

퍼지논리, PID, 슬라이딩모드 제어의 응답특성 비교

백남석\* 정상용 양원영  
 중앙대학교 전기공학과

A comparison of output characteristics in Fuzzy logic, PID, & Sliding mode control

Nam-seok Baek Sang-yong Jung Won-young Yang  
 Department of electrical engineering, ChungAng university

**Abstract** - Robust fuzzy logic control, PID control, and sliding mode controllers are designed to control the speed of a third order linear time-invariant model of a motor. The step response performance of each controller, applied to the motor plant, is presented. We conclude fuzzy logic control can be a useful tool for the control engineering.

1. 서 론

일반적으로 전동기 구동시스템의 속도제어에 요구되는 특성들은 속도명령에 대한 고속응답성, 부하의란에 대한 안정성 그리고 계수변화에 대한 강인성등이다. 이러한 특성들을 위해서 플랜트 자체의 서보성을 증가시키거나, 강인한 제어알고리즘을 적용하고 있다. 그러나 제어알고리즘의 적용에 있어서 시스템 파라미터의 불확실한 측정이나 미지의 외란등으로 인하여 전동기 구동시스템의 바람직한 서보특성을 얻기가 어렵게 된다. 서보운전을 위한 제어방법으로 PID 제어기등의 고전적 제어기법이 산업 현장에서 널리 이용되고 있으나, 시스템의 파라미터 변동이나 동적 특성의 변화에 대한 적응능력이 떨어지는 단점이 있다. 이런 문제점을 해결하고 제어환경의 변화에 적극적으로 대처할 수 있는 지능제어의 한 형태인 퍼지논리제어와 시스템의 파라미터 변동을 무시할수 있는 슬라이딩 모드제어, 비선형성 병렬처리, 학습등의 특성으로 패턴인식, 정보처리, 적응제어 분야에 사용되는 신경회로망등이 연구되고 있다. 본 논문에서는 전동기의 속도제어 문제에 일반적인 PID제어와 퍼지논리 제어 그리고 슬라이딩모드제어를 적용하여 강인성(robustness)을 비교, 고찰하고자 한다

2. 본 론

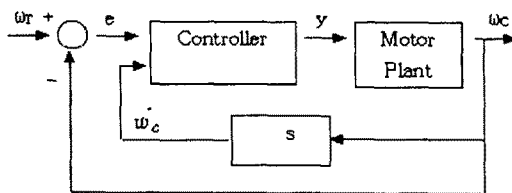


그림 1 모터 속도 제어 시스템  
 Fig 1 Motor speed control system

2.1 모터속도제어

선형-시불변 3계 시스템으로 모델링되는 모터의 건설한 속도제어 문제를 고려한다. 모터의 속도제어시 일반적인 시스템의 구성은 그림1과 같다. 퍼지 논리제어, PID 제어 그리고 슬라이딩모드 제어를 설계한후 비교, 검토하기 위하여 공칭 플랜트, 섭동이 있는 모터플랜트 그리고 성능규격을 사용한다. 그림1에서 기준 스텝 입력속도  $\omega_r$  과 출력모터속도  $\omega_c$ 가 비교를 위하여 사용된다. 각각의 제어기는 모터의 속도오차와  $e = \omega_r - \omega_c$ , 모터의 각가속도  $\dot{\omega}_c$ 를 입력으로만 접근할수 있다. 각 제어기는 오직 출력 u를 만든다. 일반 모터 플랜트는 다음과 같은 전달함수로 모델링된다.

$$G(s) = \frac{5}{s(s+1)(s+2)} \quad (1)$$

이때 perturbed된 모터 플랜트는 다음의 식(2)와 식(3)으로 표현되는 구조를 가진다.

$$G_2(s) = \frac{15}{s(s+1)(s+2)} \quad (2)$$

$$G_3(s) = \frac{5}{s^2(s+2)} \quad (3)$$

설계된 제어기는 시스템의 파라미터 변동에 건설해야 한다. 페루프 스텝응답은 각 제어기에서 동시에 짧은 상승시간을 가지며 오버슈트가 없어야 한다.

2.2. 제어기 설계

식(1)로 주어지는 플랜트에 기초하여 퍼지제어, PID 제어, 그리고 슬라이딩모드 제어를 설계하고자 한다. 설계된 제어기는 각 플랜트에 적용되며, 제어기의 강인성을 해석하기 위하여 시뮬레이션을 행한다.

2.2.1 퍼지제어

퍼지논리 제어기의 입력은 e와  $\dot{\omega}_c$ 이며, 출력은 u이므로 전체 집합은 7개의 퍼지 set 으로 분할된다. (NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB) 각각의 퍼지 set은 가우시

		e						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
$\dot{\omega}_c$	PB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
	PM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
	PS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	NS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
	NB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

표 1 퍼지제어기의 룰베이스  
 Table 1 Fuzzy controller rule base

안 멤버십 함수로 표현된다. 퍼지 제어기의 룰베이스는 49개의 룰을 포함하며 표1과 같다. 각 룰의 출력은 min-inference에 의해 결정되며, 퍼지 제어기의 명확한 출력  $u$ 는 무게중심법에 의해 생성된다.

### 2.2.2 PID제어.

모터속도제어시 만족할만한 스텝응답을 얻도록 선형 PID제어기를 설계한다. 일반적인 선형 PID제어기는 다음과 같은 전달함수식으로 표현된다.

$$C(s) = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \quad (4)$$

순수한 미분기를 구현하기가 쉽지 않으므로 미분항을 수정하면 식(5)로 된다.

$$C(s) = K_p + K_d \frac{s}{ts+1} + \frac{K_i}{s} \quad (5)$$

### 2.2.3 슬라이딩모드 제어

전달함수로 표현된 모터속도 제어시스템을 슬라이딩모드 제어를 하기 위해서는 상태공간형태로 변환하여야 하며, 식(6)이 된다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & -3 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 5 \end{bmatrix} u \quad (6)$$

$$y = [1 \ 0 \ 0] x$$

다음과 같은 슬라이딩면을 고려하고 시스템의 동특성은 이 면에서 안정하여야 한다.

$$S = (\dot{y} - \dot{y}_d) + \lambda_1(y - y_d) + \lambda_2(\dot{y} - \dot{y}_d) \quad (7)$$

여기서  $y_d(t)$ 는 출력에 의해 추적되는 기준계적이며, 이것을 완전히 알수 있다면 미분형태인  $\dot{y}_d(t)$ ,  $\ddot{y}_d(t)$ 를 오프라인으로 계산하여 시스템의 성능을 개선하는데 사용될 수 있다.

리아프노브 함수를 식(8)로 선정하면

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (8)$$

식(8)의 미분은 식(9)로 된다.

$$\dot{V} = S\dot{S} \quad (9)$$

이 식을  $u$ 에 관해서 풀면 식(10)으로 되며, 슬라이딩면 위에서 유한시간 수렴성을 보증한다.

$$\dot{S} = -K \operatorname{sgn}(S) \quad (10)$$

이 제어기는 슬라이딩면 근처에서 채터링을 일으킬수 있으므로 다음과 같이 변환한다.

$$\dot{S} = -KS \rightarrow \dot{V} = -KS^2 \quad (11)$$

식(11)을 확장하면

$$\begin{aligned} \dot{S} &= -2x_2 - 3x_3 + 5u + \lambda_1 x_3 + \lambda_2 x_2 \\ &= -K(x_3 + \lambda_1 x_2 + \lambda_2 x_1 - \lambda_2 y_d) \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)로부터 얻은  $u$ 는 제어를 위하여 사용된다.

## 2.3. 시뮬레이션

각각의 제어기에 대한 스텝응답은 그림2-그림4에 나타내었으며, 짧은 상승시간을 가지며, 오버슈트가 없음을 확인할수 있다.

### 2.3.1 퍼지논리와 PID

퍼지제어기와 공정한 비교를 위하여 먼저 PID제어의 경우, 정상상태 오차가 0이 되고 그 영향이 최소화 되도록  $K_i=0.001$ ,  $t=0.01$ 의 작은 값을 사용하였다.  $K_p$ 와  $K_d$ 의 값은  $C(s)G(s)$ 의 근계적을 사용하여 페루프 극의 위치가 각 플랜트에서 복소평면의 좌반면에 있도록 선정하였다. ( $K_p=2$ ,  $K_d=5$ ) 이 경우 스텝응답은 오버슈트가 없고 임계진동을 하였다.

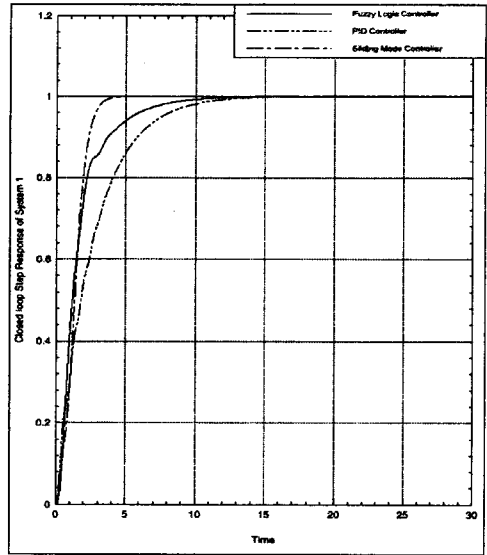


그림 2 시스템의 페루프 스텝응답

Fig 2 Closed loop step response of system

### 2.3.2 퍼지논리와 슬라이딩모드

슬라이딩 모드제어의 경우에는 식(12)와 같이 3 상태 (state)이므로 상태변수  $x_3$ 를 추적하는 Luenberger관측기를 구성하였으며, 식(13)으로 표현할수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}} &= A\hat{x} + bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= c\hat{x} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 행렬  $L$ 은 관측기 오차(A-LC)의 고유치가 좌반면에 있고, 오차 특성이 슬라이딩면의 특성보다 빠르도록 선정하였다. 슬라이딩모드 제어기는 입력이 작게 유지되면 시스템의 변화와 입력이득의 변화에도 강인함을

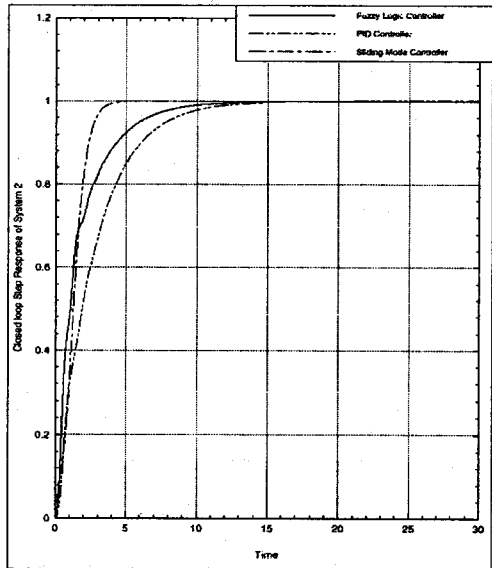


그림 3 모델2의 페루프 응답

Fig 3 Closed loop response of model 2

[참고 문헌]

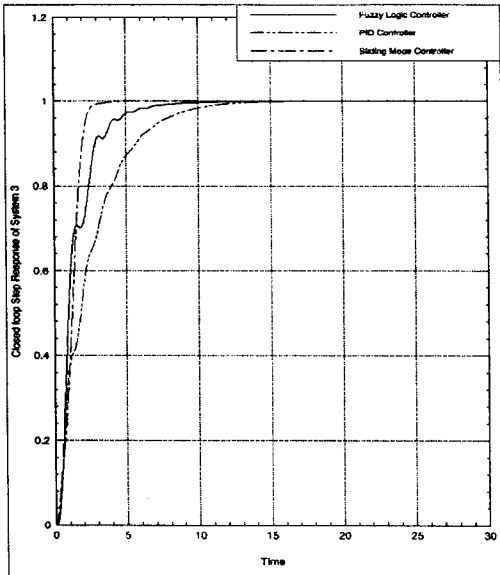


그림 4 모델 3의 폐루프 응답

Fig 4 Closed loop step response of model 3

[1] V.S.C.Raviraj and P.C.Sen, "Comparative study of proportional-integral, sliding mode, and Fuzzy logic controllers for power converters", IEEE trans. I.A, vol 33, No 2, pp518-524, 1997  
 [2] J.B.Gamble and N.D.Vaughan, "Comparison of sliding mode control with state feedback and PID control applied to a proportional solenoid valve", Journal of dynamic systems, measurement, and control, pp434-438, september 1996  
 [3] Charles P. Coleman and Datta Godbole, "A comparison of robustness Fuzzy logic PID & sliding mode", 1995  
 [4] L.K.Wong, F.H.F.Leung and P.K.S.Tam, "The design of stable Fuzzy logic controllers with combination of conventional controllers", ISIE'97, pp993-997, 1997  
 [5] J.Moscinski, Z.Ogonowski, "Advanced control with Matlab & simulink", Ellis Horwood Limited 1995  
 [6] C.Edwards and S.K.Spurgeon, "Sliding mode control theory and applications" Taylor & Francis Ltd 1998  
 [7] M.Jamshidi, N.Vadiee, and T.J.Ross, "Fuzzy logic and control software and hardware applications", Prentice-Hall International, 1993

알 수 있다. 식(11)에서 이 제어기는 선형상태 피드백 제어기로 동작하며, 모터 플랜트의 폐루프 고유치는  $-1.3392$  &  $-4.33 \pm j 1.91$ 이다.

3. 결 론

PID제어, 슬라이딩모드 제어기법은 모터속도제어와 같은 강인한 제어를 설계하는데 비교적 쉽게 응용될 수 있으며, 또한 퍼지논리 제어로도 동일한 목적을 달성할 수 있음을 보였다. 따라서 이 세가지 제어기법은 강인한 제어를 설계하는데 유용하게 사용될 수 있다.

적절한 소프트웨어 도구를 이용하면 퍼지논리 제어기는 비교적 쉽게 구현되고 만족할 만한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 퍼지 논리제어 해석을 위한 새로운 설계도구 개발이 필요하고 이와같은 제어 시스템에  $H^\infty$ 제어나 적응제어 또는 예측제어등의 제어기법과의 비교도 필요하리라 판단된다.