

BLDCM 의 속도 제어를 위한 퍼지 P+ID 제어기 설계

김영식\*, 이창구\*\*, 김성중\*\*  
 전북대 메카트로닉스 공학과\*, 전북대 전자·정보 공학부\*\*

Design of a Fuzzy P+ID controller for brushless DC motor speed control

Young-Sik Kim\*, Chang-Goo Lee\*, Sung-Joong Kim\*  
 Chonbuk National University\*

**Abstract** - The PID type controller has been widely used in industrial application due to its simply control structure, ease of design, and inexpensive cost. However, control performance of the PID type controller suffers greatly from high uncertainty and nonlinearity of the system, large disturbances and so on. This paper presents a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral derivative controller (Fuzzy P+ID). In comparison with a conventional PID controller, only one additional parameter has to be adjusted to tune the Fuzzy P+ID controller. In this case, the stability of a system remains unchanged after the PID controller is replaced by the Fuzzy P+ID controller without modifying the original controller parameters. Finally, the proposed hybrid Fuzzy P+ID controller is applied to BLDC motor drive. Simulation results demonstrated that the control performance of the proposed controller is better than that of the conventional controller.

1. 서 론

PID 제어기는 단순한 구조가 단순하고 현장 운전자들에게 익숙하다는 등의 장점 때문에 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 그러나 시스템이 좀더 복잡해지거나 심한 비선형성을 갖는 경우 적절한 PID 이득을 결정하는 것은 매우 어려운 일이며 운전 중 시스템 동특성이 변화하면 재동조를 하여야 하는 어려움이 있다[1].

이러한 문제를 해결하기 위하여 제시된 제어기법들은 gain scheduling, adaptive PID기법등이 있으나 이러한 기법들은 다음과 같은 문제점을 안고 있다. 적응 제어기를 PID 제어기 구조로 변형하고 온라인으로 시스템 특성에 따라 PID 이득을 자동 조절하는 적응 PID 제어기와 동작 점에 따라 시스템 특성에 따라 PID 이득을 조절하는 Gain scheduling 기법은 제어기 설계 시 가정한 시스템의 모델차수, 지연시간 등이 실제 플랜트와 다른 경우에는 좋은 성능을 기대할 수 없다[2]. 그래서 최근에는 퍼지 제어기가 많이 설계되고 있다[3][4].

퍼지 제어기는 기존의 제어 기법이 적용되기 어려운 복잡한 시스템이나 비선형 시스템에 다양하게 적용되고 있으며 때때로 기존의 PID 제어기에 비하여 보다 강인하고 매개변수의 변화에 덜 민감한 성능을 보인다. 그러나 퍼지 제어기는 또한 고전적 제어기에 비해 강인한 외란 적응 특성 및 유연한 제어 성능을 가지는 반면, 제어 규칙 선정 및 소속함수와 스케일 계수 등의 결정을 작업자가 해야 하기 때문에 많은 시간이 소모되고 제어규칙 등의 선정이 부적합할 경우 제어기의 성능이 오히려 악화되는 결과를 초래하기도 한다.

본 논문에서 제안한 퍼지 P+ID 제어기는 기존의 PID 제어기의 P 부분을 퍼지 논리제어기로 대체한 구조이다. 따라서 외란에 견실한 퍼지 제어기의 장점과 구조가 간단한 PID 제어기의 장점을 모두 가진다.

제안된 퍼지 P+ID 제어기는 다음과 같은 특징을 갖는다. 단지 하나의 제어파라미터만을 추가하여 기존 PID 제어기를 조절하기 때문에 쉽게 설계 할 수 있으며, PID 제어기의 구조를 유지함으로써 기존 장치의 하드웨어 부분을 수정할 필요가 없다. 그리고 퍼지 P+ID 제어기는 기존 PID 제어기와 비교해서 충분한 안정성을 보여준다[5]. 따라서 제안된 퍼지 P+ID 제어기는 구조가 단순하고 계산량이 적어 제어기의 동조시간을 기존의 퍼지 제어기에 비해서 많이 줄일 수 있다. 마지막으로 제안된 FUZZY P+ID 제어기를 BLDCM (brushless DC motor) 에 적용하였으며 다양한 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제안한 제어기가 기존의 제어기보다 제어성능이 우수함을 보였다. 그림 1은 제안된 퍼지 P+ID 제어기를 적용한 BLDC 전동기 구동 시스템의 블록 다이어그램을 나타내었다.

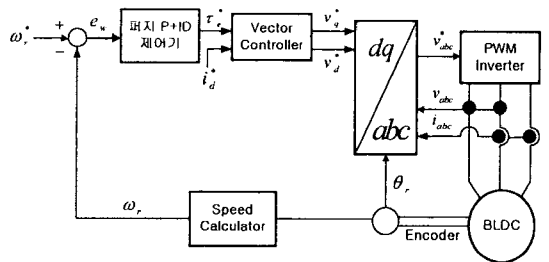


그림 1 BLDC 전동기 구동 시스템  
 Fig. 1 Block diagram of BLDC motor drives

2. BLDCM의 동적 상태 방정식

소용량 (small horsepower) 모터제어에 널리 사용되는 브러쉬 없는 직류전동기는 3상 영구자석 동기전동기와 같은 형태를 가지고 있다. BLDCM의 동적 상태방정식을 고정자 기준 dq 고정 좌표계에서 표현하면 식 (1)과 같다[6][7].

$$\begin{aligned}
 i_{qs} &= -\frac{r_s}{L_q} i_{qs} - \frac{L_d}{L_q} \omega_r i_{ds} + \frac{1}{L_q} V_{qs} - \frac{\lambda_m}{L_q} \omega_r \\
 i_{ds} &= \frac{L_q}{L_d} \omega_r i_{qs} - \frac{r_s}{L_d} i_{ds} + \frac{1}{L_d} V_{ds} \\
 L_q &= L_k + L_{mq}; \quad L_d = L_k + L_{md}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

토크 방정식은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) [ \lambda_m i_{os} + (L_d - L_q) i_{os} i_{ds} ] \quad (2)$$

$$= J \left( \frac{2}{P} \right) \frac{d\omega_r}{dt} + B \frac{2}{P} \omega_r + T_L$$

여기서  $\omega_r$  : 기계적 각속도,  $J$  : 회전자 관성,  
 $T_L$  : 부하 토크,  $P$  : 극수

### 3. 퍼지 P+ID 제어기

#### 3.1 퍼지 P+ID 제어기 구조

PID 제어기는 그림 2와 같은 간단한 구조를 가지고 있다. 제어기 신호는 P, I, D 부분의 조합에 의해서 쉽게 계산할 수 있다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt - K_D \dot{y}(t) \quad (3)$$

여기서  $K_p, K_I, K_D$  는 각각 비례, 적분, 미분이득이다. 식 (3)을 이산화 하여 변형하면 식 (4)처럼 표현된다.

$$\Delta u(t) = u(k) - u(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_I T e(k) - K_D \frac{y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)}{T} \quad (4)$$

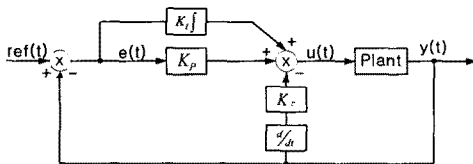


그림 2. PID 제어기 구조  
 Fig. 2 The structure of PID controller

PID 제어기를 많이 사용하는 이유는 세 개의 제어기 매개변수를 조절하여 쉽게 제어기를 설계할 수 있기 때문이다. 그리고 이런 제어기 설계의 이점은 많은 응용을 가능하게 한다. 따라서 우리는 이러한 PID 제어기의 장점을 유지하면서 퍼지 논리 제어기를 설계하여야 한다. 이러한 목적을 가지고 설계한 퍼지 P+ID 제어기가 그림 3에 있다.

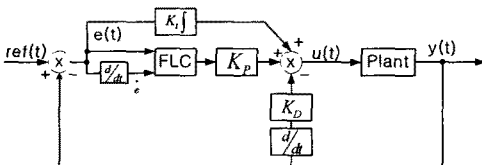


그림 3. 퍼지 P+ID 제어기 구조  
 Fig. 3 The structure of Fuzzy P+ID controller

식 (4)에 퍼지 제어기의 출력  $\Delta u_f(k)$ 를 적용하여 식 (5)를 유도한다(8).

$$\Delta u(t) = u(k) - u(k-1) = K_p \Delta u_f(k) + K_I T e(k) - K_D \frac{y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)}{T} \quad (5)$$

식 (5)는 퍼지 P+ID 제어기의 출력을 나타내는 식이며  $K_p$ 와  $K_D$ 는 기존 PID 제어기와 같으며  $K_p^*$ 는 퍼지 제어기의 비례 이득 값으로 역시  $K_p$ 와 같은 값을 사용하였다. 퍼지 P+ID 제어기에서 퍼지 P 제어기는 시스템 응답의 오버슈트와 상승시간의 개선에 크게 관여하므로 가장 중요하다. 한편, 적분 제어기는 정상상태 오차를 제거하며 미분 제어기는 시스템의 안정도에 관여한다.

퍼지 P+ID 제어기의 P 부분인  $K_p^* \Delta u_f(k)$ 는 그림 3에서 보는 것처럼 기존 PID 제어기의  $K_p \Delta e(k)$  대신에 사용하였다. 개선된 퍼지 제어기는  $e(k)$ 와  $\dot{e}(k)$  두 개의 입력과  $\Delta u_f(k)$  하나의 출력을 갖는다. 퍼지 제어기 출력은 식 (6)과 같다.

$$\Delta u_f = FLC(e(k), \dot{e}(k)) = \Delta u_{f_i}(k) \quad (i=1, \dots, 36) \quad (6)$$

#### 3.2 퍼지 제어기 및 퍼지 P+ID 제어기 설계

BLDC 전동기의 속도제어를 위한 퍼지 제어기의 조건 변수를 위치 명령에 따라 모터속도의 오차(e)와 속도 오차의 시간에 대한 변화량(de)으로 선정하였으며, 속도 오차 변화량은 표본 주기 사이의 속도 오차 변화로 간단히 구하였다.

퍼지 언어 변수 (Fuzzy Linguistic Variable)를 PB (Positive Big), PM (Positive Medium), PS (Positive Small), ZO (Zero), NS (Negative Small), NM (Negative Medium), NB (Negative Big)의 7단계로 선택하였다. 또 그에 대한 소속함수를 그림 4와 같이 각 양자화 값이 있는 이산 함수로 사용하였다. 그리고 본 논문에 적용된 규칙 표는 표 1에 나타났다.

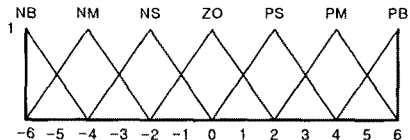


그림 4. 소속 함수  
 Fig. 4 Membership function

표 1. 제어 규칙 표  
 Table. 1 Control rule table

e \ de	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

추론은 MAX-MIN 합성, 비퍼지화는 식 (8)처럼 표현되는 무게중심법 (Center of gravity) 을 사용하여 제어 신호를 계산하였다(9).

$$\Delta u_f(k) = \frac{\sum f_{i,j} \times u_{i,j}}{\sum f_{i,j}} \quad (8)$$

퍼지 제어를 설계한 다음에는 PID 제어기 파라미터를 결정해야 한다. 본 논문에서는 Ziegler and Nichols 방법을 기초로 하여 퍼지 P+ID 제어기를 설계하였다. 시스템의 미분과 적분 부분을 고정시키고 비례 부분의 이득을 시스템 응답이 임계진동 할 때까지 증가시켜서 임계진동이 되는 순간의 비례이득 ( $K_{RCRIT}$ ) 과 샘플링 구간 ( $T_{(CRIT)}$ )을 구하고, 식 (9) 에 의해서 PID 제어기 파라미터를 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_P &= 0.6 K_{RCRIT} \\ K_I &= \frac{2.0 K_P}{T_{(CRIT)}} \\ K_D &= (T+2) K_P + K_I T^2 \end{aligned} \quad (9)$$

#### 4. 시뮬레이션 결과

앞 절에서 제시한 퍼지 P+ID 제어기의 성능을 평가 하기 위해서 Matlab/Simulink상에서 BLDC 전동기의 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위하여 표 2에서 제시한 상수 값을 가지는 BLDC 전동기의 모델을 사용하였다.

표 2. BLDC 전동기 파라미터

Table. 2 Parameters of brushless DC motor

관성모멘트 (J)	0.35e-4	kg·m <sup>2</sup>
고정자 인덕턴스 (L)	10.9	mH
고정자 저항 (R)	4	Ω
극수 (P)	4	Nm/A
토크정수 ( $K_T$ )	0.53	Nm/A

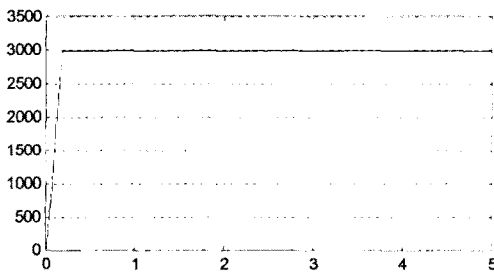


그림 5. 속도 응답 3000 [rpm]

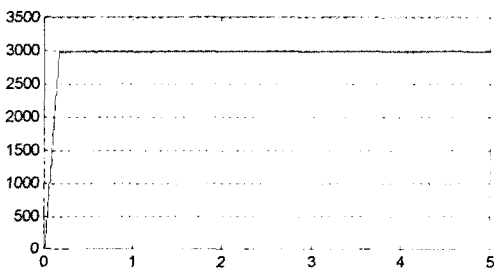


그림 6. 전동기의 파라미터 변화 시 속도응답

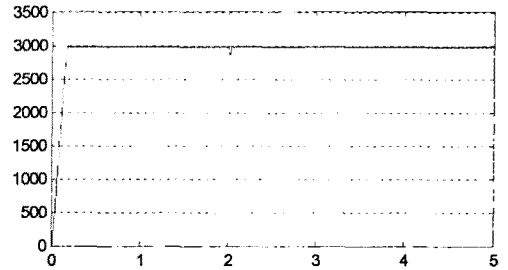


그림 7. 부하토크 인가 시 속도응답

그림 5는 제시된 제어기의 속도응답 파형이다. 기준 속도는 3000 [rpm]이며 명령 속도를 잘 추종함을 보여 준다. 그림 6은 전동기의 파라미터를 변화( $J=0.00004$  kgm<sup>2</sup>,  $R=6\Omega$ )했을 때의 속도응답 파형이다. 제시된 제어기가 파라미터 변화에 강인함을 그림을 통해 확인할 수 있다. 그림 7은 부하토크를 2 [sec] 간 갑자기 인가 하였을 때의 속도응답 파형이다. 빠른 시간 내에 명령속도를 회복함을 그림을 통해서 알 수 있다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 퍼지 P+ID 제어기를 이용하여 BLDC 전동기의 속도 제어를 수행하였다. 제안된 제어기는 단지 하나의 파라미터만 추가되었기 때문에 기존 PID 제어기의 하드웨어적인 부분을 수정하지 않고도 사용할 수 있다. 따라서 PID 제어기에 사용하는 초기 동조 기법을 동일하게 사용할 수 있고, 기본 구조가 단순하여 제시된 퍼지 P+ID 제어기는 제어 대상의 모델을 필요로 하지 않으며 파라미터의 변화에 강인하고, 연산이 단순한 장점이 있다. 시뮬레이션을 통하여 제시된 제어기를 이용한 시스템의 성능이 우수함을 보였으며, 또한, 전동기 파라미터와 부하의 변화에도 강인함을 보였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Derek P. Atherton, "PID Controller Tuning", Computing and Control Engineering Journal, vol.10, pp. 44-50, 1999.
- [2] K.J. Astrom, B. Wittenmark, "Adaptive Control", Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1995.
- [3] W. Li and X. G. Chang, "Application of hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller to combustion control of stoker-boilers", Fuzzy Sets Syst., to be published.
- [4] T. Brehm and K. Ratten, "Hybrid fuzzy logic PID controller", in Proc. 3rd IEEE Conf. Fuzzy Syst., Orlando, FL, pp. 1682-1687, June 1994.
- [5] Li-Xin Wang, Adaptive fuzzy systems and control : Design and Stability Analysis, Prentice Hall, 1994.
- [6] T. Kenjo and S.Nagarmori, "Permnet magnet and Brushless DC motors", pp. 96, 1984.
- [7] Huy, H., "An Adaptive Fuzzy Controller For Permanent Magnet A.C. Servo Drives", Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference, IEEE N.Y. 1995.
- [8] D. Misir, H.A. Malki, G. Chen, "Design and analysis of fuzzy proportional-integral-derivative controller, Fuzzy Sets and Systems, vol. 79, pp 297-314, 1994.
- [9] H. Ying, W. Siler, and J. J. Buckley, "Fuzzy control theory: A nonlinear case", Automatica, vol. 26, pp. 513-520, 1990.