퍼지를 이용한 서보드라이버의 제어 게인 자동 조정

공영배*, 서호준*, 박귀태*, 오상록**
*고려대학교 전기공학과, **한국과학기술연구원

Fuzzy Based Control Gain Auto-Tuning of Servo Driver

Young-Bae Kong*, Ho-Joon Seo*, Gwi-Tae Park*, Sang-Rok Oh**
*Korea Univ., **KIST

Abstract - Generally, PI control is simple and easy to implement and gains of PI control are determined by specifying a dynamics of the servo driver system. However, the gain-tuning is so difficult that it is relied on an expert's effort.

This paper presents a gain auto-tuning method for PI controllers based on a fuzzy inference mechanism.

First, the proposed fuzzy inference system identifies a system moment of inertia and adjusts control gains by using the difference in speed responses between a real plant and a reference model.

Second, this paper proposes an improved fuzzy PI controller. To reduce the speed overshoot, we adapt a control method that selects a proper PI gains with respect to the load inertia variation.

To prove the validity of the proposed gain tuning algorithm and the feasibility of the servo drive, a high performance servo drive will be implemented by DSP(TMS320C31) and intelligent power module (IPM).

The proposed controller is applied to the speed control of the 300W AC servo motor.

Some simulations and experimental results show that the proposed fuzzy PI controller is more robust than the conventional PI controller against the load inertia variation.

1. 서 론

전력전자 및 메카트로닉스분야의 기술 발전과 더불어 서보드라이버 시스템은 정밀제어 및 다양한 분야에 폭넓게 적용되고있다. 하지만 산업 현장에서 이용되는 서보 드라이버 시스템은 적용 대상에 따라 관성 모멘트등 기계계의 부하특성이 달라지기 때문에, 이에 적합한 서보 드라이버 시스템의 게인 조정이 이루어져야 된다. 조정은 숙련자라도 상당한 시간이 걸리고 전용의 조정장비가 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 드라이버 자체에 제어게인을 자동으로 조정해 주는 자동조정 (Auto-Tuning) 기능이 요구된다.[1]

일반적으로 서보드라이버의 제어계통을 동역학적으로 기술하기 위해서는 정확한 기계적 모델이 필요하고 정밀한 속도 및 위치 제어 특성을 얻기 위해서는 정확한 계통의 파라미터를 설정하는 것이 반드시 필요하다. 그리고 실제 적용례에 있어서 MRAS 또는 STR을 이용한 적응제어 방식의 연구가 가장 일반적인 방법으로 제시되고 있다[2][3]. 또 다른 예는 시스템의 파라미터 변화를 관측기로 구하는 강인 제어기인데, 이때, 시스템 파라미터(부하토크 및 마찰, 관성오차)를 추정하여 제어의 정확성을 향상시키기 위해서 관측기를 사용하여 파라미터의 추정이 연구되고 있다.[4]

본 연구에서는 서보 드라이버의 속도 응답에 있어서 실제 플랜트와 수학적 추정 모델 사이의 차이를 퍼지 추론 방식에 적용하여 관성 모멘트와 제어 게인을 조정하는 제어기법을 제시하고, 시스템 동특성 정보가 불확실한 서보드라이버 시스템에 적용 실험함으로서 제안하는 제어기법이 얼마나 효과적인지 보여준다.

2. 본 론

2.1 기계계 모델링 및 속도 제어기

서보드라이버의 제어계통을 동역학적으로 기술하기 위해서는 정확한 기계적 모델이 필요하고 정밀한 속도 및 위치 제어 특성을 얻기 위하여 정확한 계통의 기계계의 파라미터를 알아야 한다.

$$T = J\frac{d\omega}{dt} + B\omega_m + T_L \qquad (2.1)$$

위식은 기계적인 시스템 모델을 나타낸다. 여기서 T는 입력 토크, J는 관성 모멘트이고, B는 마찰계수, T_L 은 부하 토크를 의미한다. 그림 2.2의 블록도는 PI제어를 이용한 속도제어기를 보여준다.

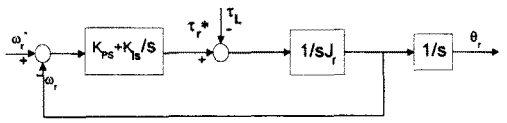


그림 2.1 PI 속도 제어기

위의 그림에서 보면 속도 루프 제어 시스템이 2차의 시스템으로 구성되고 시스템의 전달 함수를 구해보면 다음식(2.2)과 같이 표현된다. 여기서 K_{ps} , K_{is} 는 제어 게인이며, J_m 은 관성(inertia)이다.

$$G_s(S) = \frac{\omega_r(S)}{\omega_r^*(S)} = \frac{K_{ps}\cdot S + K_{is}}{J_m\cdot S^2 + K_{ps}\cdot S + K_{is}} \qquad (2.2)$$

2.2 퍼지를 이용한 부하관성 추정 및 게인조정

그림2.2는 본 논문에서 제안하는 제어 시스템의 블럭도이다. 여기에서는 전통적인 비례-적분(PI) 속도 제어기가 사용되었다. 제어 계통은 두개의 폐루프로 구성되며, 하나는 PI 속도제어기를 갖는 실제 플랜트 시스템이고 다른 하나는 제어 대상과 동일한 구조의 추정 모델 시스템이다. 또한 두 개의 퍼지 제어기가 사용되는데, 첫번째

것은 과도 상태에서 오버슈트를 저감하기 위한 퍼지 제어기가 사용된다.

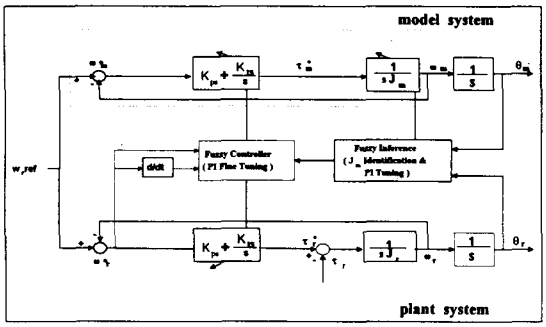
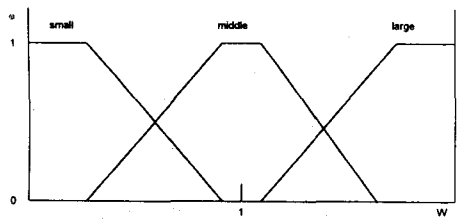


그림2.2 제안된 게인 자동 조정 시스템의 블록도

그림에서 θ , ω , τ^* , τ_f그리고 J는 각각 모터의 위치, 속도, 출력 토크, 부하 외란 토크, 그리고, 계통의 관성 모멘트를 나타내고 *표시는 각각의 변수에서 제어 명령을 나타내며. 첨자 m과 r은 모델과 플랜트 계통을 구분하여 나타낸다. 시스템에서 여러 파라미터에 대한 조정이 요구되지만 그 중에서 가장 영향이 큰 관성계의 변화에 대응한 게인조정을 위하여 모터 및 부하관성의 가속특성을 이용해서 기계계의 시정수를 구하여 관성을 구하는 방법으로 제안된 제어기에서는 각각 시스템의 속도 응답 출력을 비교함으로서, 모델 계통에서의 관성 J_m과 두 개의 플랜트와 모델시스템의 속도 제어기에서의 PI 게인 K_{PS} , K_{IS}는 퍼지 추론에 의해 조정되어진다. 실제 J_m은 서보 모터만의 관성이고 J_r은 부하관성이 포함되어 J_r이 J_m보다 크면 모델의 속도 응답은 플랜트보다 빨라진다. 이런 관계를 이용하여 퍼지 추론에 사용될 속도응답 차를 식(2.3)과 같이 실제 플랜트의 속도 ω_r에 대한 모델 속도 ω_m의 적분비 δW로 나타낸다.

$$\delta W = \frac{\int \omega_m \, dt}{\int \omega_r \, dt} = \frac{\theta_m}{\theta_r} \qquad (2.3)$$

소속함수는 입력 변수 δW에 대해 그림2와 같은 형태를 가지도록 정규화 하였고, 비퍼지화 방법으로는 무게중심법을 적용하여 추론 출력 δJ는 식(2.4)와 구할 수 있다.



< 그림2.3 Fuzzy rules >

$$\delta J = \frac{z_1 * \omega_{small} + z_2 * \omega_{middle} + z_3 * \omega_{large}}{\omega_{small} + \omega_{middle} + \omega_{large}} \qquad (2.4)$$

일단 δJ가 얻어지면, 모델 시스템의 관성 모멘트 J_m은 δJ 에 따라 다음식(2.5)과 같이 결정된다. 여기서 P는 Scale Factor 이다

$$J_m(i+1) = J_m(i) + P * \delta J \qquad (2.5)$$

속도 Loop 제어 시스템이 2차 시스템으로 구성되고 시스템의 전달함수 식(2.6)와 같이 표현된다. 그리고 이상적인 2차 시스템의 특성 방정식을 시스템의 감쇠비 ζ와 감쇠 고유 주파수 ω_n 으로 표현하면 식(2.7)과 같다. 따라서 속도 Loop의 제어 게인 K_{PS}, K_{IS} 는 식(2.8)과 같이 조정된다.

$$G_s(S) = \frac{W_r(s)}{Wr^*(S)} = \frac{K_{ps} \cdot S + K_{is}}{J_m \cdot S^2 + K_{ps} \cdot S + K_{is}} \qquad (2.6)$$

$$G_s(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n \cdot S + \omega_n^2} \qquad (2.7)$$

$$K_{PS} = 2\zeta\omega_n J_m \quad , \quad K_{IS} = \omega_n^2 J_m \qquad (2.8)$$

2.3 퍼지를 이용한 PI제어기의 게인 미세 조정

앞에서 부하관성 모멘트의 추정량에 따라 적합한 PI제어기의 제어게인을 설정하면 여기에서는 속도 오버슈트를 감소시킬 수 있는 퍼지 PI제어기를 제안한다

퍼지 입력 변수 설정에서 속도 오차 e(k) , 속도오차의 변화량 ce(k)로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$e(k) = W_r^*(k) - W_r(k)$$
$$ce(k) = e(k-1) - e(k) = W_r(k) - W_r(k-1)$$

$W_r^*(k)$: k번 째 샘플링 속도 지령치

$W_r(k)$: k번 째 샘플링된 실제 속도

이 규칙은 시스템의 과도상태 동안에 응답특성을 향상시키도록 게인의 미소 변화량을 결정하도록 과도상태 각 구간별 입력변화량에 대한 요구조건은 다음과 같으며 이에 따른 퍼지 제어 규칙은 표2.1과 같이 된다.

		CHANGE OF ERROR							
		NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
E	NB	PZ	PB	PM	PS	PS	PM	PB	PB
	NM	NS	NZ	PM	PS	PS	PS	PM	PB
R	NS	NM	NS	NZ	PS	PS	PS	PS	PM
	NZ	NM	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PM
R	PZ	PS	PS	PS	PZ	PZ	NS	NM	NM
	PS	PM	PS	PS	PS	PS	NZ	NS	NM
O	PM	PB	PM	PS	PS	PS	PS	PZ	NS
R	PB	PB	PB	PM	PS	PS	PM	PB	NZ

표 2.1 퍼지제어 규칙

비퍼지화 방법으로 무게중심법을 사용하고, 실시간 처리를 위하여 모든 가능한 입력조건에 대하여 퍼지 추론 결과를 look-up table로 만들어서 적용하며, PI제어기의 과도 상태구간에서의 응답특성을 고려하여 다음과 같이 앞식(2.8)에서 관성 J_m을 반영하여 구한 K_{ps}와 K_{is}에 대한 게인의 미세 조정을 다음과 같이 하게 된다.

$$K_p(k) = K_{ps} + f[E(k), CE(k)] \cdot k_1 = K_{ps} + k_1 \cdot \Delta K_{p(k)}$$

$$K_i(k) = K_{is} + f[E(k), CE(k)] \cdot k_2 = K_{is} + k_2 \cdot \Delta K_{i(k)}$$

여기서 $f[E(k), CE(k)]$ 는 look up table의 출력값이며 k_1, k_2는 비례 및 적분이득 변화강도를 조절하는 scale factor이다.

2.4 실험결과 및 검토

그림 5.1은 본 연구에서 사용한 하드웨어의 전체적인 구성이다. 제어용 프로세서는 실시간 제어에 적합한 DSP(TMS320C31)를 이용하였다. 실험은 3종류의 디스크형 부하관성을 모터에 직접 연결하여 부하 실험을 하였고, 속도 지령은 200rpm-->1000rpm으로 주기적으로 실행하였다.

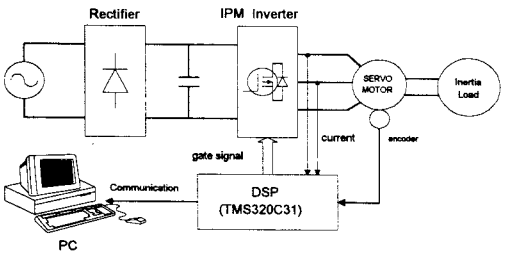


그림2.4 실험 시스템의 구성

모터	Trapezoidal 형 3상 BLDCM
정격	300 W, 0.95 Nm, 3000 RPM
극수,입력전압	6극, 100V
저항,인덕턴스	1.5Ω, 3.15mH
토크 상수	0.29 Nm/A
모터관성(JM)	0.82614 kg ㎠
부하관성(JL1)	1.7 kg㎠
부하관성(JL2)	5.78 kg㎠
부하관성(JL3)	8.3 kg㎠

표 2.3 모터 및 관성부하 사양

속도 샘플링 주기	1000 [μs]
감쇠비 ζ	1.0
감쇠 진동 계수 ω_n	200 [rad/s]
전류 샘플링 주기	100 [μs]

표 2.4 Control Specification

그림2.5는 초기조건 Jr=7*JM, Jm=JM 상태에서 속도를 200rpm -> 1000rpm 주기적으로 변화시 자동 게인 조정 전,후(a)(b) 및 미세 조정후(c) 파형과 부하관성에 따른 과도상태에서의 게인조정(d)을 시뮬레이션 결과로 확인 할 수 있다.

그림2.6은 실험 결과로 초기조건 Jr=7*JM, Jm=JM 상태에서 속도를 200rpm -> 800rpm 주기적으로 변화시 플랜트의 속도응답 wr과 모델의 속도응답 wm의 차(c)에 따른 관성의 추정(d)과 게인 조정이 없는 경우의 파형(a)과 자동 게인 조정을 한 경우(b)를 비교 할 때 속도오차가 많이 줄어드는 것과 과도 응답특성이 좋아지는 것을 알 수 있다

3. 결 론

본 연구는 서보드라이버의 제어게인을 모터 및 부하의 관성모멘트 변화에 따라 자동으로 조정하여 제어특성을 안정화하고 제어 성능을 향상시키고자 퍼지 제어를 이용한 게인 자동 조정 PI 속도 제어 시스템을 설계하고, 제안한 퍼지 제어 시스템의 유용성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 퍼지 제어기의 파라미터는 시뮬레이션 및 실험적으로 구하였으며 실험결과 퍼지추론에 의해 부하관성의 추종과 이에 적합한 게인조정을 통하여 만족할 만한 성능을 얻을 수 있었으며, 미세 조정용 퍼지제어기를 통하여 과도상태에서 오버슈트를 줄일 수 있었다.

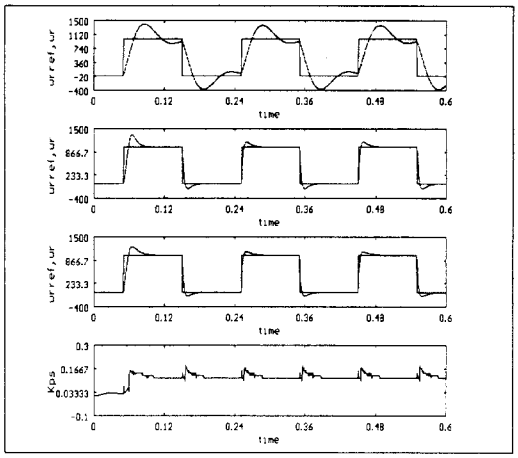


그림2.5 자동게인 조정 전,후파형 및 게인조정
(a)조정전 (b)조정후 (c)미세조정후 (d)게인조정

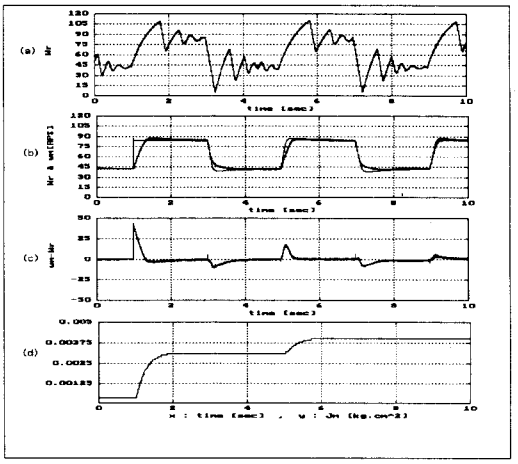


그림2.6 자동 게인조정 전,후의 비교 실험 결과

[참 고 문 헌]

[1] Nobuyuki Matsui "Recent Trend in AC Motion Control" IECON'92 pp.25-30

[2] S.Kobayashi,I.waya, H.KuromaruandK.Oshitani,"Dynamic Model Based Auto-Tuning Digital Servo Driver" IEEE Trans. Ind. Electron, Vol.IE-42 No.5,1995

[3] I.Miki, N.Nagai, S.Nishiyama "Vector control of induction motor with fuzzy PI controller" IEEE Ind. Applica. Soc. Annu. Meetting 1991, pp341-346

[4] I.Awaya, Y.Kato, I.Miyake "New motion control with inertia identification function using disturbance observer" in Proc. IECON'92 vol.1, 1992, pp.77-81

[5] T.Iwasaki and A.Morita, "Fuzzy Auto-Tuning for PID Controller with Model Classification" Proc.of NAFIPS'90, pp. 90-93, 1990

[6] E.Chiricozzi, F.Parasiliti, M.Tursini "Fuzzy self-tuning PI control of PM synchronous motor driver" int. J. Electronics, 1996 vol.80, no.2, pp.211-221

[7] 대우중공업 "서보의 기초 및 응용" & "대우 AC Servo Motor/Driver Operation Manual"