퍼지 및 지능시스템학회 논문지 2001, Vol. 1, No. 1, pp. 9-15

단일 입력 퍼지가변구조제어기에 의한 BLDC 모터의 위치제어

Position Control of Brushless DC Motor using Single Input Fuzzy Variable Structure Controller

배준성 · 최병재 · 이대식
Joon-Sung Bae, Byung-Jae Choi, and Dae-Sik Lee

대구대학교 정보통신공학부

요 약

브러쉬없는 직류전동기의 위치제어를 위한 퍼지가변구조제어기를 설계한다. 특히 본 논문에서는 기존의 퍼지제어 기법에서 얻을수 있는 특징으로부터 하나의 전건부 변수만을 가지는 간단한 퍼지논리제어기의 설계를 기술한다. 가변구조제어는 시스템의 파라메터 변화나 외란에 둔감한 특성을 갖는다. 하지만 리칭페이스에서는 문제가 된다. 이를 개선하기 위하여 본 논문에서는 지수항을 추가한 비선형 슬라이딩면을 구성한다. 그리고 나서 비선형 슬라이딩 면과 슬라이딩 면의 변화율을 입력으로하는 퍼지 제어기를 설계한다. 이러한 2-입력 퍼지가변구조제어기의 제어 규칙표로 부터 하나의 전건부 변수만을 가지는 단일 입력 퍼지가변구조제어기를 설계한다. 이들 제어기의 성능을 입증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행한다.

ABSTRACT

The conventional variable structure controller(VSC) has some advantages including that the system response is robust to parameter variations and external disturbances. But it has some problems such as the reaching phase and the chattering control input. In order to reduce these problems a fuzzy VSC is designed. And the VSC uses a nonlinear sliding surface of an exponential function. Also we design a single input fuzzy VSC. It decreases the number of tuning factors as well as simplifies the design of a fuzzy logic controller. Finally we presents the results of computer simulations and experiments for the position control of a BLDC(Brshless DC) motor.

Key Words : BLDC 모터, 가변구조제어, 퍼지논리제어, 퍼지가변구조제어, 비선형 슬라이딩 면

1. 서 론

현재 제어용으로 가장 널리 사용되는 전동기의 하나는 직류 전동기이다. 직류 전동기는 기동 토오크가 크고 속도 제어의 범위가 넓으며 선형 시스템이므로 제어가 용이한 반면, 브러쉬의 마모에 따른 기본 성능의 저하와 보수 유지의 어려움, 또한 기계적인 스위칭으로 인한 스위칭 스트레스와 EMI등의 문제점들이 있다.

반면에 BLDC(Brushless DC) 모터(브러쉬 없는 직류 전동기)는 직류 전동기의 단점을 해결할 수 있으며, 아울러 벡터 제어 방법에 의하여 기존 직류 전동기와 같은 선형화된 모델로 제어가 가능하다.

이러한 브러쉬 없는 직류 전동기의 제어 방식으로는 PI제어기가 이용되어 왔으나 높은 성능을 요구하는 서보 응용에는 적합하지 않다. 이를 해결하는 효과적이고 체계적인 방법중의 하나가 가변구조제어이다 [1]. 하지만, 가변구조제어는 불연속적인 제어 입력에 의해 채터링이 발생 되어 실 시스템에서 원하지 않는 응답을 발생시키는 단점이 있다.

이와 같은 어려움을 해결하기 위한 방법으로 가변구조제어와 퍼지이론의 장점들을 적절히 결합하는 연구가 진행되어 왔다 [2-6].

기존의 퍼지가변구조제어에서는 다수의 퍼지 입력 변수를 사용함으로써 조정변수가 많이 존재한다.

본 논문에서는 채터링 감소를 위해 외란을 추정하는 퍼지가변구조제어기를 설계하였고, 퍼지가변구조제어기에서 조정변수의 과다 문제를 해결하고자 하나의 입력을 갖는 단일 입력 퍼지가변구조제어기를 설계하였다. 그리고 설계한 시스템의 성능을 입증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

접수일자 : 2000년 11월 18일
완료일자 : 2001년 01월 15일
This paper was supported by Taegu university.

2. BLDC 모터의 위치제어

2.1 BLDC 모터 모델링

브러쉬 없는 직류 전동기의 선형화된 상태 방정식은 다음과 같다 [7].

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -F \end{bmatrix} \quad (1)$$

X_1 = 전동기의 위치($[rad]$)
X_2 = 전동기의 속도($[rad/\sec]$)
u = 전류(i_{qc})

$$A = \frac{B_m}{J_m}$$

$$B = \frac{3}{2}(\frac{P}{2})^2 \frac{\Psi_F}{J_m}$$

$$F = \frac{P}{J_m} T_L$$

J_m : 회전자 관성 모멘트 (*Rotor moment of inertia*)
B_m : 점성 마찰 계수 (*Viscous friction coefficient*)
T_L : 부하 토오크 (*Load torque*)
P : 극수 (*Number of poles*)
Ψ_F : 고정자 권선에서 유기되는 쇄교자속

2.2 비선형 슬라이딩 면을 가지는 가변구조제어기

SISO(Single Input Single Output) 시스템은 다음과 같이 canonical 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= x_{i+1} \quad , \quad i=1,2,\cdots,n-1 \\ \dot{x}_n &= \sum_{i=1}^{n} a_i x_i + bu + f(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $x \in R^n$은 상태변수이고, $u \in R^m$은 제어 입력이며, $f(t) \in R^l$은 외란, 그리고 a_i와 b는 플랜트의 파라메터이다.

추종오차는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t) &= x(t) - x_d(t) \\ &= [\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, \cdots, \tilde{x}^{(n-1)}]^T \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)를 간단히 행렬 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + F(t) \quad (4)$$

슬라이딩 면은 식(5)와 같이 지수함수를 가지도록 설계한다.

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} c_i x_i - \sigma(0) e^{-\lambda t} \quad (5)$$

지수항을 포함하는 슬라이딩 면은 초기 상태에서부터 슬라이딩 면을 추종하는 구조를 가지게 함으로써 응답속도를 빠르게 하고, 리칭 페이스를 제거함으로써 외란과 시스템의 상태 변화에 강인한 특성을 가질 수 있다.

식(5)에 대한 제어 입력 u는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(t) = & -(\sum_{i=1}^{n} \alpha|x_i| + K_f) sgn(\sigma(t)) \\ & + \frac{\lambda}{b} \sigma(0) e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (6)$$

슬라이딩 존재 조건이 만족되기 위하여

$$\begin{aligned} \sigma\dot{\sigma} &= \sigma\left[\sum_{i=1}^{n} c_i \dot{x}_i + \lambda\sigma(0) e^{-\lambda t} \right] \\ &= \sigma\left[\dot{x}_n + \sum_{i=2}^{n} c_{i-1} x_i + \lambda\sigma(0) e^{-\lambda t} \right] \\ &= \sigma\left[\sum_{i=2}^{n} (-a_i - b\alpha sgn(\sigma(t)) + c_i) x_i \right. \\ &\quad \left. - f - bK_f sgn(\sigma(t)) + 2\lambda\sigma(0) e^{-\lambda t} \right] < 0 \end{aligned} \quad (7)$$

이 되어야 하고, 여기서 α와 K_f 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha &< -\max\left| \frac{a_i - c_i}{b} \right| \\ K_f &< -\max\left| \frac{f - 2\lambda\sigma(0) e^{-\lambda t}}{b} \right| \end{aligned} \quad (8)$$

부등식(8)을 만족하면 Lyapunov 안정성에 의하여 전체 시스템은 안정하다.

2.3 퍼지가변구조제어기의 설계

일반적으로 가변구조제어에서는 외란이나 파라메터 변화의 최대값이 존재하게 되는데, 이러한 최대값을 찾아내는데 어려움이 있다.

본 논문에서는 외란의 최대값을 추정하기 위하여 퍼지 추론기법에 의한 퍼지가변구조제어기를 설계한다.

식(6)에서 K_f를 퍼지 논리에 의하여 추정한다. 퍼지 추론에서 사용되는 퍼지 집합은 다음의 그림 1과 같다.

N : negative	Z : zero
P : positive	NH : negative huge
NB : negative big	NM : negative medium
NS : negative small	ZE : zero
PS : positive small	PM : positive medium
PB : positive big	PH : positive huge

슬라이딩 모드 만족 조건인 $\sigma\dot{\sigma}<0$를 위하여 불확실성을 포함하는 K_f는 다음과 같은 퍼지규칙에 의하여 추정될 수 있다.

R1 : If σ is N and $\dot{\sigma}$ is N then K_f is PH
R2 : If σ is N and $\dot{\sigma}$ is Z then K_f is PB
R3 : If σ is N and $\dot{\sigma}$ is P then K_f is PS
R4 : If σ is Z and $\dot{\sigma}$ is N then K_f is PM
R5 : If σ is Z and $\dot{\sigma}$ is Z then K_f is ZE
R6 : If σ is Z and $\dot{\sigma}$ is P then K_f is NM

R7 : If σ is P and $\dot{\sigma}$ is N then K_f is NS

R8 : If σ is P and $\dot{\sigma}$ is Z then K_f is NB

R9 : If σ is P and $\dot{\sigma}$ is P then K_f is NH

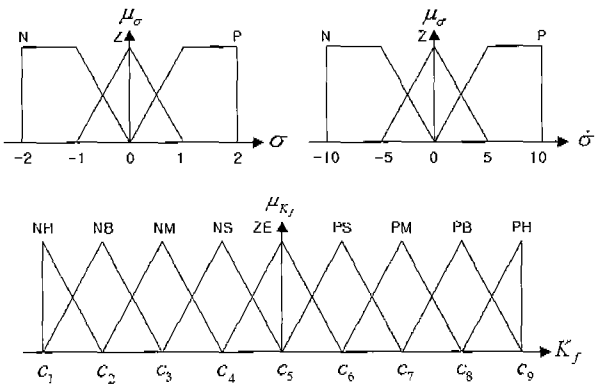


그림 1. 퍼지 집합의 소속함수
Fig. 1. Membership functions of fuzzy sets

위의 퍼지 규칙을 표로 작성하면 다음의 표 1과 같다.

표 1. 퍼지 규칙표
Table 1. Fuzzy rule table

$\dot{\sigma}$ \ σ	N	Z	P
P	PS	NM	NH
Z	PB	ZE	NB
N	PH	PM	NS

무게중심법(Centre of area : COA)의 비퍼지화(defuzzification) 방법에 의하면 K_f는 다음과 같이 구해진다.

$$K_f = \frac{\sum_{i=1}^{9} w_i c_i}{\sum_{i=1}^{9} w_i} = \frac{[c_1 \cdots c_9]\begin{bmatrix} w_1 \\ \cdot \\ w_9 \end{bmatrix}}{\sum_{i=1}^{9} w_i} \quad (9)$$

2.4 단일 입력 퍼지가변구조제어기의 설계

앞절에서 설계한 퍼지가변구조제어기에서는 퍼지 규칙에 사용되는 전건부의 변수가 2개로서 조정 변수가 여러개 존재한다.

본 절에서는 조정 변수의 과다문제를 해결하기 위해서 단지 하나만의 조정 변수를 가지는 퍼지가변구조제어기를 설계한다.

표 1의 퍼지 규칙표로 부터 K_f는 다음과 같이 σ와 $\dot{\sigma}$에 의한 함수로 표현할 수 있다.

$$K_f = f(\sigma, \dot{\sigma}) \quad (10)$$

표 1에서 K_f는 거의 skew 대칭인 특징을 가지고 있다. 이러한 퍼지 제어 규칙표의 특성으로부터 다음과 같은 하나의 변수를 이끌어낼 수 있다 [8].

$$\sigma_l = \dot{\sigma} + \beta\sigma \quad (11)$$

다시 말해 K_f는 다음과 같은 σ_l만의 함수로 표현할 수 있다.

$$K_f = f(\sigma_l) \quad (12)$$

여기서 σ_l만을 퍼지 입력으로 하는 퍼지 규칙을 세우면 다음과 같다.

R1 : If σ_l is N then K_f is P

R2 : If σ_l is Z then K_f is N

R3 : If σ_l is P then K_f is Z

위의 퍼지 규칙을 표로 정리하면 다음의 표 2와 같다.

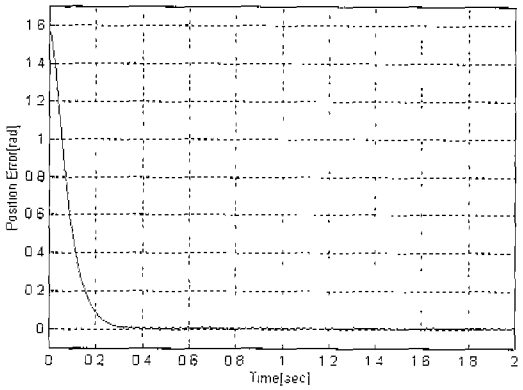
표 2. 단일 입력 퍼지 규칙표
Table 2. Single input fuzzy rule table

σ_l	N	Z	P
K_f	P	Z	N

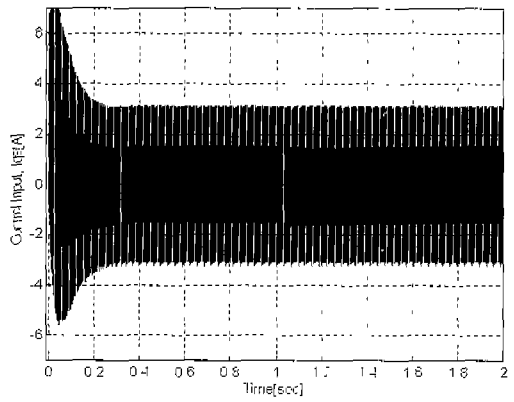
2.5 시뮬레이션 및 실험

앞에서 설계한 퍼지가변구조제어기와 단일 입력 퍼지가변구조제어기를 브러쉬 없는 직류전동기에 대하여 시뮬레이션과 실험을 수행한다.

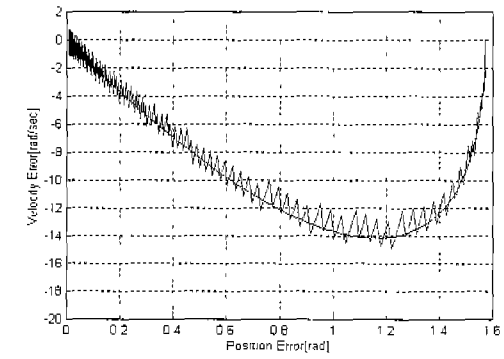
그림 2는 비선형 슬라이딩 면을 가지는 가변구조제어기에 의한 시뮬레이션 결과이다. (c)의 phase-plane에서 알 수 있듯이 비선형 슬라이딩 면에 의하여 리칭 페이스는 제거되었다. 그림 3은 비선형 슬라이딩 면을 가지는 가변구조제어기에서의 실험 결과이다. 그림 2와 거의 유사함을 볼 수 있다. 그림 4와 그림 5는 각각 퍼지가변구조제어기에 의한 시뮬레이션 및 실험 결과이다. 가변구조제어기에 의한 그림 2 및 그림 3에 비해 채터링 폭이 현저히 감소함을 볼 수 있다. 그림 6과 그림 7은 각각 단일 입력 퍼지가변구조제어기의 시뮬레이션 및 실험 결과이다. 전건부의 변수가 하나 뿐임에도 불구하고 제어 성능은 두 개의 전건부 변수를 가지는 그림 4 및 그림 5와 거의 비슷함을 확인할 수 있다.



(a) 위치응답



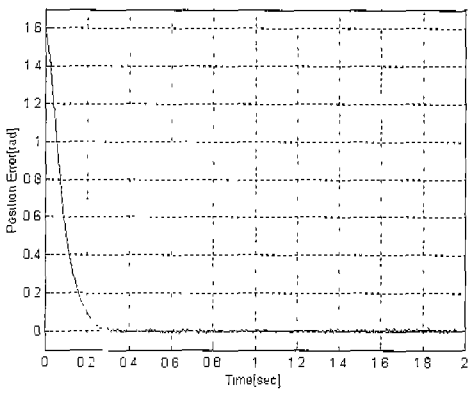
(b) 제어 입력



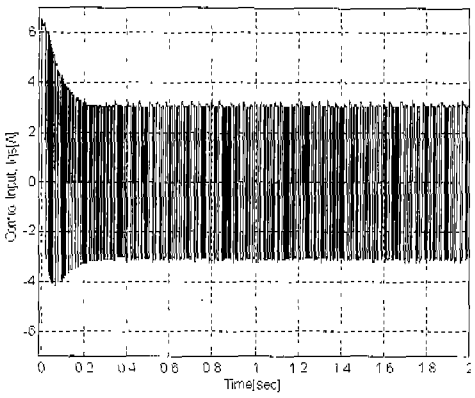
(c) phase-plane

그림 2. 비선형 슬라이딩 면을 가지는 가변구조제어기에 의한 시뮬레이션 결과

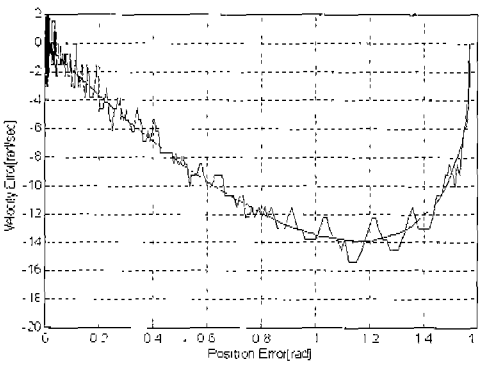
Fig. 2. Simulation results of variable structure controller with a nonlinear switching surface



(a) 위치응답



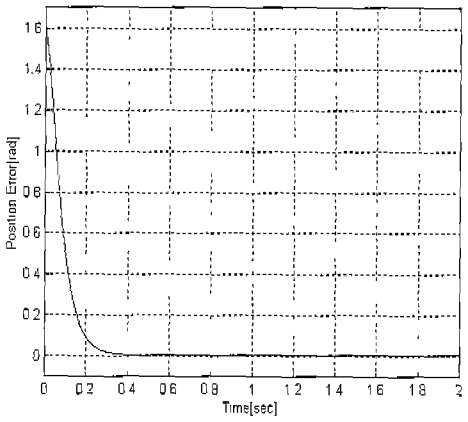
(b) 제어 입력



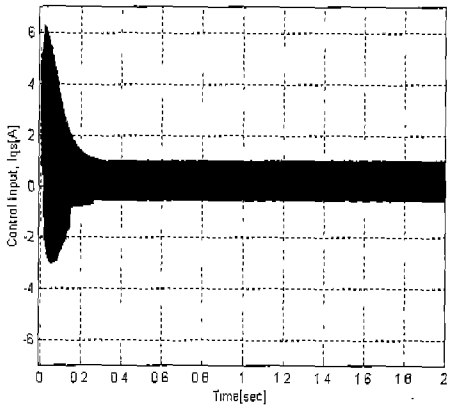
(c) phase-plane

그림 3. 비선형 슬라이딩 면을 가지는 가변구조제어기에 의한 실험 결과

Fig. 3. Experiment results of variable structure controller with a nonlinear switching surface



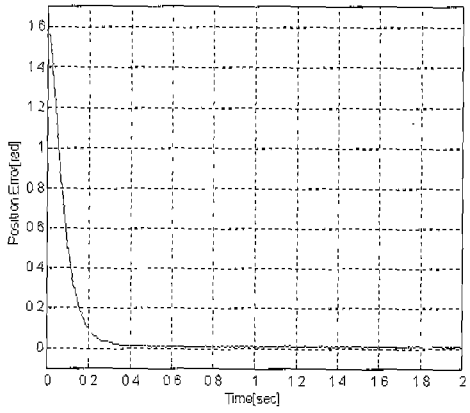
(a) 위치응답



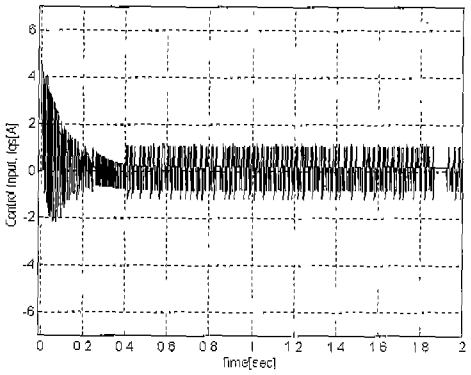
(b) 제어 입력

그림 4. 퍼지가변구조제어기에 의한 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Simulation results
of fuzzy variable structure controller



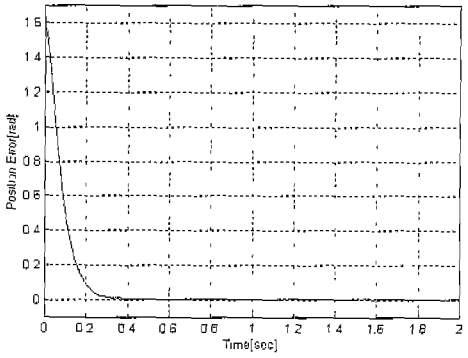
(a) 위치응답



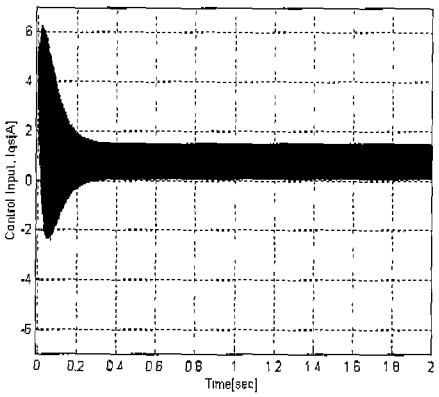
(b) 제어 입력

그림 5. 퍼지가변구조제어게에 의한 실험 결과

Fig. 5. Experiment results
of fuzzy variable structure controller



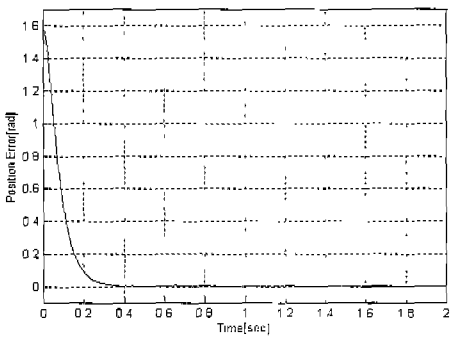
(a) 위치응답



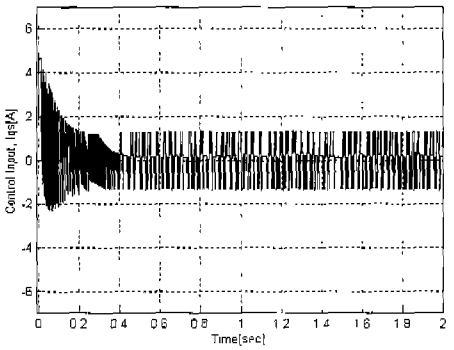
(b) 제어 입력

그림 6. 단일 입력 퍼지가변구조제어기에 의한 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Simulation results
of single input fuzzy variable structure controller



(a) 위치응답



(b) 제어 입력

그림 7. 단일 입력 퍼지가변구조제어기에 의한 실험 결과

Fig. 7. Experiment results of single input fuzzy variable structure controller

3. 결 론

본 논문에서는 지수항을 포함하는 비선형 슬라이딩 면을 도입함으로써 리칭페이스를 제거할 수 있는 견실한 제어기를 설계하였다. 그리고 외란을 포함하는 항의 최적치를 추정하기 위하여 퍼지 이론을 도입하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 채터링이 현저히 감소됨을 확인하였다. 아울러 본 논문에서는 기존의 퍼지가변구조제어에서 입력 변수를 하나로 줄인 단일 입력 퍼지가변구조제어기를 제안하였으며 시뮬레이션 및 실험을 통하여 기존의 2-입력 퍼지가변구조제어기와 유사한 성능을 나타냄을 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] J. J. E. Slotine. and Weiping Li, "Applied Nonlinear Control," Prentice Hall, 1991.

[2] PALM. R., "Robust control by fuzzy soiding mode," Automatica, 30, pp 1429-1437, 1994.

[3] YAGER. R. R. and FILEV. D. P., "Essentials of fuzzy modeling and control," Wiley. Newyork, 1994.

[4] LU. Y. S. and CHEN. J. S., "A self-organizing fuzzy sliding mode controller design for a class of nonlinear servo system," IEEE Trans.,IE-41, pp492-502, 1994.

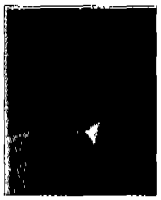
[5] WU. J. C. and LIU. T. S.,"A sliding-mode approach to fuzzy control design", IEEE Trans., CTS-4, pp141-151,1966.

[6] LIU. T. H. and LIN. M. T., "A fuzzy sliding-mode controller design for a synchronous reluctance motor drive", IEEE Trans., AES-32, pp1065-1076, 1996.

[7] Paul. C. Krase, "Analysis of Electric Machinary," MacGraw-Hill, 1986.

[8] Byung-Jae Choi, Seong-Woo Kwak, and Byung-Kook Kim, "Design and Stability Analysis of Single-Input Fuzzy Logic Controller," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. 30, pp. 303-309, 2000.

저 자 소 개



배 준 성 (Joon-Sung Bae)

1999년 : 대구대 정보통신공학부 졸업(학사).

1999년~현재 : 동 대학원 정보통신공학과 석사과정

관심분야 : 퍼지 이론, 제어이론 및 응용, 컴퓨터 응용 제어 시스템, 마이크로프로세서 응용 등.

Phone : 053-850-4406

Fax : 053-850-6619

E-mail : jsb1218@biho.taegu.ac.kr

최 병 재 (Byung-Jae Choi)

1987년 : 경북대학교 졸업(학사).

1989년 : 한국과학기술원 졸업(석사).

1998년 : 한국과학기술원 졸업(박사).

1999년~현재 : 대구대학교 정보통신공학부 교수

관심분야 : 퍼지 논리 제어, 지능 제어, 마이크로프로세서 응용 등

Phone : 053-850-6633

Fax : 053-850-6619

E-mail : bjchoi@biho.taegu.ac.kr

이 대 식 (Dae-Sik Lee)

1982년 : 경북대 전자공학과 졸업(학사).
1984년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사).
1991년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사).
1994년~현재 : 대구대학교 정보통신공학부 부교수
관심분야 : 제어이론 및 응용, 자동화 및 검사 시스템, 컴퓨터 응용 제어 시스템 등.
Phone : 053-850-6624
Fax : 053-850-6619
E-mail : dslee@biho.taegu.ac.kr