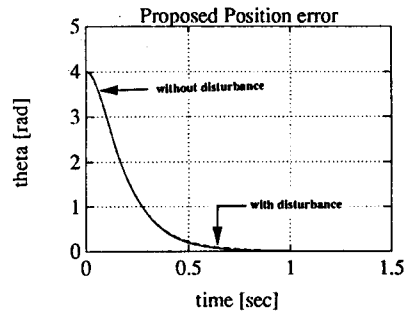


그림 3

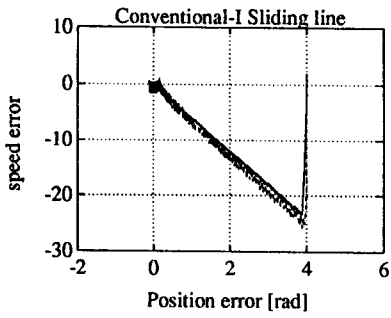


그림 2

