

Inertial Coordinate-Operator Feedback을 이용한 가변구조제어

유 원식, 허 영재**, 김 영석*

* 인하대학교 전기공학과 ** 대우중공업

Variable Structure Control using Inertial Coordinate-Operator Feedback

Wan-sik You, Young-jae Hur**, Young-seok Kim*

* Dept. of Electrical Eng., Inha Univ. ** Daewoo Heavy Industries Ltd.

Abstract

A VSC with Inertial COFB(Coordinate-Operator Feedback) is presented for chattering alleviation. Although the conventional sliding mode controller has good properties of robustness for disturbances or parameter variations, fast response, and easy implementation, there exists an inevitable chattering problem which deteriorates the control performance of system. VSC using Inertial COFB has properties of bounded feedback gain, reduced chattering, and robustness for disturbances or parameter variations. The validity of the proposed method is demonstrated through computer simulation for a position control of BLDCM.

1. 서론

서보모터의 위치제어나 로봇틱스 분야와 같은 파라미터 변동에 둔감한 동적특성이 요구되어지는 시변시스템의 제어에 있어서는 가변구조제어(VSC)가 널리 사용되고 있다.^{[1][2][3]} VSC는 슬라이딩면(Sliding Surface)을 중심으로 의도적으로 시스템의 구조를 전환하여 목표치로 수속하게 되도록 슬라이딩모드에서는 시스템의 파라미터나 외란에 대하여 거의 영향을 받지 않는다는 장점을 가지고 있다. 그러나 슬라이딩모드 제어기법은 제어시스템의 스위칭속도와 속도검출기의 한계, 제어지연 등으로 인하여 제어신호에 고주파의 채터링이 발생하고 시스템의 제어성능을 저하시킨다.

본 논문에서는 Inertial Coordinate-Operator Feedback (COFB)을 갖는 Binary 제어기를 이용하여 파라미터나 외란에 강인하며 연속적인 제어입력을 발생시킴으로써 고주파 채터링을 저감시키는 특징을 가진 제어기를 설계하고 브러시리스 직류전동기의 위치제어에 적용한다. 또, 시뮬레이션을 통하여 기존의 슬라이딩모드 제어 및 Integral COFB를 갖는 Binary 제어기와 제안하는 Inertial COFB를 갖는 Binary 제어기를 비교함으로써 타당성을 보인다.

2. Inertial COFB를 갖는 Binary 제어

이상적인 슬라이딩모드 제어기는 슬라이딩면을 기준으로 무한대의 스위칭이 이루어져야 한다. 그러나 실제로는 제어시스템의 스위칭속도와 속도검출기의 한계, 제어지연 등

으로 인하여 스위칭이 유한하게 되므로 제어입력이 불연속적이게 되고, 따라서 채터링 현상이 발생한다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 슬라이딩모드 제어의 문제점을 개선하기 위해 Inertial COFB를 갖는 Binary 제어기를 도입한다.

Inertial COFB를 갖는 Binary 제어기의 개략적인 구조를 그림 1에 나타내었다.

그림에서와 같이 이 제어기는 두개의 조정기, 즉 주루프 조정기와 외부루프 조정기로 구성되어 있다. 주루프 조정기는 플랜트의 출력이 목표치에 수렴하도록 하게 하고, 외부루프 조정기는 임의적으로 플랜트의 파라미터가 변동한다고 하더라도 제어되는 시스템이 원하는 특성을 달성하도록 주루프 조정기를 더욱 좋게 변형시키는 데 사용된다.

다음과 같은 스칼라 입력을 갖는 선형시변 시스템을 고려한다.

$$\dot{y} = A(t)y + b(t)u \tag{1}$$

여기서, $y \in R^n$, $u \in R^m$ 이다.

시스템 파라미터들은 미지이지만 변동범위를 알고있는 시변함수들이다. 즉,

$$\begin{aligned} a_{ij}(t) &\in [a_{ijmin}, a_{ijmax}] \quad \forall i, j \\ b_i(t) &\in [b_{imin}, b_{imax}] \quad \forall i \end{aligned} \tag{2}$$

Binary 제어의 목적은 지령치 $y_r(t)$ 를 추종하는 시스템 상태 $y(t)$ 에 대해 오차 $x(t) (= y_r(t) - y(t))$ 가 영으로 가도록 하기 위한 제어입력 $u(t)$ 를 연속함수가 되도록 하는 것이다. 식 (1)의 방정식을 오차방정식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$\dot{x} = A(t)x + D(t)z + b'(t)u \tag{3}$$

여기서,

$$\begin{aligned} D(t) &= [-A(t), I] \\ z &= [y_r^T, \dot{y}_r^T]^T \\ b'(t) &= -b(t) \end{aligned}$$

이다. 오차방정식에 의한 초평면(hyperplane)을 식 (4)로 정의한다.

$$\sigma = -C^T x, \quad C = [1 \ c] \tag{4}$$

위의 초평면은 슬라이딩 초평면과 유사하지만, 슬라이딩

모드와는 달리 $\sigma = 0$ 뿐만 아니라 그림 2에 보여지는 것과 같이 $G_s = [x \in R^n; \sigma \leq \delta \|x\|]$ 로 정의되는 적절한 범위에서 슬라이딩모드가 일어난다. 이 영역 G_s 를 오차 x 에 대한 hypercone이라 한다.

그림 1에서와 같이 주루프 조정기 R_u 와 R_v 의 이득을 조정하는 외부루프 조정기 R_v 로 구성되는 형태의 Binary 제어를 Coordinate Operator Feedback(COFB)^{[4][5]}라 하고, 특히, 식 (5)와 식 (6)의 제어알고리즘을 갖는 제어를 Inertial COFB를 갖는 Binary 제어기라고 한다.

$$R_u : u = \mu(k^T|x| + h^T|z|) \quad (5)$$

$$R_v : \dot{\mu} = -\alpha(\mu + \text{sgn}(\sigma)), \quad t \geq t_0 \quad (6)$$

여기서 k, h 는 벡터이고, α, γ 는 스칼라이며 k, h, α 의 적절한 선택에 의해 오차방정식 식 (3)이 원점으로 수렴하도록 한다.

한편, Integral COFB를 갖는 Binary 제어는 식 (7)과 식 (8)로 표현되어질 수 있는데, 이 제어법에 비하여 Inertial COFB를 갖는 Binary 제어는 더 간단한 제어 알고리즘을 가지므로 구현이 용이하고, 여러개의 이득을 결정해야 하는 번거로움을 피할 수 있는 장점을 가지고 있다.

$$R_u : u = \mu(k^T|x| + h^T|z|) \quad (7)$$

$$R_v : \dot{\mu} = \begin{cases} -(\alpha + \beta^T z)\text{sgn}(\sigma) & \text{if } |\mu| \leq 1 \\ -\gamma\mu & \text{if } |\mu| > 1 \end{cases} \quad (8)$$

3. 모의실험 및 결과

3.1 시스템의 구성

그림 3에 BLDCM의 위치제어를 위한 시스템의 전체블럭도를 나타낸다. Binary 제어를 위치제어기로 하고 슬라이딩모드 제어를 전류제어기로 하여 구성한다. 전류제어기로써 슬라이딩모드 제어를 사용하면 출력전류의 2상-3상 변환과 PWM을 위한 별도의 하드웨어가 필요없이 직접 인버터로 Mapping이 가능하므로 시스템을 간소화 할 수 있다는 장점을 갖게 된다.^[6]

3.2 실험결과 및 고찰

모의실험은 비교를 위하여 기존의 슬라이딩모드 제어를 이용한 위치제어와 Integral COFB를 갖는 Binary 제어를 이용한 위치제어 그리고 제안하는 Inertial COFB를 갖는 Binary 제어를 이용한 위치제어에 대해 행하였다.

또 모의실험은 실제의 실험과 유사하도록 하기 위해 연산에 의한 제어지연 등을 고려 하였고, 강인성을 확인하기 위해 그림 4와 같이 파라미터 J 와 부하토크 T_L 의 변동을 인가하였다.

모의실험에 사용된 제반 파라미터들과 이득들을 표 1에 나타낸다.

그림 5는 연속함수를 갖는 기존의 슬라이딩모드 제어기^[6]를 사용한 경우의 위치오차와 속도 파형이고, 그림 6은 같은 경우의 전류 파형이다. 슬라이딩모드 제어기의 경우는 부하토크 T_L 의 변동에는 영향을 받지않으나 파라미

터 J 가 작을 때는 채터링이 심하게 발생하고 있음을 볼 수 있다. 그림 7과 그림 8은 각각 Integral COFB를 갖는 Binary 제어기^[5]를 사용했을 때의 위치오차 및 속도 파형과 전류 파형이다. 이 경우는 파라미터 J 의 변동에는 영향을 받지 않으나 부하토크 T_L 의 변동에 약간의 진동이 보이고 있다. 그러나 전류지령치는 원점에 도달하는 시점에서 약간의 채터링이 발생할 뿐 슬라이딩모드 제어기와 같은 심한 채터링은 보이고 있지 않다. 그림 7과 그림 8은 각각 Inertial COFB를 갖는 Binary 제어를 사용했을 때의 위치오차 및 속도 파형과 전류 파형이다. 이 경우는 슬라이딩모드 제어기에 비해 채터링이 현저히 감소하였고 목표 위치의 정정속도 또한 빨라졌음을 볼 수 있다. 그리고 Integral COFB의 경우와 비교하여도 채터링이 저감되었고 제어입력이 더 연속적임을 확인할 수 있다.

이상의 내용으로 부터 제안하는 Inertial COFB를 갖는 Binary 제어기는 파라미터 및 외란의 변동에 대해 강인함을 알 수 있고 채터링의 저감이 가능함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 연속적인 제어입력의 생성이 가능한 Inertial COFB를 갖는 Binary 제어를 이용하여 브러시리스 직류전동기의 위치제어를 행하였다.

실험에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 슬라이딩모드 제어에 비하여 제어입력이 매우 개선되어졌고, 따라서 제어입력의 불연속성에 의한 채터링을 저감시킬 수 있었다.
- (2) 슬라이딩모드 제어기에 비하여 정정속도가 빠르다.
- (3) 외란과 파라미터 변동에 대해 견실한 특성을 갖는다.
- (4) Integral COFB를 갖는 Binary 제어에 비하여 더 간단한 제어알고리즘을 가지면서도 제어입력의 연속성을 향상시킬 수 있고, 채터링도 저감되었다.

참고문헌

- [1] V.I.Utkin : "Variable Structure System with Sliding Modes " IEEE Trans. on AC ,vol . AC-22, pp 212-223 , 1977.
- [2] V.I.Utkin : "Sliding Mode Control Design principles and Applications to Electric Drives" IEEE Trans. on Ind. Elec. ,vol.40, No.1, Feb., pp23-36, 1993.
- [3] J.P. Karunadasa 외 1인 : "Design and Implementation of Microprocessor based Sliding Mode Controller for Brushless Servomotor" IEE Proc-B, Vol.138, No.6, Nov., pp212-223, 1991.
- [4] C. Rossi, A. Tonielli, R. Zanasi : " Variable Structure Control of a Brushless Motor " EPE FIRENZE. 1991.
- [5] 허 영재 외 2인 : "브러시리스 직류전동기 구동을 위한 새로운 가변구조제어" 전력전자연구회 춘계 학술 논문지, pp9-12, 1994.
- [6] H. Hashimoto : " Brushless Servo Motor Control using Variable Structure Approach " IEEE Trans. on Ind Appl. vol IA-24 No. 1 , JAN. 1988.

표 1. 모의실험에 적용된 파라미터와 이득

110V/500W	$a = 350$
$R = 3.35 [\Omega]$	$k_1 = 1.2, k_2 = 0.1$
$L = 0.015 [H]$	LIMIT=5
$p = 4$	$C = 25$
$KT = 1.5 [N \cdot m/A]$	$V_d = 160 [V]$
$KE = 0.3 [N \cdot m/A]$	$k_d = 1, k_q = 1$
$J = 0.003 [N \cdot m \cdot s^2]$	
$D = 0.0795 [N \cdot m \cdot s]$	

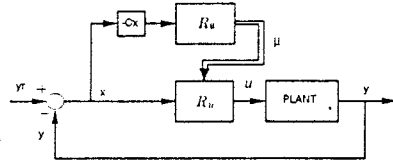


그림 1. Binary 제어기의 구조

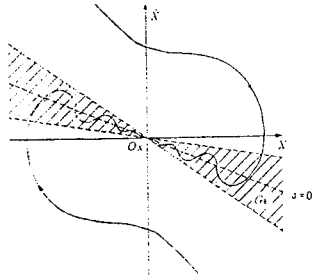


그림 2. Binary 제어기의 해 궤적

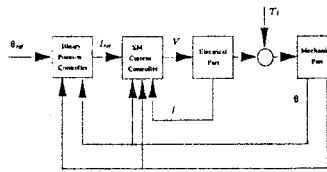
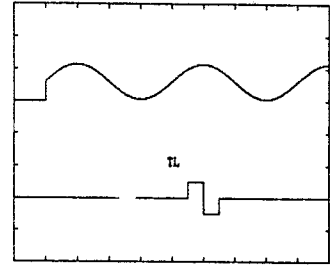
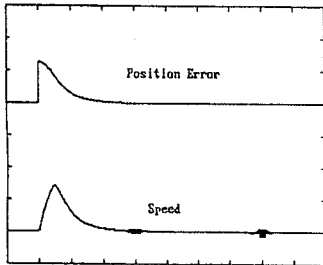


그림 3. 시스템의 전체블록도



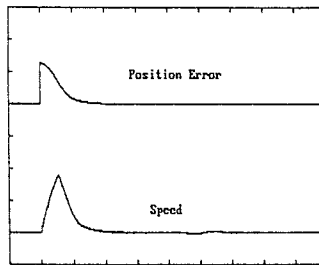
[J x (128.9), TL: 0.59, 100 msec / div]

그림 4. 파라미터 변동



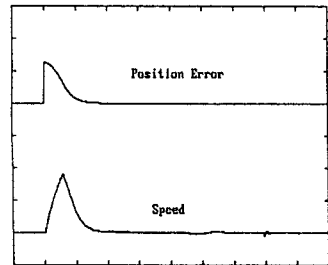
[5 rad, 50 rad/sec, 100 msec / div]

그림 5. 슬라이딩모드 제어기의 위치와 속도파형



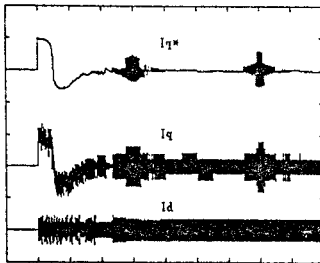
[5 rad, 50 rad/sec, 100 msec / div]

그림 7. Integral COFB를 갖는 Binary 제어기의 위치와 속도파형



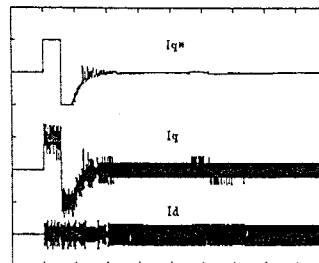
[5 rad, 50 rad/sec, 100 msec / div]

그림 9. Inertial COFB를 갖는 Binary 제어기의 위치와 속도파형



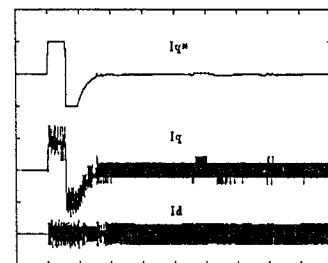
[5 A, 100 msec / div]

그림 6. 슬라이딩모드 제어기의 전류파형



[5 A, 100 msec / div]

그림 8. Integral COFB를 갖는 Binary 제어기의 전류파형



[5 A, 100 msec / div]

그림 10. Inertial COFB를 갖는 Binary 제어기의 전류파형