

슬라이딩 모드 관측기를 가지는 가변구조제어를 사용한 직접구동용 브러쉬없는 직류전동기의 강인한 위치제어

°정세교, 홍찬호, 이대식*, 윤명중

* 한국과학기술원 전기및전자공학과, ** 경북산업대학교

A Robust Position Control of a Brushless Direct Drive Motor Using a Variable Structure Control with Sliding Mode Observer

Se-Kyo Chung*, Chan-Ho Hong*, Dae-Sik Lee**, Myung-Joong Youn*

* Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

** Department of Control and Instrument Engineering, Kyung Pook Industrial University

Abstract

A robust position control scheme for a Brushless Direct Drive Motor(BLDDM) is presented. To obtain the robustness under the load variation, a Variable Structure Controller (VSC) is used. However, the VSC has a chattering problem and require the full state informations. To overcome this problem, in this paper, the sliding mode observer is used for compensating the load disturbance and estimating the motor velocity. As a result, the VSC for a BLDDM position control is designed by using only position measurement and the chattering problem is greatly reduced. To show the validity of the proposed scheme, the simulation study is carried out.

1. 서론

최근에 와서 감속기어를 사용하지 않는 직접구동용 전동기가 로보트, 공작기계등에 많이 사용되어지고 있다. 직접구동용 전동기를 사용한 시스템은 감속기어에 의해서 발생하는 백래쉬, 노화에 따른 정밀도저하 등의 문제를 해결할 수 있으나 부하가 직접 전동기에 연결되므로 부하변동에 민감하다는 문제점을 가지고 있으며 이러한 문제는 제어성능에 나쁜 영향을 미친다. 부하변동에 강인한 제어성능을 얻기 위하여 많은 제어기법들이 연구되어 왔으며 그중에서도 가변구조제어(Variable Structure Control)는 외란이나 파라미터 변화에 강인한 특성을 가지고 있기 때문에 최근에 전동기나 로보트 등의 시스템에 많이 적용되고 있다. 그러나, 가변구조제어기를 구성하기 위해서는 전상태의 정보가 필요하고 입력의 채터링(chattering)현상이 나타난다는 단점을 가지고 있다. 특히, 채터링 현상은 직접구동용 전동기 시스템에의 적용에 큰 장애요소로 작용된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 잠음에 강인한 특성을 갖는 슬라이딩 모드 관측기(Sliding Mode Observer)를 사용하여 전동기의 상태변수인 속도 및 부하토크를 추정하여 단지 위치에 대한 정보 만으로 가변구조제어기를 설계하였고 또한, 추정된 부하토크로 전동기의 부하변동을 적절히 보상해 줌으로 인해 채터링 현상을 감소시키고자 하였다.

2. 모델링

백터제어 기법을 사용한 전압인 인버터로 구동되는 BLDDM 구동 시스템은 그림(1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 전동기의 기계적인 동특성은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} T_e &= K_T i_q \\ &= J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + T_L \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, T_e : developed torque

K_T : torque constant

i_q : q-axis current

J : inertia moment

D : viscous friction

θ : mechanical position

T_L : load disturbance

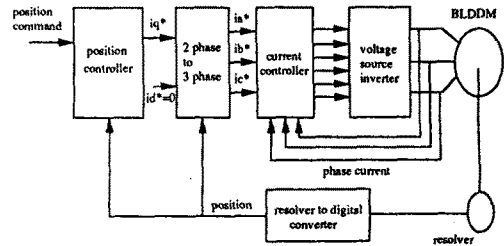


그림 1. BLDDM 구동시스템

부하외란 T_L 은 부하토크의 변화와 관성모멘트등의 파라미터 변화에 대한 영향을 합한 값을 나타내며 식(1)은 다음과 같은 상태방정식으로 나타낼수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu - BT_L \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$$x = [\theta \ \dot{\theta}], \quad u = K_T i_q$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{D}{J} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0]$$

3. 슬라이딩 모드 관측기(Sliding Mode Observer) 설계

식(2) 에서 부하의 외란 T_L 은 상태변수가 아니고 미지의 입력이다. 그러나, 미지의 입력을 하나의 상태변수로 하여 추정하는 방법은 [3]의 논문 등에서 제안된 바 있다. 부하의 외란의 변화가 관측기(observer)의 동특성에 비해 상당히 느리다고 보면 짧은 순간에 부하외란은 일정하다고 볼수 있다. 따라서, 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\frac{dT_L}{dt} = 0 \quad (3)$$

따라서, 외란 T_L 을 하나의 상태변수로 취급할수 있으며 이를 이용하여 식(2)는 다음과 같은 확장된 상태방정식 (augment state

equation) 으로 표현할수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (4)$$

$$y = [I \ 0][x_1 \ x_2]^T$$

여기서, $x_1 = \theta$, $x_2 = [\dot{\theta} \ T_L]^T$

$$A_{11} = 0, A_{12} = [1 \ 0], A_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, A_{22} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{J} & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = 0, B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix}$$

식(4)로 부터 슬라이딩 모드 관측기는 다음과 같이 구성할수 있다.[1]

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= A_{11}\hat{x}_1 + A_{12}\hat{x}_2 + B_1u + Ksgn(\zeta) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= A_{21}\hat{x}_1 + A_{22}\hat{x}_2 + B_2u - LKsgn(\zeta) \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 슬라이딩 면은 $\zeta = y - \hat{y}$ 로 두었으며 뒷첨자 $\hat{\cdot}$ 은 관측기에 의해서 추정된 값을 의미한다. 실제값 과 추정값의 오차를 $e_1 = x_1 - \hat{x}_1$, $e_2 = x_2 - \hat{x}_2$ 로 두면 슬라이딩 면에서의 동가제어(equivalent control) 입력은 조건

$$\zeta = 0, \dot{\zeta} = 0 \quad (6)$$

을 만족하므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Ksgn(\zeta) = -A_{12}e_2 \quad (7)$$

따라서, 슬라이딩 면 위에서의 식(8)과 같이 최소차수 관측기(reduced order observer)와 동일한 오차방정식 (error equation) 을 갖는다.

$$\dot{e}_2 = (A_{22} + LA_{12})e_2 \quad (8)$$

따라서, 관측기의 이득L은 pole placement 기법에 의해서 구해질수 있다. 그리고, 이득K는 다음의 슬라이딩 모드 존재조건에 의해서 구해질수 있다.

$$\begin{aligned} \zeta\dot{\zeta} &= \zeta(\dot{y} - \dot{\hat{y}}) \\ &= \zeta(\dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}} - Ksgn(\zeta)) \\ &< 0 \end{aligned} \quad (9)$$

위의 조건에서 슬라이딩 모드가 존재하기 위한 이득K는 다음 부등식으로 주어진다.

$$K > |\theta - \hat{\theta}| \quad (10)$$

4. 가변구조 제어기 설계

가변구조 제어기의 설계는 크게 슬라이딩 면의 설계과 제어입력의 설정으로 나눌수 있으며 여기서는 다음과같은 선형의 슬라이딩 면을 사용하였다.

$$s = ce + e \quad (11)$$

여기서, e 는 위치명령과 실제위치의 오차이다. 따라서, 위치와 속도의 궤환이 필요하다. 그러나, 본 논문에서는 속도값을 추정된 값을 이용 하였으므로 식(11)의 슬라이딩 면이 아니라 다음과 같은 슬라이딩 면을 가지게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= ce + \dot{e} \\ &= ce + e + \varepsilon \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)에서 ε 은 실제속도와 추정속도의 오차를 나타내며 오차는 관측기의 동특성에 의해서 점근적으로 영으로 수렴하므로 결국, $\dot{s} \rightarrow s$ 가 된다.

한편, 제안된 가변구조 제어기의 제어입력은 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$u = u_{eq} + \Delta u \quad (13)$$

여기서, 첫항은 동가입력 조건 $\dot{s} = 0$, $s = 0$ 을 만족하는 제어입력으로 다음과 같이 주어질수 있다.

$$u_{eq} = J\left(\frac{D}{J}-c\right)\dot{\theta} + T_L \quad (14)$$

그리고, Δu 는 다음과 같은 형태로 주어질수 있으며

$$\Delta u = k_v sgm(\dot{s}) \quad (15)$$

여기서,

$$sgm(\dot{s}) = \frac{\dot{s}}{|\dot{s}| + \delta}$$

이득 k_v 는 다음의 슬라이딩 모드 존재조건을 만족하는 값으로 선정되어진다.

$$\begin{aligned} \dot{s}\dot{s} &= \dot{s}(c\dot{e} - \Delta T_L - k_v sgm(\dot{s})) \\ &< 0 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, $\Delta T_L = T_L - \hat{T}_L$ 이며 3절에서 설계된 슬라이딩 모드 관측기에서 추정된 외란과 실제의 외란의 오차를 나타낸다. 결과적으로, 다음의 부등식을 만족하게 이득을 구할수 있다.

$$k_v > |c\dot{e} - \Delta T_L| \quad (17)$$

그림(2)는 본 논문에서 제안된 제어기의 블록선도 이다. 슬라이딩 모드 관측기에서 얻어진 속도 추정값은 궤환 되어 가변구조 제어기의 슬라이딩 면을 구성하는데 사용되어지고 외란의 추정값은 제어입력에 피드포워드로 더해져서 부하의 외란을 보상하여 준다. 그 결과로 시스템의 불확실성은 관측기의 오차로 크게 줄어들고 따라서, 식(13)의 Δu 가 식(17)과 같이크게 줄어 드므로 채터링 효과를 크게 줄일수 있다.

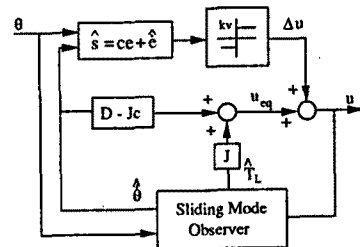


그림 2 제안된 제어 알고리즘의 블록선도

5. 시뮬레이션

제안된 알고리즘을 120[W] BLDDM에 적용하여 시뮬레이션 하였다. 전동기의 파라미터는 다음과 같다.

정격:120[W], 정격전압:140[V], 정격전류:2.1[A]
 극수:16, 고정자 저항:9[ohm], 고정자 인덕턴스:20[mH]
 회전자 관성모멘트:0.00398[Nms²], 제동계수:0.05[Nms]

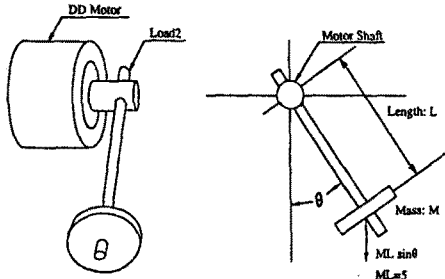


그림 3. 시뮬레이션에 사용된 부하 ($T_L = 5 \sin \theta$)

부하는 그림(3)과 같은 형태로 두었으며 전동기의 위치에 따라 정현 함수로 주어진다. 시뮬레이션에서 제어기의 샘플링 시간은 0.2ms로 하였다. 관측기의 이득은 $K=50$, $L=[-100 \ 50]$ 으로 설정하였고 슬라이딩 면의 기울기 $c=10$, 제어기 이득 $k_v=0.2$ 으로 두었다. 그림(4)는 슬라이딩 모드 관측기에 의해서 추정된 속도와 실제 속도와의 오차 그리고 추정된 부하토크와 실제토크의 오차를 나타낸다. 그림(5)는 위치와 속도오차의 응답특성을 나타내었다. 부하의 변동에도 우수한 제어성능을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 그림(6)은 제어입력을 나타내고 있다. 부하 토크의 변동이 외란 관측기에 의해서 보상되고 스위칭 함수를 sigmoid 함수를 사용하였으므로 채터링 현상이 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. 그림(7)은 슬라이딩 면을 나타낸다. 속도의 관측오차가 지수적으로 감소함에 따라 $\dot{s} \rightarrow s$ 로 점진적으로 수렴한다. 따라서, 관측된 속도정보를 이용하여도 가변구조 제어기를 구성할 수 있음을 보여준다.

6. 결론

BLDDM의 외란에 강한 위치제어를 위하여 슬라이딩 모드 관측기를 가지는 가변구조 제어기를 구성하였다. 시뮬레이션을 통하여 단지 출력의 정보만으로 가변구조 제어기를 구현할 수 있음을 보였고 또한, 관측된 외란을 이용하여 부하의 외란을 보상 하여 증으로서 채터링 현상이 감소됨을 입증 하였다. 향후 과제로는 실험을 통하여 제안된 제어기법이 실제로 적용될 수 있음을 입증 하여야 할 것이며 이는 DSP와 같은 고속의 연산처리소자를 사용하여 구현이 가능하리라 생각된다.

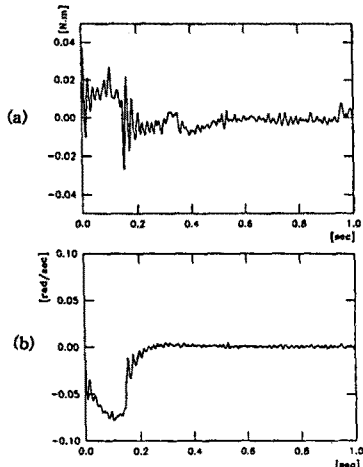


그림 4. 관측기의 오차 (a) Torque (b) Velocity

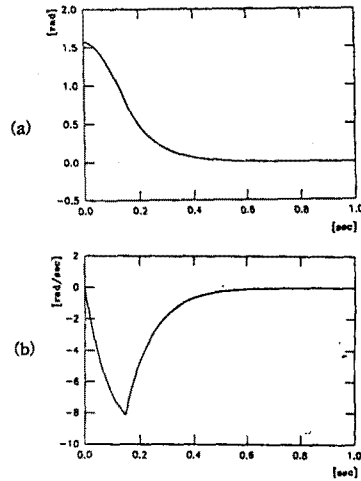


그림 5. (a) 위치 응답특성 (b) 속도 응답특성

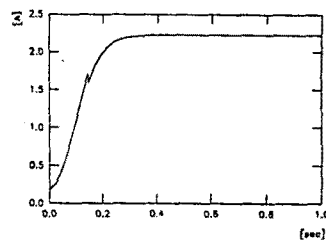


그림 6. 제어입력

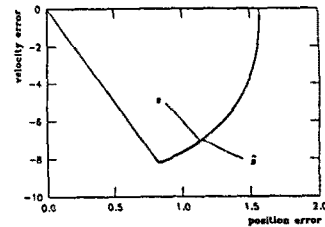


그림 7. 슬라이딩 면

REFERENCE

- [1] V.I. Utkin, "Principle identification with sliding regime," Dokl. Nauk SSSR, vol. 257, no. 3, 558-561, 1981
- [2] A.G. Bondarev, et al., "Sliding mode in systems with asymptotic state observers," Auto. Remot. Contr., no. 6, pp. 679-684, 1985.
- [3] J.S. Meditch, et al., "Observers for systems with unknown and inaccessible inputs," Int. J. Contr., vol.19, no. 3, pp. 473-480, 1974.
- [4] N. Matsui, et al., "Autocompensation of torque ripple of direct drive motor by torque observer," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 1, 1993.
- [5] J.H. Lee, et al., "Design of continuous sliding mode controller for BLDDM with prescribed tracking performance," IEEE PESC, pp. 770-775.
- [6] V.I. Utkin, "Variable structure system with sliding mode," IEEE Trans. Auto. Contr., vol. AC-22, no. 2, pp. 212-222, 1977.