

비선형 시스템을 고려한 퍼지-PID 제어기 설계

윤 광호* 김상훈 김낙교 남문현
건국대학교 전기공학과

Fuzzy-PID Controller Design Considering Nonlinear System

Kwang-Ho Youn*, Sang-Hoon Kim, Lark-kyo Kim, Moon-hyun Nam
Department Of Electrical Engineering Konkuk University

Abstract - A conventional PID controller does not provide a proper response in face of various kinds of load variation. In this paper, Fuzzy-PID Control scheme are proposed in order to improve the performance of the PID Controller. The proposed control schemes are applied to the speed controller of AC servo motor systems. The effectiveness of the proposed methods is shown by implementation and the advantage of each control scheme is discussed.

1. 서 론

교류 서보전동기 속도제어에는 일반적으로 비례제어기(P Controller)나 비례-적분 제어기(PI Controller) 또는 비례-적분-미분 제어기(PID Controller)를 사용하였으며 그 중 PID 제어기는 제어의 간편성 및 안정성으로 인하여 현재 가장 많이 쓰이는 제어기 중 하나이다. 그러나 PID 제어기는 원하는 출력을 얻기 위해서 시스템의 매개 변수를 정확히 산출해내야 하며 또한 부하의 변동이 빈번히 발생하는 경우에는 그 때마다 PID 제어기의 매개변수들을 다시 조정해야하는 어려움이 발생한다[1].

또한 최적의 성능을 얻을 수 있는 PID 제어기의 매개변수를 결정하는 방법은 1942년 Zigler - Nicholes에 의해 Zigler - Nicholes 동조법이 제안된 후 Astrom과 Hagglund에 의해 릴레이 실험에 의한 동조법 등 현재까지도 PID 제어기의 매개변수 동조에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다[2][3][4][5].

최근 들어 이와 같은 기존의 제어방식의 문제점을 해결하기 위해서 많은 연구자들은 시스템의 비선형성에 대응할 수 지능형 제어기법을 연구, 개발하였으며 그 대표적인 경우가 수학적 모델이 필요 없고 언어적 제어가 가능하며 전문가의 지식을 활용할 수 있는 퍼지제어(Fuzzy Control)이다.

본 논문에서는 현재 산업현장에서 가장 많이 사용하고 있는 PID 제어기의 매개변수를 자동으로 조정하기 위하여 기존의 Zigler - Nicholes 동조법 보다 수학적 계산량이 적고, 처리가 빠른 퍼지 제어기법을 이용해 PID 제어기의 매개변수를 자동으로 조정할 수 있는 퍼

지-PID 제어기를 설계하였다.

본 논문에서 설계한 퍼지-PID 제어기의 기본적인 형태는 PID 제어를 유지하면서 시스템의 특성이 변하여 PID 제어기의 매개변수를 다시 조정해야 할 경우에는 퍼지 동조기법을 사용하여 각각의 매개변수를 자동으로 조정할 수 있도록 하였으며 On-Line상태에서 매개변수의 동조가 이루어지도록 하였다[7][8][9].

본 제어기의 성능을 평가하기 위해서 설계된 제어기를 교류 서보 전동기의 속도제어에 적용하였으며 PID 제어기 및 퍼지제어기와 부하 계단응답에 대한 비교실험을 통해 제어기의 기본성능을 입증하였다[6]. 또한 정역 운전, 가변속 운전에 적용하여 시스템의 운전점이 달라지는 경우에도 자동으로 매개변수를 조정하여 기존의 PID 제어기 및 퍼지 제어기에 비해 안정성 및 속응성에서 우수한 성능을 나타낸다는 것을 입증하였다.

2. 퍼지-PID 제어기

2.1 시스템 구성도

본 논문에서 사용된 퍼지-PID 제어기를 이용한 교류서보전동기 속도제어 시스템은 그림 2.1 과 같이 크게 네 부분으로 구성되어 있다.

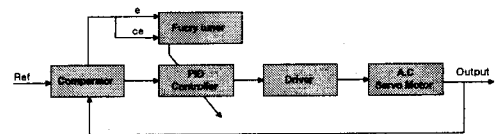


그림 2.1 교류 서보 전동기 속도제어 시스템
Fig 2.1 Speed Control System Of AC Servo Motor

2.2 퍼지-PID 제어기의 구조

본 논문에서 사용된 퍼지-PID 제어기의 구조는 기본적인 제어의 형태는 PID 제어기이며, Zigler-Nichols(Z-N) 동조법을 사용하여 초기 파라미터 값을 설정하고, 플랜트의 출력상태에 따라 제어기의 파라미터를 퍼지 동조기를 사용하여 각각의 매개변수를 동조하게 된다. 본 논문에서 사용한 각각의 매개변수(K_p, K_I, K_D) 동조 방법은 식 2.2와 같으며 퍼지 동조기의 구조는 그림 2.2와 같다.

$$K_p(kT) = K_p(kT-1) + \Delta K_p(kT)$$

$$K_i(kT) = K_i(kT-1) + \Delta K_i(kT)$$

$$K_D(kT) = K_D(kT-1) + \Delta K_D(kT) \quad (2.1)$$

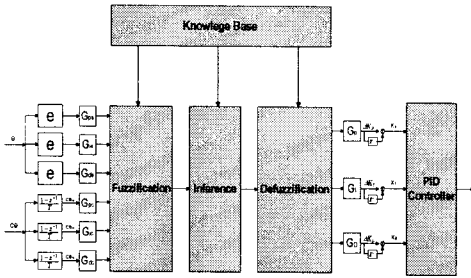


그림 2.2 퍼지-PID 제어기의 구조

Fig 2.2 Structure of fuzzy-PID controller

2.1.1 퍼지화부

본 논문에서 사용된 퍼지-PID 제어기는 입력신호로서 비교기에서 계산되어진 오차 E 및 오차 변화율 ΔE 를 사용한다. 이 두 가지 입력신호를 정성화 된 퍼지로 계산하기 위하여 소속함수와 양자화방법을 사용하여 퍼지화 과정을 수행하였다.

2.2.2 퍼지규칙

본 논문에서는 퍼지 규칙의 형태를 조건부는 혼합명제 결론부는 단일명제로 하였으며 그 일반식은 다음과 같다.

$$R_i : IF E \text{ is } A_i \text{ and } \Delta E \text{ is } B_i$$

$$THEN z \text{ is } C_i \text{ for } i=1,2,\dots,n$$

여기서 E 는 오차이고 ΔE 는 오차변화율이며 z 는 제어입력이다.

또한 A_i, B_i, C_i 는 각각의 변수에 대한 정량적 언어값이다. PID 제어기의 매개변수를 동조하기 위해서는 각 매개변수의 특성에 따라 적용되는 퍼지 규칙을 설계해야 한다. 따라서 비례이득은 PID 제어기의 매개변수특성, 즉 비례이득 (K_p)가 증가하면 오버슈트가 증가하고 상승시간이 빠르게 되며, 적분이득 (K_i)가 증가하면 상승시간이 감소되는 특성을 이용하여 퍼지 규칙을 정의하여 표 2.2, 표 2.3 그리고 표 2.4 에 나타내었다.

표 2.2 K_p 의 규칙

Table 2.2 Rule of K_p

ce \ e	-N	-N+1	-N+2	0	N-2	N-1	N
-N		-N			-N+1		0
-N+1				-N+1	-N+1	-N+2	0
-N+2			-N+1	NS	0		
0			-N+2	0	N-2		
N-2			0	N-2	N-1		
N-1	0	N-2					
N	0				N		

표 2.3 K_i 의 규칙

Table 2.3 Rule of K_i

ce \ e	-N	-N+1	-N+2	0	N-2	N-1	N
-N				-N			
-N+1				-N+1			
-N+2				-N+2			
0				0			
N-2				N-2			
N-1				N-1			
N				N			

표 2.4 K_D 의 규칙

Table 2.4 Rule of K_D

ce \ e	-N	-N+1	-N+2	0	N-2	N-1	N
-N							
-N+1							
-N+2							
0	N	N-1	N-2	0	-N+2	-N+1	-N
N-2							
N-1							
N							

2.2.3 추론 및 비퍼지화.

본 논문에서 추론법은 Mamdani의 Min-Max법을 기반으로 한 연산을 수행하였으며 추론된 퍼지값을 실제 입력으로 사용하기 위하여 비퍼지화를 수행하게 된다. 본 논문에서는 비퍼지화 방법으로 일반적으로 가장 우수한 성능을 보이는 무게중심법을 사용하였다.

3 실험 및 결과고찰

본 논문에서는 부하 외란과 같은 시스템의 비선형에도 강인한 제어기의 설계를 위해 현재 산업현장에서 광범위하게 사용되고 있는 교류 서보 전동기의 속도제어에 퍼지-PID 제어기를 적용하였다. 이를 위해 제작된 디지털 서보 시스템을 가지고 퍼지-PID 제어기 제어기의 추종성과 안정성 등의 제어성능 평가를 위해 동일 조건하에서 계단응답, 정역운전의 부하실험을 수행하여 PID 제어기 및 퍼지 제어기와 비교 실험하였다.

3.1 실험장치

실험에 사용된 시스템은 PC (Pentium-III 450)을 이용하여 그림 3.1 과 같이 구성되었다. DSP보드는 모터로부터 엔코더의 펄스를 세고, 서보팩으로 PC에서 계산되어진 제어 입력을 전달해 주며, 그 외에 PC와 서보팩 간의 인터페이스를 제공한다.

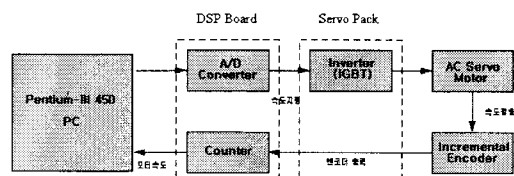


그림 3.1 실험장치 구성도

Fig 3.1 Experimental System Configuration

3.1 실험방법 및 절차

본 논문은 부하 외란 등에 의해 시스템의 비선형성이 증가하는 경우 및 운전점이 변화하는 경우에 대해 PID 제어기의 매개변수를 On-Line 상태에서 동조할 수 있는 퍼지-PID 제어기의 설계에 있다. 따라서 본 논문에서는 설계된 퍼지-PID 제어기를 이용하여 교류 서보 전동기의 속도제어에 적용시켜 제어기로서의 성능을 입증하며 또한 부하 외란 및 시스템의 운전점이 달라지는 경우에도 기존의 PID 제어기에 비해 강건한 특성을 입증하기 위하여 부하 계단응답, 정역운전 실험을 수행하여 이들 제어기와 비교실험을 하였다.

3.2 부하실험

(1) 계단입력 실험

그림 3.2 ~ 3.3은 교류 서보 전동기의 축에 1(kg)의 무게를 갖는 부하를 전동기의 회전방향과 직각으로 설치하여 계단입력에 대한 출력응답을 PID 제어기, 퍼지-PID 제어기와 비교실험 한 것이며 실험결과는 표 3.1과 같다.

표 3.1 실험결과

Table 3.1 Experimental result

	오버슈트(%)	정착시간(sec)	매개변수		
			K_p	T_i	T_d
PID 제어기	9.85		0.0037	0.001	0.0019
퍼지-PID 제어기	6.67	0.027	0.15	0.054	0.092

표 3.1에서의 결과와 같이 부하 계단입력 시에 출력응답은 퍼지-PID 제어기가 PID 제어기에 비해 약 3(%)정도의 오차감소를 나타내었으며 또한 정착시간에서는 PID 제어기는 목표값에 도달하지 못하고 일정한 오차를 유지하는데 비해 퍼지-PID 제어기는 약 0.27초로 퍼지 제어기에 비해 약 0.12초 늦게 나타났다.

매개변수 K_p , T_i 그리고 T_d 는 각각 0.15, 0.054, 0.092 로 동조하는 특성을 가진다.

(1) 계단입력시의 PID 제어기의 출력응답

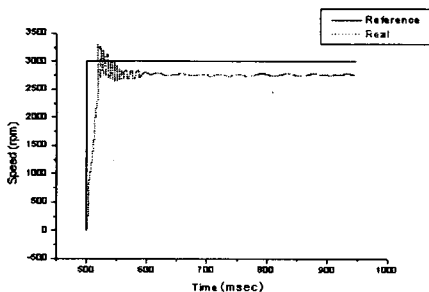


그림 3.2 PID 제어기 응답

Fig 3.2 Response Of PID Controller

(3) 계단입력시의 퍼지-PID 제어기의 출력응답

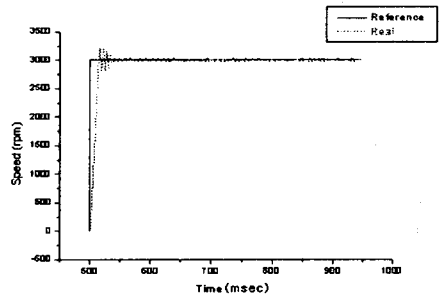


그림 3.3 퍼지-PID 제어기 응답

Fig 3.3 Response of Fuzzy-PID controller

(2) 정역운전 실험

그림 3.4 ~ 3.5는 교류 서보 전동기의 부하설치시 정역운전에 대한 출력응답을 PID 제어기, 퍼지-PID 제어기와 비교실험 한 것이며 실험결과는 표 3.2과 같다.

표 3.2 실험결과

Table 3.2 Experimental result

	가중입력과의 오차(%)				매개변수		
	1 st		2 nd		K_p	T_i	T_d
	정회전	역회전	정회전	역회전			
PID 제어기	16.7	14.9	13.4	13.2	0.0037	0.001	0.0019
퍼지-PID 제어기	4.78	4.10	2.55	2.34	0.19~0.12	0.068~0.045	0.13~0.083

표 3.2 에서의 결과와 같이 부하 정역운전시에 출력응답은 첫 번째 정역운전에서는 퍼지-PID 제어기가 PID 제어기에 비해 약 11.92(%)정도의 오차가 감소되었으며 두 번째 정역운전에서는 퍼지-PID 제어기가 PID 제어기에 비해 약 10.85(%)정도의 오차감소를 나타내었다. 매개변수 K_p 는 약 0.19~0.12사이로 동조하고, T_d 는 0.068 와 0.045 사이로 동조하고, T_i 도 0.13~0.083 사이로 동조하는 특성을 보였다

(1) 정역운전시의 PID 제어기의 출력응답

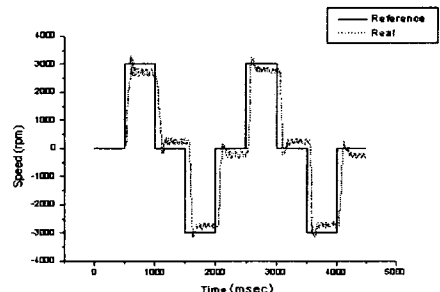


그림 3.4 PID 제어기 응답

Fig 3.4 Response Of PID Controller

(3) 정역운전시의 퍼지-PID제어기의 출력응답

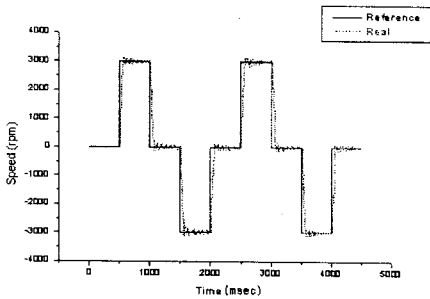


그림 3.5 퍼지-PID 제어기 응답

Fig 3.5 Response Of Fuzzy-PID Controller

4. 결 론

본 논문은 부하 외란 등에 의해 시스템의 비선형성이 증가하는 경우 및 운전점이 변화하는 경우에도 우수한 동작 특성을 나타내도록 PID 제어기의 매개변수를 자동 동조 할 수 있는 퍼지-PID 제어기의 설계에 있다.

따라서 본 논문에서는 설계된 퍼지-PID 제어기를 이용하여 교류 서보 전동기의 속도제어에 적용시켜 제어기로서의 성능을 입증하며 또한 부하 외란 및 시스템의 운전점이 달라지는 경우에도 기존의 PID 제어기에 비해 강건한 특성을 입증하기 위하여 부하 계단응답, 정역운전 실험을 수행하여 이 제어기와 비교실험을 하였다.

본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

교류서보 전동기의 축에 관성부하를 전동기의 회전방향과 직각으로 설치하면, 부하 인가후 정상상태로의 복귀시간도 PID 제어기가 기준입력에 도달하지 못하고 일정오차를 유지하는데 비해 퍼지-PID제어기는 0.27초에 정상상태로 복귀되었다.

따라서 퍼지-PID 제어기가 부하외란과 같은 비선형성에 대해 빠른 보상능력을 가진다고 할 수 있다.

위의 결과로 매개변수가 고정되어 있는 PID 제어기에 비해 PID 파라미터를 동조하는 퍼지-PID 제어기가 추종성 및 안정성면에서 이 제어기에 비해 성능이 우수하다는 것이 입증되었다.

향후의 연구과제로는, 플랜트에 대한 정확한 사전 지식 없이도 검출주기 및 제어 규칙을 자동적으로 수정할 수 있도록 자기구성제어기(SOC) 및 자동이득동조에 대한 연구가 필요하다.

(참 고 문 헌)

[1] HANG, C.C., and SOON,S.H., "A new PID auto-tuning design based on correlation technique". Proc. 2nd Multinational Instrumentation Conf., China, 1986

[2] HANG, C.C., and Astrom K.J., "Refinements of the Ziegler Nichols tuning formula for PID auto-tunings" Proc. ISA Conf., USA

[3] Spyros Tzafestas, "Incremental Fuzzy Expert PID Control", IEEE Trans. on Industrial Electronic, Vol.37, No.5, Oct 1990.

[4] Wang Fuli and et. all, "A PID-like controller for nonlinear systems", Proc. of the ACC, pp. 1558-1562, 1997

[5] K.J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of PID controllers" ISA, NC, 1995

[6] K. T. Chang, T. S. Low, and T. H. Lee, "An Optimal Controller for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 41, no. 5, pp. 503-510, 1994

[7] J. J. Osterggard, "Fuzzy logic control of a head exchange process", pp.285-320, Hew York : North Holland, 1977

[8] S. Shihuang, "Fuzzy self-organizing controller and its application for dynamic processes", Fuzzy sets and System, pp.151-164, 1988.

[9] L. X. Wang, "Adaptive fuzzy system and control.", Prentice-Hall, 1994