

# 단일 입력 퍼지가변구조제어기에 의한 BLDC 모터의 위치제어

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

배준성, 최병재, 이대식  
대구대학교 공과대학 정보통신공학부 TEL. 053)850-6618

### ABSTRACT

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 파라미터 변화나 외란에 둔감한 특성을 갖는다. 하지만 리칭페이스에서는 문제가 된다. 이를 개선하기 위하여 본 논문에서는 지수항을 추가한 비선형 슬라이딩면을 구성한다. 그리고 나서 비선형적 슬라이딩면과 슬라이딩면의 변화율을 입력으로하는 퍼지 제어기를 설계한다. 이러한 2-입력 퍼지가변구조제어기의 제어 규칙표로부터 슬라이딩면 하나만을 입력으로 가지는 단일입력 퍼지 가변구조 제어기를 설계한다. 이들 제어기의 성능을 입증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행한다.

### I. 서론

현재 제어용으로 가장 널리 사용되는 전동기는 직류 전동기이다. 직류 전동기는 기동 토크가 크고 속도제어의 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 브러쉬 없는 직류 전동기는 직류 전동기의 단점을 해결할 수 있으며, 아울러 벡터 제어 방법에 의하여 기존 직류 전동기와 같은 선형화된 모델로 제어가 가능하다.

이러한 브러쉬 없는 직류 전동기의 제어방식으로는 PI제어기가 이용되어 왔으나 높은 성능을 요구하는 서보응용에 적합하지 않다. 이를 해결하는 효과적이고 체계적인 방법중의 하나가 가변구조제어이다.[1] 하지만, 가변구조제어는 불연속적인 제어입력에 의해 채터링이 발생되어 실 시스템에서 원하지 않는 응답을 발생

시키는 단점이 있다.

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

기존의 퍼지가변구조제어에서는 다수의 퍼지 입력변수를 사용함으로써 조정변수가 많이 존재 한다.

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

### II. 본론

#### 2.1 브러쉬 없는 직류 전동기 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( $i_{qc}$ )

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

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

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

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

## 2.2 가변구조제어기

본 논문에서 지수항을 포함하는 식(2)와 같은 슬라이딩면을 설계하였다.

$$\sigma = \sum_{i=1}^n c_i x_i - \sigma(0) e^{-\lambda t} \quad (2)$$

지수항을 포함하는 슬라이딩면은 초기상태에서 부터 슬라이딩면을 추종하는 구조를 가지게 함으로써 응답속도를 빠르게 하고 리칭 페이스를 제거함으로써 외란과 시스템의 상태 변화에 강인한 특성을 가질 수 있다.

식(2)에 대한 제어 입력  $u$ 는 다음과 같다.

$$u(t) = - \left( \sum_{i=1}^n a_i x_i + K_f \right) \text{sgn}(\sigma(t)) + \frac{\lambda}{b} \sigma(0) e^{-\lambda t} \quad (3)$$

슬라이딩 존재 조건이 만족되기 위하여

$$\begin{aligned} \sigma \dot{\sigma} &= \sigma \left[ \sum_{i=1}^n c_i \dot{x}_i + \lambda \sigma(0) e^{-\lambda t} \right] \\ &= \sigma \left[ \dot{x}_n + \sum_{i=2}^n c_{i-1} x_i + \lambda \sigma(0) e^{-\lambda t} \right] \\ &= \sigma \left[ \sum_{i=2}^n (-a_i - b a_i \text{sgn}(\sigma(t)) + c_i) x_i - f - b K_f \text{sgn}(\sigma(t)) + 2\lambda \sigma(0) e^{-\lambda t} \right] < 0 \end{aligned} \quad (4)$$

이 되어야 하고, 여기서  $a$ 와  $K_f$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a < - \max \left| \frac{a_i - c_i}{b} \right|$$

$$K_f < - \max \left| \frac{f - 2\lambda \sigma(0) e^{-\lambda t}}{b} \right| \quad (5)$$

식(5)를 만족하면 Lyapunov 안정성에 의하여 전체 시스템은 안정하다.

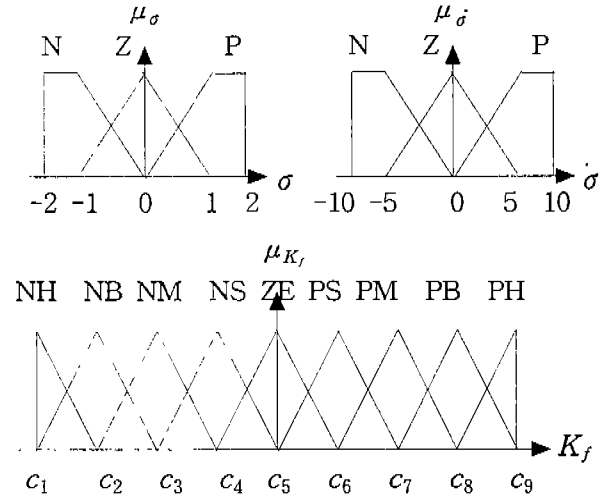
## 2.3 퍼지가변구조제어기

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

본 논문에서는 외란의 최대값을 추정하기 위하여 퍼지추론기법에 의한 퍼지가변구조제어기를 설계한다.

식(3)에서  $K_f$ 를 퍼지 논리에 의하여 추정한다. 퍼지추론에서 사용되어진 퍼지 집합은 다음의 [그림 1]과 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



[그림 1] 퍼지 집합의 소속함수

슬라이딩 모드 만족 조건인  $\sigma \dot{\sigma} < 0$ 를 위하여 불확실성을 포함하는  $K_f$ 를 추정한다.

$K_f$ 를 추정하기 위한 규칙은 다음과 같다.

- R1 : If  $\sigma$  is N and  $\dot{\sigma}$  is N then  $K_f$  is PH
- R2 : If  $\sigma$  is N and  $\dot{\sigma}$  is Z then  $K_f$  is PB
- R3 : If  $\sigma$  is N and  $\dot{\sigma}$  is P then  $K_f$  is PS
- R4 : If  $\sigma$  is Z and  $\dot{\sigma}$  is N then  $K_f$  is PM
- R5 : If  $\sigma$  is Z and  $\dot{\sigma}$  is Z then  $K_f$  is ZE
- R6 : If  $\sigma$  is Z and  $\dot{\sigma}$  is P then  $K_f$  is NM
- R7 : If  $\sigma$  is P and  $\dot{\sigma}$  is N then  $K_f$  is NS
- R8 : If  $\sigma$  is P and  $\dot{\sigma}$  is Z then  $K_f$  is NB

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

위의 퍼지 추론 규칙을 바탕으로 퍼지 규칙 테이블을 작성하면 다음과 같다.

[표 1] 퍼지 규칙 테이블

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

퍼지 출력  $K_f$ 는 식(6)과 같은 무게중심법 (Centre of area : COA)의 비퍼지화 (defuzzification) 방법에 의해 계산하였다.

$$K_f = \frac{\sum_{i=1}^9 w_i c_i}{\sum_{i=1}^9 w_i} = \frac{[c_1 \dots c_9] \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_9 \end{bmatrix}}{\sum_{i=1}^9 w_i} \quad (6)$$

#### 2.4 단일입력 퍼지가변구조제어기

앞장에서 설계한 퍼지가변구조제어기에서는 퍼지입력이 2개로서 조정변수가 여러개 존재한다. 본 논문에서는 조정변수의 과다문제를 해결하기 위해서 단지 하나만의 조정변수를 가지는 퍼지가변구조제어기를 설계하였다.

앞장에서 작성한 규칙 테이블을 보면  $K_f$ 는 다음과 같은  $\sigma$ 와  $\dot{\sigma}$ 에 의한 함수로 표현할 수 있다.

$$K_f = f(\sigma, \dot{\sigma}) \quad (7)$$

[표 1]에서  $K_f$ 는 skew 대칭인 특징을 가지고 있다. 여기서 새로운 슬라이딩 면을 세우면

$$\sigma_i = \sigma + \beta \dot{\sigma} \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다.

다시 말하면  $K_f$ 는 다음과 같은  $\sigma_i$ 의 함수로 표현할 수 있다.

$$K_f = f(\sigma_i) \quad (9)$$

여기서  $\sigma_i$ 만을 퍼지 입력으로 하는 퍼지 추론 규칙을 세우면 다음과 같다.

R1 : If  $\sigma_i$  is N then  $K_f$  is P

R2 : If  $\sigma_i$  is Z then  $K_f$  is N

R3 : If  $\sigma_i$  is P then  $K_f$  is Z

위의 퍼지 추론 규칙을 퍼지 규칙 테이블로 작성하면 다음과 같다.

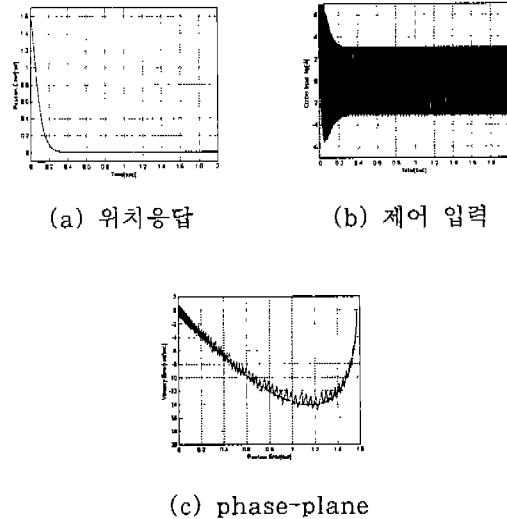
[표 2] 단일입력 퍼지 규칙 테이블

$\sigma_i$	N	Z	P
$K_f$	P	Z	N

#### 2.5 시뮬레이션 및 실험

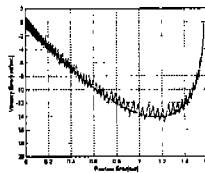
앞에서 설계한 퍼지가변구조제어기와 단일입력 퍼지가변구조제어기를 브러쉬 없는 직류전동기에 대하여 시뮬레이션과 실험을 하였다.

[그림 2]는 가변구조제어에 의한 시뮬레이션 결과이다. (c)의 phase-plane을 보면 리칭 페이스가 없음을 볼 수 있다. [그림 3]은 가변구조제어에서의 실험 결과이다. [그림 2]와 유사함을 볼 수 있다. [그림 4]와 [그림 5]는 각각 퍼지가변구조제어에 의한 시뮬레이션과 실험 결과이다. 가변구조제어에 비해 채터링이 현저히 감소함을 볼 수 있다. [그림 6]과 [그림 7]은 단일입력 퍼지가변구조제어의 시뮬레이션과 실험 결과이다. 퍼지가변구조제어와 거의 유사한 성능을 보임을 알 수 있다.



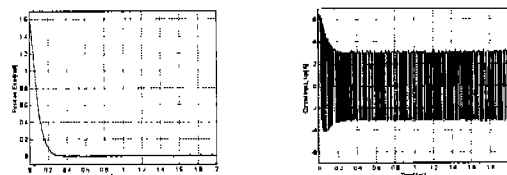
(a) 위치응답

(b) 제어 입력



(c) phase-plane

[그림 2] 가변구조제어 시뮬레이션

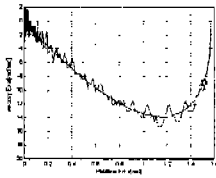


(a) 위치응답

(b) 제어 입력

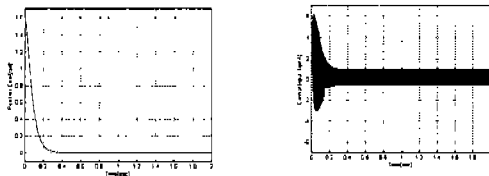
### III. 결론

본 논문에서는 지수항을 포함하는 슬라이딩면을 설계 함으로써 리칭페이스를 제거할 수 있는 견실한 제어기를 설계하였다. 그리고 외란을 포함하는 항의 최적치를 추정하기 위하여 퍼지이론을 도입하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 채터링이 현저히 감소됨을 확인하였다. 아울러 본 논문에서는 기존의 퍼지가변구조제어에서 입력변수를 하나로 줄인 단일입력 퍼지가변구조제어기를 제안하였으며 시뮬레이션 및 실험을 통하여 기존의 2-입력 퍼지가변구조제어기와 유사한 성능을 나타냄을 입증하였다.



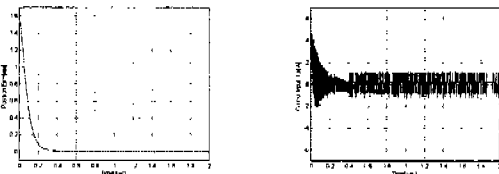
(c) phase-plane

[그림 3] 가변구조제어 실험



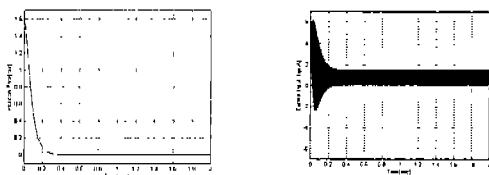
(a) 위치응답 (b) 제어 입력

[그림 4] 퍼지가변구조제어 시뮬레이션



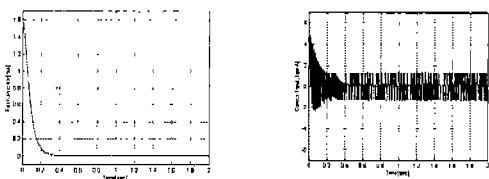
(a) 위치응답 (b) 제어 입력

[그림 5] 퍼지가변구조제어 실험



(a) 위치응답 (b) 제어 입력

[그림 6] 단일입력 퍼지가변구조제어 시뮬레이션



(a) 위치응답 (b) 제어 입력

[그림 7] 단일입력 퍼지가변구조제어 실험

### IV. 참고 문헌

- [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 Machinery," 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.