

슬라이딩 모드를 이용한 직류 전동기의 디지털 속도 제어기
(DIGITAL SPEED CONTROLLER OF DC MOTOR USING THE SLIDING MODE)

이 성 백
원 영 진
권 오 서*

강원대학교

요 약

본 논문은 슬라이딩 모드 제어 기법을 이용한 직류 전동기의 디지털 속도 제어기에 관한 연구이다. 또한 연속 시스템에 적용하던 슬라이딩 모드 제어 기법을 이산 시스템에 사용할 수 있도록 해석하고, 실험하였다.

슬라이딩 모드 제어기에서 발생하는 체터링(CHATTERING) 현상을 감소시키기 위해 스위칭 주파수를 높이고, 샘플링 주기를 최대한 줄였으며 제어기 출력에 필터를 도입하였다. 또한, 스위칭 지연과 외란에 대한 보상도 고려하였으며 슬라이딩 모드 제어기를 마이크로 프로세서로 구성하였다.

전력 소비를 줄이기 위해 LIMITED UNIPOLAR 모드에서 직류 전동기를 구동하였다.

ABSTRACT

This paper concerns a digital speed controller of dc motor using sliding mode control. The sliding control, which has been applied to a continuous system, is analyzed and experimented on a discrete system.

To reduce chattering, which is generated in the sliding mode controller, a switching frequency is increased, a sampling period minimized and a filter introduced to the sliding mode controller output. Also compensation for switching delay and disturbance is considered and the sliding mode controller is implemented by using microprocessor.

A dc motor is driven in limited unipolar mode in order to reduce power dissipation.

제 1 장 서 론

기존의 PI, PID 등의 제어 기법은 그 성능이 우수하나 과도응답, 안정 시간(SETTLING TIME), 시스템 파라미터와 외부 외란에 민감한 과도 성능과 같은 문제점을 가지고 있으므로 정밀한 제어를 요구하는 시스템에 적합하지 않다.^{[1][2]}

파라미터 변동이나 외란에 강인한 특성을 갖는 슬라이딩 모드 제어 기법, 또는 가변구조 시스템(VARIABLE STRUCTURE SYSTEM)은 이러한 문제점을 해결할 수 있는 제어 기법이며, 전동기의 위치 제어

나 속도 제어에 적용되어 왔다. [3][4][5]

YOUNG, KOKOTOVIC, UTKIN 등은 높은 이득, 단일 외란만을 갖는 연속 시스템에 대한 적용만을 고려하였으나 실제 제어에선 이산 시스템에 적용되고 있다. [6][7] 즉, 현재까지 연구 되어온 슬라이딩 모드 제어 이론의 주된 연구분야는 연속 시스템에 한정된 것으로서 이 이론을 마이크로 프로세서를 이용하여 실제 시스템에 적용하기 위해서는 우선적으로 기존의 연속 시스템에 대한 슬라이딩 모드 제어 이론을 이산 시스템에 적용 할 수 있도록 변경할 필요가 있다. [8] 본 논문에서는 FURUTA가 제안한 이산 슬라이딩 제어 기법을 도입하였다.

슬라이딩 모드 제어에서 상태 변수가 슬라이딩 라인을 따라 미끄러져가면서 상태가 전환되는데, 실제 디지털 시스템에서는 스위칭 빈도수가 제한된다. 인버터의 스위칭 주파수를 높이고 외란과 스위칭 지연에 대한 손실도 보상하였으며, 전력 소비를 줄이고 실행을 간단히하기 위해 LIMITED UNIPOLAR 모드에서 직류 전동기를 구동하였다. 또한 직류 전동기의 보호를 위해 전류 제한 회로를 달았으며 전류측정기를 사용하여 전류를 모니터링 하였다.

제 2 장 가변 구조 시스템의 원리

가변 구조 시스템(VARIABLE STRUCTURE SYSTEM)의 구조는 제어되는 과정에서 미리 정해진 제어 법칙에 따라 가변된다. 따라서 새로운 시스템은 원래의 시스템과 무관한 동특성을 가지게 되며 외란이나 부하 파라미터 변화에 강인한 성질을 갖는다.

제 1 절. 슬라이딩 모드 제어 이론

가변 구조 시스템이 선형 연속 시스템일 경우 나

음과 같은 상태 방정식을 갖는다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A : n \times n \text{ 행렬} \\ x : n \text{ 차 상태 벡터, } [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \\ B : n \times 1 \text{ 행렬} \\ u : \text{단일 입력} \\ y : \text{출력 벡터} \\ C : 1 \times n \text{ 행렬} \end{array} \right.$$

이 때 슬라이딩 모드는 아래와 같이 주어지며 시스템 상태를 슬라이딩 라인에 머물게 한다.

$$S = \{x | Gx = 0\} \quad (3)$$

$$(G = [G_1 \ G_2], \ G_1 > 0, \ G_2 = 1)$$

식(3)을 만족시키는 제어 입력을 등가 제어 입력이라 하며 제어 입력의 평균치를 의미한다. 등가 제어 입력은 식(1), (3)에서 유도된다.

$$G\dot{x} = GAx + GBu = 0 \quad (4)$$

$$u = F_{eq}x \quad (5)$$

$$(F_{eq} = -(GB)^{-1}GA)$$

그러나 실제 시스템에선 시간 지연, 외란이 있으므로 이를 보상에 주어야한다. 이 때 제어 입력식은 아래와 같다.

$$u = Fx$$

$$F = F_{eq} + F_d \quad (6)$$

$$(F_d : \text{보상값})$$

위의 등가 제어 입력을 (1)식에 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{x} = (A + BF)x \quad (7)$$

그리고 제어값 F는 슬라이딩 모드 존재조건, 즉 LIAPUNOV 함수를 만족하도록 선택되어야 한다. LIAPUNOV 함수는 (8)식과 같이 정의되는 POSITIVE

DEFINITE 함수이며, 그 미분값은 NEGATIVE DEFINITE 함수이다.

$$V = 1/2 \cdot s^2 > 0 \quad (8)$$

$$V = \dot{S}\dot{S} = S (GAX + GBu) < 0 \quad (9)$$

제 2 절. 이산 시스템에서의 슬라이딩 모드

슬라이딩 모드를 디지털 컴퓨터로 실행할 경우 제어 입력은 매 샘플링 주기마다 주어지며 샘플링 기간동안 일정한 값을 유지한다.

$$u(t) = u_k$$

$$k\Delta \leq t < (k+1)\Delta \quad (\Delta : \text{샘플링 주기}) \quad (10)$$

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma u_k$$

$$y_k = Cx_k \quad (11)$$

$$\begin{cases} x_k = x(k\Delta) \\ y_k = y(k\Delta) \\ \Phi = \exp(\Lambda\Delta) \\ \Gamma = \int_0^\Delta \exp(\Lambda\tau) d\tau B \end{cases}$$

이산 시스템의 슬라이딩 라인 S_k 는 연속 시스템에서 결정된 것과 비슷하게 정의된다.

$$S_k = Gx_k \quad (12)$$

G 는 모든 샘플링 주기에서 시스템 상태가 안정 되도록 설계되어야 하며 시스템이 안정 상태에 머물러 있으면 다음과 같다.

$$S_k = S_{k+1} = S_{k+2} = \dots = 0 \quad (13)$$

$$Gx_{k+1} = G\Phi x_k + G\Gamma u_k = Gx_k = 0 \quad (14)$$

이때, $S_k = 0$ 으로 만드는 등가 제어 입력은 다음과 같이 주어진다.

$$u_k = F_{eq} x_k \quad (15)$$

$$(F_{eq} = -(G\Gamma)^{-1} G(\Phi - I))$$

(15)식을 (11)식에 대입하면, 아래와 같은 식을 얻는다.

$$x_{k+1} = [\Phi - (G\Gamma)^{-1} G(\Phi - I)] x_k \quad (16)$$

이산 등가 제어 입력에 스위칭 지연, 외란등을 보강하면 다음과 같다.

$$u_k = (F_{eq} + F_D) x_k \quad (17)$$

$$(F_D : \text{보상값})$$

만약 여기서 샘플링 속도가 매우 작다면 Φ 와 Γ 는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\Phi = I + \Lambda\Delta \quad (18)$$

$$\Gamma = B\Delta \quad (19)$$

여기서 등가 제어 입력은 다음과 같다.

$$u_k = F_{eq} x_k \quad (20)$$

$$(F_{eq} = -(GB\Delta)^{-1} GA\Delta)$$

샘플링 주기를 작게 하였을 경우 등가 제어 입력은 거의 연속 시스템의 등가 제어 입력과 일치한다.

이산 시스템의 LIAPUNOV 함수는 아래의 같다.

$$V_k = 1/2 \cdot S_k^2 \quad (21)$$

제 3 장 시스템 설계

제 1 절. 속도 제어 시스템

그림1은 슬라이딩 모드를 이용한 직류 전동기의 속도 제어 시스템 블록도이다.

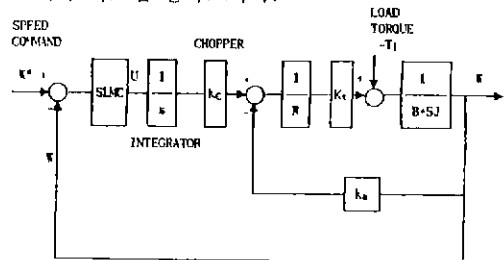


그림 1. 직류 전동기의 속도 제어 시스템

Fig 1. Speed Control System of DC Motor

속도제어 시스템의 상태 공간 모델은 (22)식과 (23)식으로 주어진다

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} U + \begin{bmatrix} 1 \\ -1/J \end{bmatrix} T_1 \quad (22)$$

$$y = C x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = w^* - w \text{ (속도오차)} \\ x_2 = \frac{dw}{dt} \text{ (가속도)} \\ a = \frac{(Rb + K_t K_a)}{RJ} \\ b = \frac{K_t K_c}{RJ} \\ \psi = \text{슬라이딩 모드 제어기의 이득} \\ U = \psi x_1 \\ y = x_1 \end{array} \right.$$

U = ψx₁을 식(22)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ b\psi & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -1/J \end{bmatrix} T_1 \quad (24)$$

위의 상태 방정식은 ψ가 샘플링 시간에 따라 변하므로 시간에 따라 가변된다. 식(24)에서 외란 즉 모드를 무시하면 다음과 같은 상태 방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ b\psi & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

제 2절. 실험 및 결과 고찰

그림 2는 전체 실험 장치의 구성도이다. IBM-PC/386을 주(MAIN) 제어기로 사용하였으며 주변 기기와의 정보 전송을 위해 8255 병렬카드를 사용하였다.

속도는, 회전당 200 펄스를 발생하는 홀 타입 엔코더로부터 전달되는 펄스 수를 M/T 기법을 이용하여 측정하였고, MCS-51의 내부타이머와 외부인터럽트를 사용하였다. MCS-51은 검출한 속도론 5ms~6us 마다 주 제어기로 전송하였으며 주 제어기는 속도값을 받아들이어 기속도값과 슬라이딩 모드 제어값을 계산한 다음 D/A변환기로 출력을 내보낸다. D/A 변환

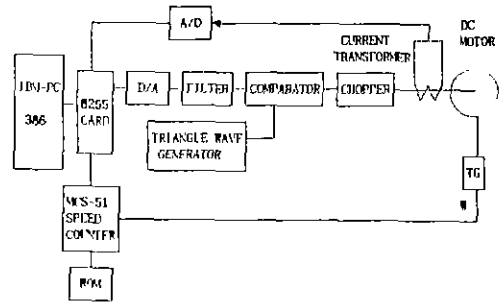


그림 2. 실험 장치의 블록도

Fig 2. Block diagram of experiment system
기 출력단에 체터링 현상을 줄이기 위해 필터를 도입하였다. 주 제어루프의 수평 시간은 1ms 미만이며, 시스템 운전중에 수치 연산이나 모니터링이 용이하다.

직류 전동기 구동부는 풀 브리지 단상 초피로 구성되었으며, 스위칭 소자로 트랜지스터를 사용하였다.

실험은 스위칭 시간 지연 등 외란에 대해 보상을 해준 슬라이딩 모드 제어, 보상을 안해준 슬라이딩 모드 제어, PI 제어, 그리고 스위칭 주파수를 5 KHz와 23,3645 KHz로 가변했을 경우에 대해 행하였다.

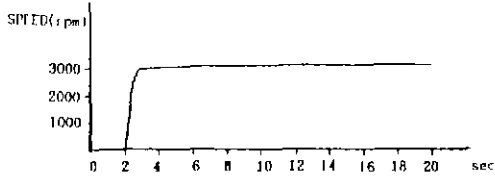
그림 3은 속도 설정값을 3000rpm으로 하고 스위칭 주파수를 5 KHz, 23.3645KHz 했을 경우의 결과이다.

그림 3 (a)는 보상이 있는 슬라이딩 모드 제어로 가장 빠른 응답과 안정성을 갖는다. 그림 3 (b)는 보상이 없는 슬라이딩 모드 제어로 체터링이 심하며, 안정 상태가 된 후에도 속도 변화가 심하다. 그림 3 (c)는 PI 제어이며 (a)보다 약간 응답속도가 늦지만 (b)보다는 안정되어 있다. (d)와 (e)는 5KHz 스위칭 주파수 일때의 결과로 23.3645KHz 때보다 응답 특성이 나쁘고 소음이 심하였다.

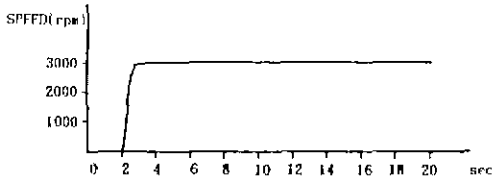
표 1에 3가지 서로 다른 경우의 안정상태 속도값을 나열하였다.

실험 결과에서 살펴본바와 같이 스위칭 주파수를

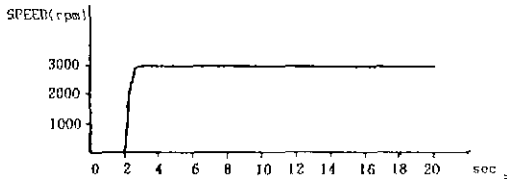
높은 상태에서 보상동을 할 경우 훨씬 응답이 개선되고, 안정 상태 성능이 좋아짐을 알 수 있었다.



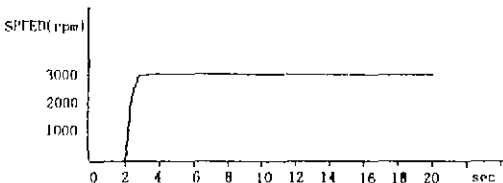
(a) 보상이 있는 슬라이딩 모드제어 (23KHz)
(Sliding mode control with compensation (23KHz))



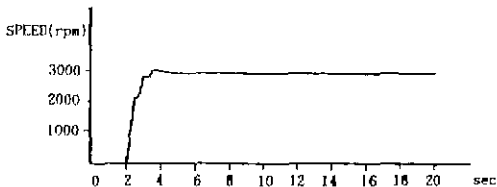
(b) 보상이 없는 슬라이딩 모드제어 (23KHz)
(Sliding mode control without compensation (23KHz))



(c) PI 제어 (23KHz)
(PI control (23KHz))



(d) 보상이 있는 슬라이딩 모드제어 (5KHz)
(Sliding control with compensation (5KHz))



(e) 보상이 없는 슬라이딩 모드제어 (5KHz)
(Sliding mode control without compensation (5KHz))

그림 3 스텝 응답(속도 설정값 = 3000 rpm)

Fig 3 Step response(Speed command = 3000 rpm)

PI	SLMC I (5KHz)	SLMC II (23KHz)
2989	2936	3001
3005	2906	3002
3007	2871	3003
2984	2904	3006
3007	2979	3007
3000	2937	3006
3005	2910	3004
2984	2874	3001
3014	2904	2999
2997	2965	2989
2989	2927	2988
3003	2884	2988
3011	2885	2989
2983	3034	2990
3006	3133	2999
3005	3089	3001
2988	3059	3004
3003	3021	3005
3011	2982	3006
2988	2935	3005
2989	2906	3002
3024	2870	3000

표 I. 안정 상태에서의 속도 비교표
Table I. Speed comparison at steady state

제 4 장. 결론

본 연구에서는 직류 전동기의 속도 제어를 위해 슬라이딩 모드 제어 기법을 적용하였으며, 디지털 시스템을 구성하여 실행하였다.

슬라이딩 모드 제어 입력의 불연속성으로 인해 발생하는 채터링 현상을 감소시키기 위해서 샘플링 속도와 스위칭 주파수를 높였으며, 슬라이딩 모드 제어기 출력단에 필터를 도입하였다. 그 결과 기존의 제어 방법보다 우수한 속도 응답과 안정 상태 성능을 얻어냈다. 그러나, 전체 시스템의 정확한 파라메터를 추정하지 못하여 안정성 문제를 해결하지 못하였다.

본 연구에서는 IBM-PC/386을 이용하여 제어를 구성하였기 때문에 제어 프로그램 변경, 전체 시스템에 대한 제어 그리고 모니터링이 용이 하였다.

Reference

1. Geza Joos, Pierre Sicard, E.D. Goodman, "A

- Comparison of Microcomputer-Based Implementations of Cascaded and Parallel Speed and Current Loops In DC Motor Drives", IEEE/IAS, 413-419, 1987
2. K. Imada , K. hashimoto , " Practical Considerations for Application of Digital PID Predictive Control", IECON, 375-380, 1988.
 3. Pradeep K. Nandam and P.C.Sen, " Observer-based Sliding Mode Control for Variable Speed Drive Systems", IEEE/IAS, 209-214, 1987.
 4. Fumio HARASHIMA, Hideki HASHIMOTO and Seiji KONDO, "MOSFET Converter-Fed Position Servo System with Sliding Mode Control", IEEE Trans. Ind. Elec., vol. IE-32, no. 3, 1985.
 5. Bimal K. Bose, " Sliding Mode Control of Induction Motor", IEEE/IAS, 479-486, 1985.
 6. P. Stcard, K. Al-Haddad and V. Rajagapalan, " Sliding Mode Control of a DC Servomotor Using a Microprocessor Chattering Elimination", EPE , Aachen, 267-271, 1989.
 7. Katsuhisa Furuta, Kazuhiro Kosuge, Hideyuki Kobayashi, "Selftuning, Sliding Mode and Adaptive Control for Direct Drive Motor", IECON, 459-465, 1988.
 8. K. Furuta and M. Morisada, "Implementation of Sliding Mode Control by a Digital Computer" IECON, 453-458, 1988.