

비선형 요소를 이용한 기준 모델 추종형 퍼지 제어 시스템의 설계

황 광 선*, '남 경 원', 정 호 성**, 김 동 완*
 * 부산대학교 전기공학부 ** 연암공전 전자과

A Design on Reference Model Following Fuzzy Control System Using Hysteresis element

C. S. Hwang*, 'K. W. Nam', H. S. Jeong**, D. W. Kim*
 * Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University
 ** Dept. of Electronics, Yonam College of Engineering

Abstract - In this paper, a reference model following control system using a fuzzy logic controller(FLC) is proposed. By using an integrator and a nonlinear hysteresis element, a reference model whose response has no overshoot and fast rise time is designed. A FLC is designed to follow as close as possible to the response of the reference model. The proposed design method is shown that the robustness and the optimal tracking property can be achieved under modeling error, disturbance and parameter perturbations. The effectiveness of the proposed design method is verified through the simulation that compare using the FLC with using a H_{∞} controller.

속응성이 좋은 응답을 실현할 수 있다[3]. 그러나 실제 플랜트는 정확히 모델링하기가 매우 힘들고, 그 동적인 특성이 변화하기 때문에 위의 방법만으로는 외란이나 파라미터의 변동에 대해서 만족할 만한 제어 성능을 얻기 힘들다. 이 문제점을 해결하기 위하여 오우버슈트가 없고 속응성이 양호한 특성을 보이는 기준 모델을 선정하고 이 기준 모델을 수식적으로 고정시킨다. 그림 1은 비선형 요소를 이용한 제어 시스템의 블록선도이다. 1차 시스템의 제어 대상 앞에 적분기와 비선형 요소를 구성한다. 오차 신호를 입력시킬 때 비선형 요소와 조합하여 제어기를 구성한다.

1. 서 론

제어 시스템의 목적은 강인성과 안정성을 보장하고 외란이나 파라미터의 변동 하에서도 최적의 추종 성능을 보장하는 것이라고 할 수 있다. 현대 산업용 프로세스의 자동화와 더불어 많은 응용 분야에서는 주어진 목표치에 빠르게 그리고 고정도로 추종시키는 고성능 제어 기법을 개발하기 위한 연구가 계속되어 왔다.

이들 연구 중에서 1965년 Zadeh[1]에 의해 제창된 퍼지 이론은 Mamdani[2]등에 의해 1974년에 제어에 도입되면서, 현재 퍼지 제어는 퍼지 이론의 응용에 관한 가장 성공적인 분야로 자리잡았다. 퍼지 제어는 정확한 수학적인 모델링을 필요로 하는 기존의 제어 기법과는 달리 인간의 의사 결정 방식 즉, 인간의 판단 등 애매성을 포함한 제어 알고리즘을 if-then형식의 규칙으로 표현하고 퍼지 추론을 이용하여 비선형성이 강하고 플랜트의 특성을 모델링하기가 어려운 경우 등에 사용되고 있다.

본 논문에서는 비선형 요소(Hysteresis element)를 이용하여 오우버슈트가 일어나지 않고 속응성이 좋은 응답을 갖는 시스템을 기준 모델로 하여 이 기준 모델에 대해 최적의 추종성을 가지는 퍼지 제어 시스템을 설계하고자 한다. 또한 제안된 방법에 의해 구성된 기준 모델 추종형 퍼지 제어 시스템이 외란, 파라미터 변동 하에서도 만족할 만한 제어 성능을 달성할 수 있음을 H_{∞} 제어를 사용한 경우와 비교하여 입증한다.

2. 비선형 요소를 이용한 제어 시스템

플랜트의 파라미터를 정확히 모델링할 수 있다면, 비례-적분 제어의 비례 요소 대신 비선형 요소(Hysteresis element)를 사용하므로써 스텝 입력에 대하여 오우버슈트가 일어나지 않고

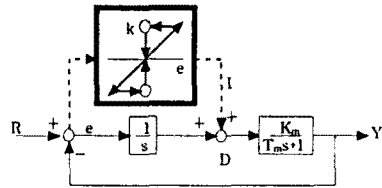


그림 1. 비선형 요소를 이용한 제어 시스템의 블록선도

그림 1에서 비선형 요소를 제거한 2차 시스템의 출력은 그림 2(a)와 같고, 그림 1의 비선형 요소의 출력은 그림 2(b)와 같다. 그림 1의 비선형 요소를 이용한 기준 모델의 출력은 그림 2(a)와 그림 2(b)를 합한 형태인 그림 2(c)와 같다.

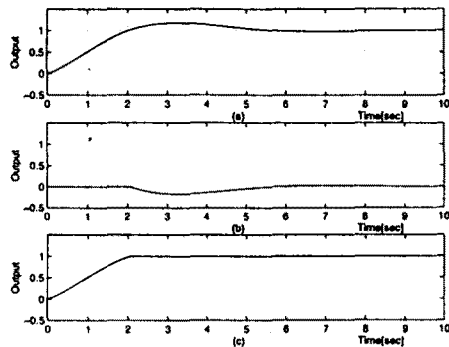
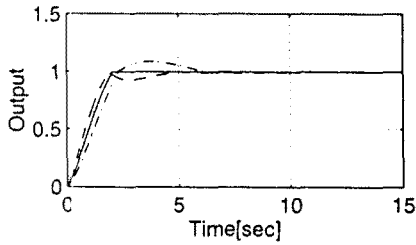


그림 2. 비선형 요소를 이용한 제어 시스템의 출력 파형

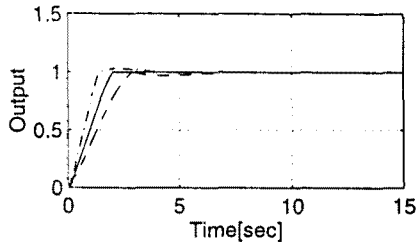
3. 기준 모델 추종형 퍼지 제어 시스템의 설계

3.1 기준 모델 추종형 퍼지 속도 제어 시스템

2장의 제어 시스템은 파라미터 변동을 무시하고 파라미터 K_m 과 T_m 이 항상 일정한 값을 가진다고 가정하는 것이다. 그러나 실제 플랜트에서 파라미터의 변동은 항상 존재하고 이러한 파라미터들은 정확히 모델링하기가 매우 어렵다. 적분 요소와 비선형 요소를 결합한 그림 1의 제어 시스템만으로 제어를 수행할 때 플랜트의 파라미터 변동에 대한 영향은 그림 3과 같다. 여기서 플랜트의 이득은 $K_m=1.0$, 시정수는 $T_m=1.0$ 로 고정하여 설계되었다.



(Solid line : $T_m=1.0$, Dashed line : $T_m=0.7$, Dash-dotted line : $T_m=1.5$)
(a) 시정수 T_m 의 변동



(Solid line : $K_m=1.0$, Dashed line : $K_m=0.7$, Dash-dotted line : $K_m=1.5$)
(b) 이득 K_m 의 변동

그림 3. 파라미터 변동의 영향

그림 3에서 나타난 것과 같이 파라미터의 변동에 대한 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 파라미터 변동의 영향에 대처하기 위해서 그림 1의 제어 시스템을 기준 모델로 선정하여 파라미터를 수식적으로 고정시킨다. 그리고 실제 플랜트의 응답이 오버슈트가 없고 속응성이 좋은 기준모델의 응답에 추종하도록 퍼지 제어를 설계한다.

비선형 요소를 이용한 기준 모델 추종형 퍼지 제어 시스템의 구성은 다음과 같다.

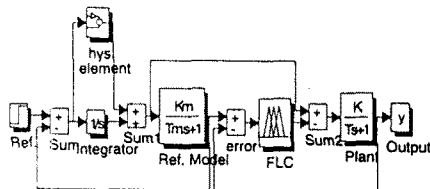


그림 4. 기준 모델 추종형 퍼지 제어 시스템

3.2 퍼지 제어기의 설계

3.1절에서는 그림 4의 블록선도에서 보는 바와 같이 기준 모델의 제어입력이 제어대상 플랜트에도 인가되도록 전체 시스템을 구성하였다. 그러나 제어대상 플랜트를 모델링할 때 발생하

는 모델링 오차와 파라미터 변동 등에 의해서 기준 모델과 제어대상 플랜트는 그 파라미터값이 다르기 때문에 기준 모델의 파라미터값에 맞추어 설계된 기준 모델의 제어 입력만으로는 만족할 만한 제어 성능을 얻기 힘들다. 따라서 기준 모델의 출력과 제어대상 플랜트의 출력간의 오차를 상쇄시키도록 퍼지 제어기가 설계되고, 이 퍼지 제어기의 출력이 기준 모델의 제어 입력과 함께 제어대상 플랜트의 제어입력이 된다.

퍼지 제어기의 입력 변수는 오차 Error와 오차의 변화분 dError이고 퍼지 제어기의 출력 변수는 제어입력의 변화분 y 이다. 각 제어 변수들의 멤버십 함수는 그림 5에 나타내었다. 입력 변수와 출력 변수 모두 7개의 멤버십 함수를 가지며 각각 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB이다. 멤버십 함수의 튜닝은 없었으며 Scaling factor를 사용하여 멤버십 함수의 Range는 수정을 가하였다.

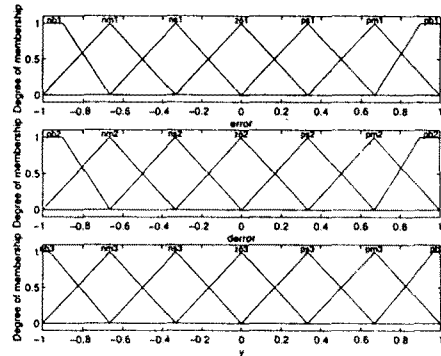


그림 5. 각 퍼지제어변수들의 멤버십함수

본 논문에서 사용한 퍼지 규칙표는 표 1과 같다[4]. 전문가적인 지식을 요구하는 퍼지 규칙의 선정과정없이 일반적으로 널리 알려진 제어 규칙을 사용하여도 만족할 만한 성능을 얻을 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보인다.

Table 1. 퍼지 제어기의 제어 규칙표

Rule 1.	If (Error is PB1) and (dError is ZO2) then (y is PB3)
Rule 2.	If (Error is PB1) and (dError is NS2) then (y is PM3)
Rule 3.	If (Error is PS1) and (dError is NB2) then (y is NM3)
Rule 4.	If (Error is ZO1) and (dError is NB2) then (y is NB3)
Rule 5.	If (Error is NB1) and (dError is ZO2) then (y is NB3)
Rule 6.	If (Error is NB1) and (dError is PS2) then (y is NM3)
Rule 7.	If (Error is NS1) and (dError is PB2) then (y is PM3)
Rule 8.	If (Error is ZO1) and (dError is PB2) then (y is PB3)
Rule 9.	If (Error is PM1) and (dError is ZO2) then (y is PM3)
Rule 10.	If (Error is ZO1) and (dError is NM2) then (y is NM3)
Rule 11.	If (Error is NM1) and (dError is ZO2) then (y is NM3)
Rule 12.	If (Error is ZO1) and (dError is PM2) then (y is PM3)
Rule 13.	If (Error is PS1) and (dError is ZO2) then (y is PS3)
Rule 14.	If (Error is PS1) and (dError is NS2) then (y is ZO3)
Rule 15.	If (Error is ZO1) and (dError is NS2) then (y is NS3)
Rule 16.	If (Error is NS1) and (dError is ZO2) then (y is NS3)
Rule 17.	If (Error is NS1) and (dError is PS2) then (y is ZO3)
Rule 18.	If (Error is ZO1) and (dError is PS2) then (y is PS3)
Rule 19.	If (Error is ZO1) and (dError is ZO2) then (y is ZO3)

4. 시뮬레이션

DC 서보 모터의 속도 제어 시스템은 그림 4와 같으며, 시뮬레이션에 쓰인 DC 모터의 동적 방정식은 아래와 같다[5].

$$T_m(t) = K_i i_a(t) \quad (1)$$

$$\frac{dw_m(t)}{dt} = \frac{1}{J_m} T_m(t) - \frac{B_m}{J_m} w_m(t) \quad (2)$$

단, $i_a(t)$: 전기자 전류 $w_m(t)$: 회전자 각속도
 $T_m(t)$: 전동기 토크 J_m : 회전자 관성
 K_i : 토크 정수 B_m : 점성마찰계수

본 연구에서는 전류제어 방식을 사용하며 식 (2)에 식 (1)을 대입하고 속도에 대한 식으로 정리하면 아래와 같다.

$$\frac{dw_m(t)}{dt} = \frac{K_i}{J_m} i_a(t) - \frac{B_m}{J_m} w_m(t) \quad (3)$$

식 (3)를 라플라스 변환하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{\Omega(s)}{I_a(s)} = \frac{K_i/B_m}{J_m/B_m s + 1} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (4)$$

제어 대상 플랜트의 파라미터는 $K=1.0$, $T=1.5$ 이고 기준 모델의 파라미터를 $K_m=1.0$, $T_m=1.0$ 으로 하여 단위 계단 입력을 가했을 때의 응답 특성을 살펴보았다. 여기서 그림 4의 퍼지 제어를 H_∞ 제어로 대체한 경우와 퍼지 제어를 사용한 경우의 플랜트의 응답을 비교한다. (그림 6, 7) 그리고 기준 모델의 파라미터를 $K_m=6.667$, $T_m=0.15$ 로 변화시켜 단위 계단 입력을 가했을 경우의 플랜트 응답은 그림 8에 나타내었다.

시뮬레이션에서 보는 바와 같이 비선형 요소를 이용한 기준 모델 추종형 퍼지 제어 시스템이 파라미터 변동과 외란에 대해 강인한 성능을 나타냄을 알 수 있다. H_∞ 제어기와 비교를 통해 복잡한 수식을 사용하지 않고도 퍼지 제어기의 약점인 튜닝의 어려움을 기준 모델의 선정으로 해결하였으며, H_∞ 제어기를 이용한 방법보다 제안된 방법이 우수함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 비선형 요소를 이용하여 오버슈트가 없고 속응성이 좋은 기준 모델을 선정하고 실제 플랜트가 이 기준 모델의 출력에 추종하도록 퍼지 제어를 설계하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방법이 파라미터 변동이나 외란 제기에 우수함을 확인할 수 있었다. 그리고 기준 모델의 선정을 통해 H_∞ 제어와 같이 복잡한 수식을 사용해야 하는 어려움이 간단한 퍼지 제어 규칙과 멤버십 함수로써 H_∞ 제어기를 사용한 경우보다 더 나은 성능을 얻었다.

참고 문헌

- [1] L. A. Zadeh, "Fuzzy set", Informt. Control, Vol. 8, pp. 308-353, 1965
- [2] E. H. Mamdani and S. Appilian, "An Experiment in

Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", Int. J. Man-Machine Stud., Vol. 7, pp. 1-13, 1975

- [3] M. Nakano, M. Hasegawa, Y. Kaneko and B. Gong, "Finite settling time compensation of control system using non-linear element", T.IEE Japan, Vol. 114-d, No. 2, pp. 179-184, 1994
- [4] 菅野道夫 著, 박민용 외 1인 譯, "퍼지 제어 시스템", 대영사, pp. 93-98, 1990
- [5] Benjamin C. Kuo 著, 김수중 외 3인 譯, "자동제어", 청문각, pp. 174-178, 1996

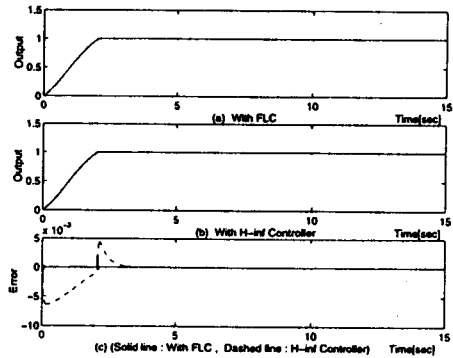


그림 6. 외란을 인가하지 않았을 경우의 플랜트의 출력

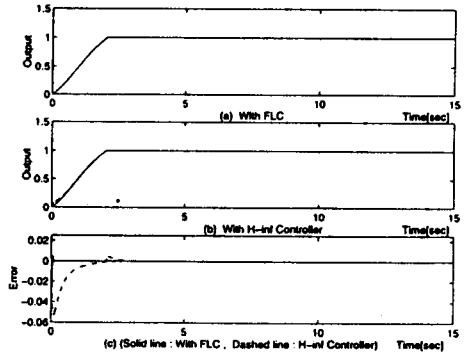


그림 7. $t=0$ 에서 외란(step input=1)을 인가하였을 경우의 플랜트의 출력

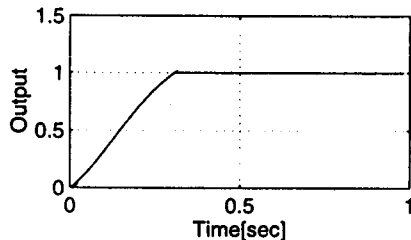


그림 8. $K_m=6.667$, $T_m=0.15$ 로 하여 외란을 인가하지 않았을 경우의 플랜트 응답