

스케일링 계수를 위한 퍼지 레귤레이터 설계

김용태* · 이상윤 · 이상식** · 신위재

*경남대학교 전자공학과, **해군사관학교 전자공학과

Design of Fuzzy Regulator for Scaling factors

Yong-Tae Kim*, Sang-Yun Lee, Sang-Sik Lee**, Wee-Jae Shin

*Dept. of Electronic Engineering Kyungnam University

email: cwee@kyungnam.ac.kr

** Dept. of Electronics R.O.K Naval Academy

email: leess4@hanmail.net

요약

퍼지제어기를 실제 플랜트에 적용할 경우, 모델링 오차와 플랜트에 대한 관련지식의 부족으로 만족할 만한 제어 결과를 기대하지 못한다. 이러한 경우 제어기 성능을 향상시키기 위해 제어인자를 다시 조정해야 하고, 이 조정과정은 시행착오방법으로 수행되기 때문에 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 본 논문에서는 퍼지 논리를 사용하여 스케일링 계수를 자동조정하는 퍼지 레귤레이터를 제안하였다. 스케일 계수의 출력 범위와 오차, 오차 변화량 따라 퍼지 레귤레이터는 적절한 스케일링 계수값을 결정함으로써 퍼지제어기의 성능을 향상시키게 된다. 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위해 2차 플랜트에 적용하여 모의 실험을 수행하였다.

대한 지식으로부터 결정되며 시행착오와 경험적으로 선택되었다.[2][3] 경험이나 시행착오에 의한 설계방법은 어느 정도 양호한 제어 결과를 얻을 수 있지만, 그 제어 시스템에 최적이라고 보장할 수 없을 뿐만 아니라 이런 설계 방법은 많은 시간, 노력과 비용이 드는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 퍼지논리를 사용하여 플랜트 응답에 따라 적절한 스케일링 계수를 결정하는 스케일링 계수 퍼지 레귤레이터를 설계한다. 설정치에 따라 스케일 계수의 출력 범위는 재조정되고, 오차와 오차 변화량을 입력으로 퍼지 레귤레이터는 플랜트 응답에 따라 스케일링 계수를 결정하게 된다. 구해진 스케일링 계수에 의해 퍼지 제어기의 출력은 재조정되어 적절한 제어입력을 결정하게 된다. 이를 확인하기 위해 2차 플랜트에 적용하여 모의실험하였다.

I. 서론

퍼지제어기는 제어대상에 대한 작업자의 경험이나 전문가의 언어적인 표현을 쉽게 제어기와 결합시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 플랜트 파라미터 변동이나 외부 외란에 크게 영향을 받지 않는 강인한 제어기의 특성도 지니고 있다.[1] 이러한 퍼지제어기의 성능은 입력력 변수의 스케일링 계수(Scaling factors), 소속함수의 모양, 제어규칙에 의해 영향을 받는다. 이들 제어인자들은 작업자의 경험이나 설계자의 플랜트에

II. 퍼지제어기[3][4]

그림 1은 본 연구에서 사용한 퍼지 제어시스템 구조를 나타내고 있다. 일반적으로 퍼지제어기는 퍼지화기(fuzzifier), 퍼지 추론(fuzzy reasoning), 비퍼지화기(defuzzifier)로 구성되어 있다. 설정치 $r(k)$ 와 플랜트 출력사이의 오차 $e(k)$ 와 오차 변화량 $\Delta e(k)$ 을 입력변수로 하여 퍼지제어기 출력의 변화량 $\Delta u(k)$ 을 결정한다. 실제 플랜트 제

어입력 $u(k)$ 은 과거의 제어입력 $u(k-1)$ 과 제어입력 변화량 $\Delta u(k)$ 의 합으로 이루어진다.

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (1)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (3)$$

여기서 $r(k)$, $y(k)$ 는 각각 기준 설정치와 플랜트 출력을 나타낸다.

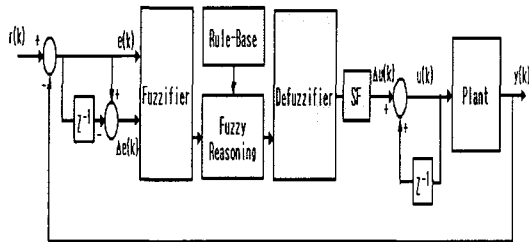


그림 1. 퍼지 제어시스템 구조

입력변수인 오차와 오차 변화량에 대한 퍼지집합과 언어변수는 “NB”, “NMB”, “NM”, “NMS”, “NS”, “NVS”, “ZE”, “PVS”, “PS”, “PMS”, “PM”, “PMB”, “PB”로 각각 13개씩 정하였다. 입출력 변수들의 언어값의 종류는 제어규칙의 수와 제어기 성능에 큰 영향을 미친다. 언어값의 수가 많으면 제어성능을 향상시킬 수 있으나 제어기의 계산량이 많아지는 단점이다.

소속함수의 모양은 여러 가지 형태를 생각할 수 있으나 그림 2, 3과 같은 종형 소속함수를 사용하였다. 이와 같이 정의된 입력변수와 출력변수의 퍼지집합을 이용하여 표1과 같은 제어규칙을 작성하였다.

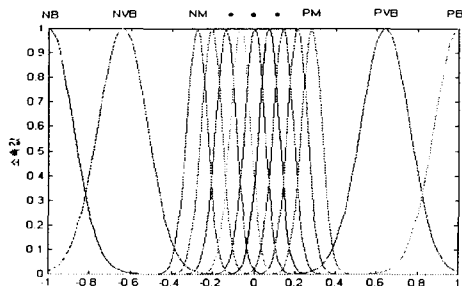


그림 2. $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 에 대한 소속함수

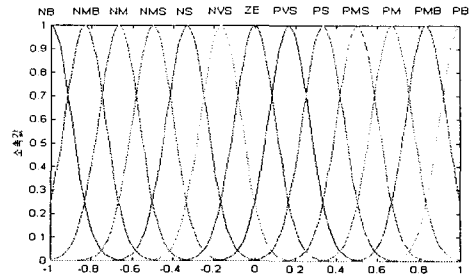


그림 3. $\Delta u(k)$ 에 대한 소속함수

E \ ΔE	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE
NMB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS
NM	NB	NB	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS
NMS	NB	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS
NS	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM
NVS	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB
ZE	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB
PVS	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB
PS	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB
PMS	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB	PB
PM	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB	PB	PB
PMB	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
PB	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

표 1. 퍼지제어의 제어규칙

퍼지 추론과 비퍼지화 방법에는 다양한 방법이 있지만, 본 논문에서는 그림 4와 같은 퍼지추론과 비퍼지화를 사용하였으며 스케일링 계수 SF 를 고려한 $\Delta u(k)$ 는 식(5)와 같다.

$$\Delta u = SF \times y \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{\sum_{i=1}^m \tau_i y^*_i}{\sum_{i=1}^m \tau_i} \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^m y^*_i \left[\exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u_j - x_{ij}^*}{\sigma_{ij}}\right)^2\right) \right]}{\sum_{i=1}^m \left[\exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u_j - x_{ij}^*}{\sigma_{ij}}\right)^2\right) \right]} \\
 &= \sum_{i=1}^m v_i y^*_i \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기서, x_{ij}^* , σ_{ij} , y^*_i 는 각각 가우스 함수의 중심, 가우스 함수의 폭, 결론부 퍼지집합의 비퍼지화된 값을 나타낸다. 식(5)을 이용하여 식(3)을

다시 정리하면 다음과 같다.

$$u(k) = u(k-1) + SF \times y \quad (7)$$

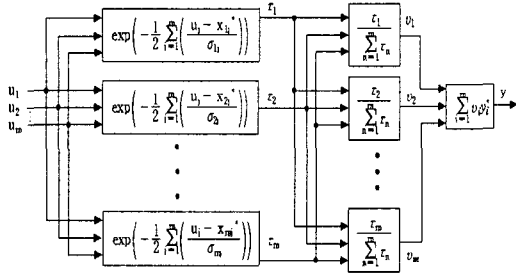


그림 4. 퍼지추론과 비퍼지화

그림 5와 표 2는 각각 스케일링 계수에 따른 플랜트 응답과 성능 비교표를 나타내었다. 스케일 계수가 0.175일 때 작은 최대오버슈트와 빠른 정정시간을 가지게 되고 0.5일 때는 지연시간과 상승시간은 빠르지만 높은 최대오버슈트와 느린 정정시간을 가지게 된다. 그리고 0.05일 때는 매우 느린 지연시간과 상승시간, 정정시간을 갖지만 오버슈트가 발생하지 않는다. 스케일 계수가 너무 크다면 큰 최대 오버슈트를 가지면서 진동하게 된다. 너무 작다면 긴 지연시간과 상승시간으로 인해 주어진 시간내에 수렴하지 못한다.

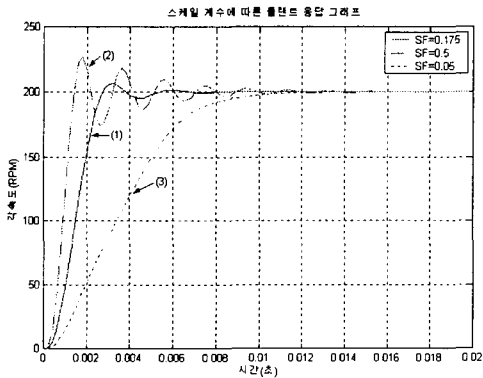


그림 5. 스케일 계수에 따른 플랜트 응답(200rpm)

특성 SF	지연시간	상승시간	정정시간	최대 오버슈트
0.05	3.387 ms	5.322 ms	7.560 ms	없음
0.175	1.476 ms	1.641 ms	2.491 ms	3.06 %
0.5	0.905 ms	0.787 ms	4.802 ms	13.3 %

표 2. 스케일 계수에 따른 성능 비교

III. 스케일링 계수 퍼지 레귤레이터 설계

스케일 계수 퍼지 레귤레이터는 오차 $e_s(k)$ 와 오차 변화량 $\Delta e_s(k)$ 을 입력변수로 하고 스케일 계수 $SF(k)$ 을 출력 변수로 한다.

$$e_s(k) = |e(k)| \quad (8)$$

$$\Delta e_s(k) = e_s(k) - e_s(k-1) \quad (9)$$

언어변수와 단어 집합은 표 3과 같으며, $e_s(k)$ 와 $\Delta e_s(k)$, $SF(k)$ 소속함수는 각각 그림 6, 7과 같다. 그리고 제어규칙은 표 4와 같으며 퍼지 추론과 비퍼지화 과정은 그림 4와 같다.

매우 작다	작다	작지는 않다	중간보다 는 작다	중간 이다	중간보다 크다	크지는 않다	크다	매우 크다
VS	S	NS	SM	M	BM	NB	B	VB

표 3. 단어집합과 언어변수

E_{sf} ΔE_{sf}	VS	S	NS	SM	M	BM	NB	B	VB
VS	VS	S	NS	SM	M	BM	NB	B	VB
S	S	NS	SM	M	BM	NB	B	VB	VB
NS	NS	SM	M	BM	NB	B	VB	VB	VB
SM	SM	M	BM	NB	B	VB	VB	VB	VB
M	M	BM	NB	B	VB	VB	VB	VB	VB
BM	BM	NB	B	VB	VB	VB	VB	VB	VB
NB	NB	B	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB
B	B	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB
VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB

표 4. 스케일링 계수 퍼지 레귤레이터의 제어규칙

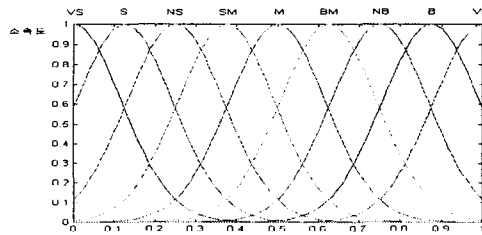


그림 6. $e_s(k)$ 와 $\Delta e_s(k)$ 소속함수

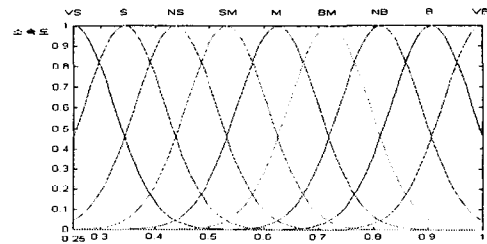


그림 7. $SF(k)$ 소속함수

$SF(k)$ 에 대한 소속함수의 대집합 범위는 $[0.25 \cdot M, M]$ 이다. 여기서 M 은 $SF(k)$ 에 대한 대집합 최대값을 의미하며 설정치 $r(k)$ 가 바뀔 때마다 M 의 값은 식(10)에 의해 결정된다.

$$M = \frac{r(k)}{R_I} M_I \quad (10)$$

여기서, R_I, M_I 는 각각 초기 설정치와 그때의 $SF(k)$ 에 대한 대집합 최대값을 나타낸다.

스케일링 계수 퍼지 레귤레이터는 첫 번째 오버슈트가 발생할 때까지만 동작하여 스케일 계수를 조정하게 된다. 이는 정상상태에 도달할수록 스케일링 계수가 줄어들음으로 인해 $\Delta u(k)$ 가 더욱 작아져 수렴시간이 길어지는 현상이 발생할 수 있기 때문에 계수를 고정시킬 필요가 있다.

IV. 모의실험과 고찰

모의실험에 사용한 2차 플랜트의 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{1.2033 \times 10^8}{s^2 + 2.9627s + 6.5775 \times 10^6} \quad (11)$$

식(6)을 샘플링 시간 0.2ms로 이산화하면 다음과 같은 차분방정식이 구해진다.

$$y(k+1) = 1.39711y(k) - 0.538894y(k-1) + 2.59383u(k) \quad (12)$$

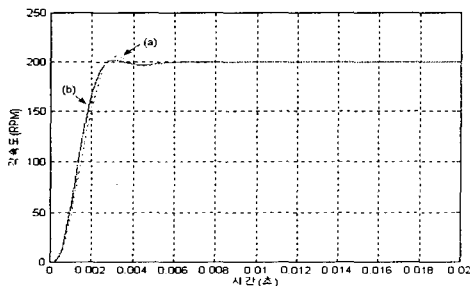


그림 8. 설정치 200rpm일 때, 2차 플랜트 응답
(a) SF=0.175로 고정시킨 퍼지제어기
(b) 스케일 계수 퍼지 레귤레이터를 갖는 퍼지제어기

특성 제어기	지연시간	상승시간	정정시간	최대 오버슈트
SF=0.175로 설정된 퍼지제어기	1.476ms	1.641ms	2.491ms	3.055 %
제안한 퍼지제어기	1.341ms	1.544ms	2.367ms	1.012 %

표 5. 성능지수를 통한 응답특성 비교

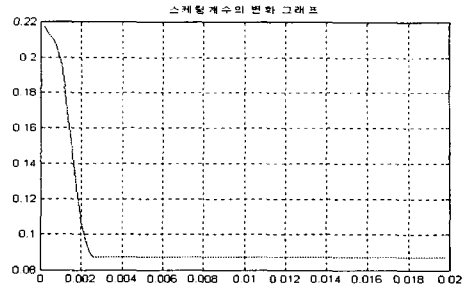


그림 9. 200rpm일 때의 스케일링 계수 변화

$R_I = 300\text{rpm}$, $M_I = 0.23$ 으로 설정하여 모의실험을 했을 때, 스케일링 계수를 0.175로 설정했을 때보다 지연시간이 0.135ms, 상승시간이 0.097ms 더 빠른 것으로 나타났고 이로 인해 수렴시간 역시 0.124ms 더 빠른 것으로 나타났다. 그리고 최대오버슈트는 2.043%로 낮게 나왔다. 그림 9에서 알 수 있듯이 스케일링 계수는 첫 번째 오버슈트 발생 이전까지는 감소하다가 첫 오버슈트 이후에는 0.0872로 고정되었다.

V. 결론

스케일링 계수 퍼지 레귤레이터를 갖는 퍼지제어기가 스케일 계수를 고정하여 사용하는 퍼지제어기보다 지연시간, 상승시간, 정정시간, 최대오버슈트 모두 우수한 성능을 나타내는 것을 모의실험을 통하여 확인하였다. 또한 스케일 계수 퍼지 레귤레이터에 의해 상승시간을 증가시키면서 최대 오버슈트를 낮출 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

VI. 참고문헌

[1] E.H.Mamdani, "Twenty years of fuzzy control: Experiences gained and lessons learnt", proc. 2nd IEEE Int. Conf. fuzzy systems, San Francisco, CA, pp339-344, 1993
 [2] M. Braae and D.A.Rutherford, "Selection of parameters for a fuzzy logic controller", Fuzzy sets and systems, Vol.2, pp.185-199, 1979
 [3] Kevin M.Passino, Stephen Yurkovich, "Fuzzy Control", Addison-Wesley, Inc. pp.21-85, 1998
 [4] Ronald R.Yager, Dimitar P.Filev, "Essentials of Fuzzy Modeling and Control", John Wiley & Sons, Inc. pp.109-238, 1994