

퍼지논리를 이용한 직류전동기의 가변구조제어

이용재 진명철 이상래 이광원

* 아주대학교 제어공학과 ** 대전공업대학 전자공학과

Variable Structure Control of DC motor Using Fuzzy Logic

Yong-Jae Lee, Myung-Chui Jin, Sang-Rae Lee, Kwang-Won Lee

* Department of Control Eng. Ajou University

** Department of Electronics Eng. Taejon Technic. Colledge

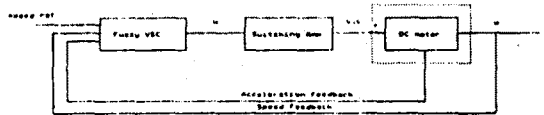
ABSTRACT

The Sliding Mode Control of Variable Structure System is applied to robot manipulators or servo system for its merits of robustness to variable system parameters and disturbances. But Switching frequency of control input is excessively high during sliding mode operation. In this paper, a new control algorithm using fuzzy logic is proposed to solve this problem.

With the proposed algorithm, a dc motor speed control system has been simulated and the result shows expected performances.

2. 퍼지 가변구조 제어시스템의 구조

가변구조 제어가 기준 신호 (속도) 와 궤환 신호 (속도, 가속도) 로 부터 퍼지추론과정을 통하여 결정된 출력을 스위칭 증폭기의 스위칭 지령으로 직접 보내도록 전체적인 시스템의 구조를 다음과 같이 구성하였다.



1. 서론

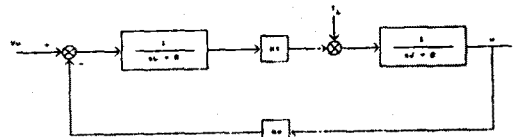
가변구조제어 이론은 시스템의 상태가 위상 평면상에서 미리정해진 불연속평면 (Switching Surface) 을 교차하는 순간 시스템의 구조를 변화시킴으로 시스템이 본래의 동특성 대신 슬라이딩평면으로 주어지는 동특성을 갖게하는 제어방법이다. 이와같은 제어방법은 시스템 파라미터의 변화나 외란에 둔감한 강인성을 가지는 장점이 있어 로봇 매니플레이터나 서보시스템의 제어기법으로 이용되고 있다. 그러나 가변구조 제어시스템에서는 시스템의 상태를 스위칭 평면에 구속시키는 과정 (즉 슬라이딩 모드시) 에서 그 평면에서의 스위칭 주파수를 매우 높게 한다. 이러한 빠른 스위칭은 가변구조제어의 장점인 강인성을 보장해 줄 수 있으나 스위칭 소자의 손실이나 모델링시 제외됐던 고주파 동특성을 야기시킬 수가 있다. [1]-[3] 따라서 스위칭 주파수를 강인성을 보장하는 범위 내에서 낮추는 것이 필요하다. 스위칭 주파수를 낮추는 한 방법으로는 슬라이딩 라인에 일정한 폭을 두어 스위칭을 하는 히스테리시스 방법을 들 수 있다. 이와같은 방법은 스위칭 주파수가 전동기의 전기적 시상수의 영향을 많이 받는다.

본 논문에서는 가변구조 제어기에 퍼지논리를 적용하여 제어입력의 스위칭 주파수를 낮추는 새로운 제어 알고리즘을 제시하고 이를 직류 전동기의 속도제어에 적용하여 보았다. 시뮬레이션 결과 본 연구에서의 퍼지 가변구조 제어기는 전동기의 전기적 시상수가 변함에도 스위칭 주파수가 일정한 좋은 응답특성을 보여 주었다.

< 그림 1 > 시스템 구조

2.1 직류전동기부

점선으로 표시된 직류전동기의 시스템블럭은 아래와 같다.



< 그림 2 > 직류전동기의 시스템블럭도

위 블럭에 대한 동적방정식은

$$L \frac{di}{dt} + Ri + k_e \omega = V \cdot u$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L = k_t i \quad (2.1)$$

이다. 여기서 V 는 스위칭 증폭기의 직류전원 전압이고 u 는 스위칭 지령으로 $+1$ 또는 -1 의 값을 갖는다.

속도제어를 위하여 기준속도를 ω^* 라 하면 속도오차와 속도 오차의 변화율에 대한 상태방정식은 아래와 같다.

$$\dot{x} = A x + B u + C \quad (2.2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ k_e V / J L \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ -RT_L / J L - a_1 \omega^* \end{bmatrix}$$

여기서

$$x = [x_1 \quad x_2]^T$$

$$= [w - \omega^* \quad \frac{d}{dt}(w - \omega^*)]^T$$

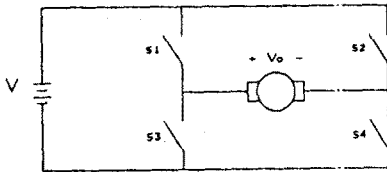
$$a_1 = \frac{BR + k_y k_e}{JL} \quad a_2 = \frac{B}{J} + \frac{R}{L}$$

이다.

2.2 스위칭 증폭기부

일반적인 PWM 하기위한 스위칭 증폭기의 구조가 그림 3에 나타나 있고 스위칭 증폭기의 출력을 얻기위한 스위칭 지령 u_s 는 아래와 같은 스위치 상태를 요구한다.

$$u_s = \begin{cases} +1 : S_1 \ \& \ S_4 \ \text{가 on} \ (v_o = +V) \\ 0 : S_1 \ \& \ S_2 \ \text{or} \ S_3 \ \& \ S_4 \ \text{가 on} \ (v_o = 0) \\ -1 : S_2 \ \& \ S_3 \ \text{가 on} \ (v_o = -V) \end{cases}$$



< 그림 3 > 스위칭 증폭기의 구조

2.3 퍼지 가변구조 제어기부

기존의 가변구조제어기는 상태방정에서의 스위칭 라인유 아래와 같이 설정했을때

$$S = x_1 + \tau x_2 = 0 \quad (2.3)$$

S 의 부호에 따라 feedback gain 을 바꾸어 줌으로써 제어입력 u_v 는 다음과 같이 결정된다.

$$u_v = \begin{cases} u^* & S > 0 \\ u^- & S < 0 \end{cases}$$

이에따라 위상평면상에서의 상태궤적은 슬라이딩 라인 $S = 0$ 에 구속되지만 스위칭 주파수는 지나치게 높아진다. 본 연구에서 가변구조제어기는 가변구조 제어입력 u_v 가 연속적인 모든 값을 갖게하지 않고 스위칭 증폭기에서 출력가능한 $+V$ 또는 $-V$ 만 갖게하여 별도의 PWM 회로가 필요 없도록 구성하였다. 그리고 스위칭이 $S = 0$ 근처에서 일어나게 할 수 있도록 스위칭 라인과 오차에 해당하는 변수 S 를 퍼지화 시키고 퍼지 로직을 이용하여 스위칭 증폭기의 제어입력 u 를 출력하게 하였다.

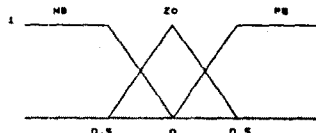
3. 퍼지 알고리즘

3.1 퍼지 변수

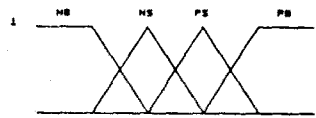
퍼지 집합의 기본 정의식은 다음과 같다. 전체집합 U 의 요소 x 들로 된 퍼지 집합 $F(x)$ 는 멤버십 함수 (membership function) 로 다음과 같이 표현된다. [4]-[5]

$$\mu_F(x) : U \rightarrow [0, 1]$$

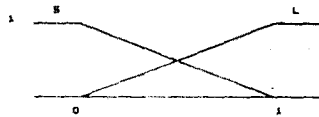
스위칭이 식 (2.3) 의 $S = 0$ 부근에서 일어날 수 있도록 S 와 S 의 시간 변화율 CS , 스위칭 경과시간 T 를 퍼지 변수로 잡고 각각의 멤버십 함수를 그림 4 와 같이 설정하였다.



< S 의 퍼지변수 >



< CS 의 퍼지변수 >



< T 의 퍼지변수 >

< 그림 4 > 각각의 퍼지변수

3.2 제어 알고리즘

퍼지 변수의 선정으로 부터 다음과 같은 제어 전략을 생각할 수 있다.

- ① 스위칭 라인 부근에서 S의 시간변화율이 작으면 스위칭을 한다. ---- 강인성을 유지.
- ② 스위칭 라인 부근에서 S의 시간변화율이 크면 스위칭을 하지 않는다. ---- 스위칭 주파수를 낮춤.

이것을 언어적 제어규칙으로 표현하면

R1 : 만일 T가 TI 이고 S가 SI 이며 CS가 CSI 이면 U는 UI 이다.

이것을 합성 규칙으로 나타내면

$$R1 = T1 \times S1 \times CS1$$

이다. 위 제어규칙에서 전건부 조건 T1, S1, CS1는 전체 집합 T, S, CS에 대응하는 퍼지 부집합(subset)들이다. 후건부 조건 Ui는 스위칭 증폭기의 제어입력이 되어야 하므로 본 연구에서는 퍼지 부집합 대신 크리스프 집합으로 택했다. 퍼지 추론은 측정된 상태입력의 멤버십 값과 퍼지 관계의 합성규칙에 의해 이루어진다.

$$U1 = R1 \circ (T1 \times S1 \times CS1)$$

만약 N개의 제어 규칙이 or로 결합되어 있다고 가정하면 퍼지 함의(implication)는 각 제어 규칙의 함으로 표현되고

$$R = R1 \cup R2 \cup \dots \cup RN$$

$$= \bigcup_{i=1}^N (T1 \times S1 \times CS1)$$

전체 추론결과는

$$U = R \circ (T \times S \times CS)$$

으로 구해진다. 여기서 \circ 는 합성 연산자이며 본 연구에서는 연산의 간편함을 기하기 위하여 max-min 합성 대신에 max-product 합성을 사용하였다.

따라서 i 번째 규칙의 적합도 ω_i 는 아래와 같이 계산된다.

$$\omega_i = T1 \cdot S1 \cdot CS1$$

각각의 제어규칙을 아래 Table에 나타냈다.

< T = S 일때의 제어 규칙표 >

| s | CS | DP | DZ | DN |
|----|----|----|----|----|
| PB | 0 | 0 | 0 | 0 |
| PS | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NS | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NB | 0 | 0 | 0 | 0 |

< T = L 일때의 제어 규칙표 >

| s | CS | DP | DZ | DN |
|----|----|----|----|----|
| PB | +1 | +1 | +1 | +1 |
| PS | +1 | +1 | +1 | 0 |
| NS | 0 | 0 | 0 | -1 |
| NB | -1 | -1 | -1 | -1 |

위의 결과를 제어 대상의 입력형태로 출력하기 위해서는 이 결과를 하나의 수치로 변환해야 한다. 이러한 과정을 비퍼지화라 하며 본 연구에서는 무게 중심법(Center of Gravity)을 택했다.

$$\Delta U^0 = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$

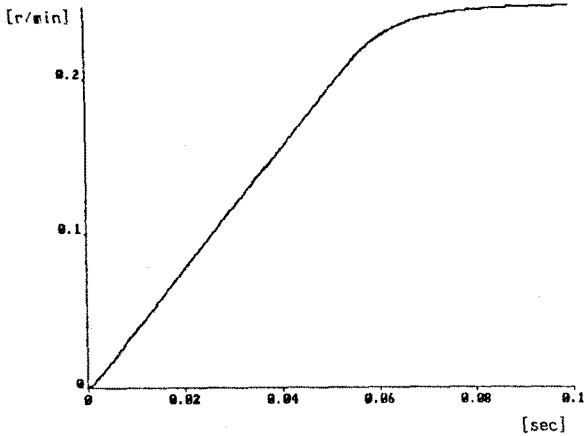
여기서 구한 ΔU^0 는 -1에서 +1사이의 모든 값이 될 수 있으므로 스위칭 증폭기의 스위칭 지령으로 출력하기 위해서 다음과 같이 ΔU^0 를 변환 하기로 한다.

$$u_s = \text{sign}(\Delta U^0)$$

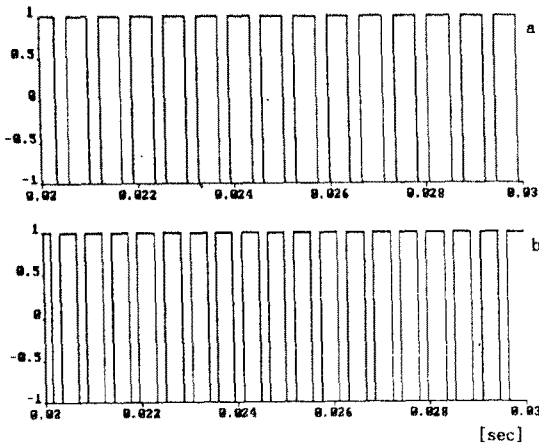
4. Simulation

본 연구에 적용된 직류 전동기의 파라미터 값들은 다음과 같다.

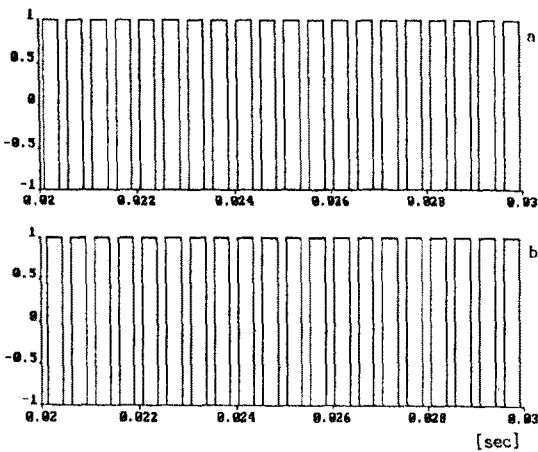
| | | | |
|-------|------------------------------|--------|---|
| La | 0.06 [H] | B | 0.0025 [Kg m ² s ⁻²] |
| Ra | 8 [Ω] | Irated | 3 [A] |
| kt ke | 0.627 [Vs/rad] | Vrated | 120 [V] |
| J | 0.00245 [Kg m ²] | Wrated | 1800 [r/min] |



< 그림 5 > 퍼지 가변구조기의 속도응답특성



< 그림 6 > 시상수가 일정할때 스위칭 주파수



< 그림 7 > 시상수가 변할때 스위칭 주파수

그림 5 은 퍼지 가변구조제어기로 기준속도를 정격의 1/4 , 슬라이딩의 기울기를 100 으로 했을때의 속도응답이다. 그림 6 는 히스테리시스 가변구조 제어기에 의한 스위칭 증폭기의 출력값으로 6-a 는 전기적 시상수가 일정할때 6-b는 전기적 시상수가 커질때 (L 이 20%감소시) 의 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전기적 시상수가 변함에 따라 스위칭 주파수가 변하는 것을 알 수 있다. 그림 7 은 퍼지 가변구조 제어기로 그림 2 와 같은 조건의 시뮬레이션 결과이다. 7-a 와 7-b 의 스위칭 주파수가 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서의 퍼지 가변구조 제어기는 파라미터의 변화에도 스위칭 주파수가 변하지 않는 특성을 보여 주었다.

5. 결론

기존의 가변구조제어방식과는 다르게 스위칭 증폭기에 직접 적용할 수 있는 형태로 가변구조제어방식을 생각해 보았으며 이러한 가변구조제어기에 퍼지논리를 이용하여 스위칭 주파수를 제한하는 예상된 특성을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] V.I.Utkin, "Variable Structure Systems: Present and Future", 1984, Plenum Publishing Corporation
- [2] U.Utkis, "Control System of Variable Structure", John Wiley & Sons, New York, 1976
- [3] F.Harashima, "VSS Approach to DC motor Control", PES C.Vol.2, pp 235-242, 1988
- [4] H.J.Zimmermann, "Fuzzy set theory and its application", Boston-Dordrecht-Lancaster, 1984
- [5] G.J.Klir and T.A.Folger, "Fuzzy Set, Uncertainty, and Information", 1988