

최적화기법을 이용한 퍼지 제어기의 비선형 이득요소 동조

류 동 완 · 권 재 철 · 서 보 혁
경북대학교 전기공학과

Nonlinear Scaling Factors tuning of Fuzzy Controller using Optimization Techniques

Dong-Wan Ryoo · Jae-Cheol Kwon · Bo-Hyeok Seo
Department of Electrical Engineering Kyungpook National University

Abstract - An optimal tuning algorithm of scaling factors is presented in this paper to automatically improve the performance of fuzzy controller. Especially, fuzzy controller has determined an moderate Scaling factor through trial and error. The presented method estimates automatically the optimal values of I/O scaling factors, using modified steepest descent method and this optimal tuning is for nonlinear input/output scaling factors. Simulation results verify the validity of the presented method.

1. 서 론

퍼지 제어는 전문가의 지식을 바탕으로 제어 규칙을 언어적으로 쉽게 표현할 수 있으며, 외란에 대해 매우 강인한 특성을 가질 뿐만 아니라 제어 대상을 수학적으로 정확히 근사화 할 수 없는 경우 제어 대상의 입출력 관계만으로 퍼지 제어를 함으로써 우수한 성능을 발휘한다. 하지만 이들의 대부분은 제어대상의 입출력 관계로부터 제어규칙을 찾아내고, 이렇게 구해진 규칙으로부터 역으로 제어 대상을 제어하고 있다. 즉 제어대상이 달라지면 이에 따른 제어규칙, 이득요소나 소속함수까지 새롭게 결정해야만 한다. 그리고 퍼지제어기의 성능에 중요한 영향을 미치는 요소들은 제어규칙, 이득요소, 멤버십함수, 퍼지추론, 비퍼지화 등을 들 수 있으며, 퍼지제어기의 입출력단에 작용하는 이득요소(Scaling factor)들은 제어시스템 출력에 직접적인 영향을 미치므로 이들의 선정에 매우 신중을 기해야 한다. 그러나 체계적인 방법이 제시되어 있지 않아 시행착오에 의존하여 왔다.

본 논문에서는 이러한 요소들 중 입출력 이득요소를 동시에 최적화 기법을 이용하여 튜닝시킨다. 또한 입력 이득요소는 비선형으로 사상하였다. 이러한 비선형 사상은 일종의 가변이득요소라 할 수 있으며, UOD(Universe of discourse)의 범위가 가변하는 것과 같은 효과를 가진다. 모의 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 효용성을 확인하였다.

2. 퍼지 제어기의 구성

퍼지 제어기는 그림 1에 나타낸 바와 같이 네 개의 주된 구성요소로 함축되어 있으며, 기본 구성은 퍼지화, 비퍼지화, 퍼지 제어규칙 및 퍼지 함의(fuzzy implication)이다.

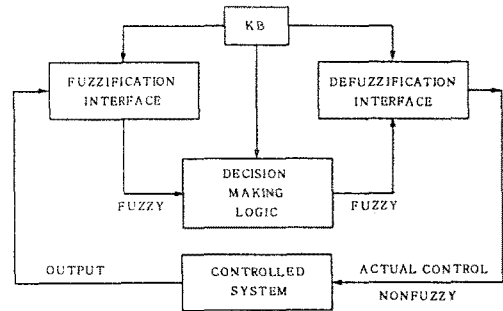


그림 1. 퍼지 제어의 구조
Fig. 1. Architecture of fuzzy logic control.

퍼지 제어기에서 퍼지 시스템의 동작은 전문가의 경험에 근거한 언어로 표현한 규칙으로 특정 지을 수 있으며 퍼지화에서는 수치적 데이터를 인간의 모호한 언어적 표현으로 바꾸는데 이용된다.

전문가의 지식은 IF, THEN으로 형성된다. 퍼지 제어 규칙에서의 전건부는 퍼지 조건문이고, 후건부는 제어 하에서의 시스템의 제어동작이다.

퍼지제어기의 추론 규칙은 다음과 같다.

- $R_1 : \text{if } e = PB \text{ and } \Delta e = ZE \text{ then } \Delta U = PB$
- $R_2 : \text{if } e = ZE \text{ and } \Delta e = NB \text{ then } \Delta U = NB$
- \vdots
- $R_k : \text{if } e = ZE \text{ and } \Delta e = PB \text{ then } \Delta U = PB$

퍼지 추론에서 나온 제어입력의 소속함수를 제어 입력으로 변환하는 비퍼지화로서는 보편적인 무게 중심법을 사용했다. 이산연산의 경우에 DU 는 식 (1)과 같다.

$$DU = \frac{\sum_j \mu_j DU_j}{\sum_j \mu_j} \quad (1)$$

퍼지 제어를 실제로 적용할 때, 문제가 되는 것은 제어기의 설계, 즉 퍼지 제어규칙을 어떻게 만드는가 하는 것이다. 기존의 제어이론과는 달리 퍼지 제어는 제어규칙을 구성하는 설계방법은 확립되어있지 않기 때문에, 초기의 제어규칙을 시스템 규명(system identification)과 성능평가(critic)에 따라 계속 수정해 나가야한다.

3 최적화기법을 이용한 퍼지제어기

그림 2은 대상시스템을 포함하는 전체 제어 시스템의 구조이다.

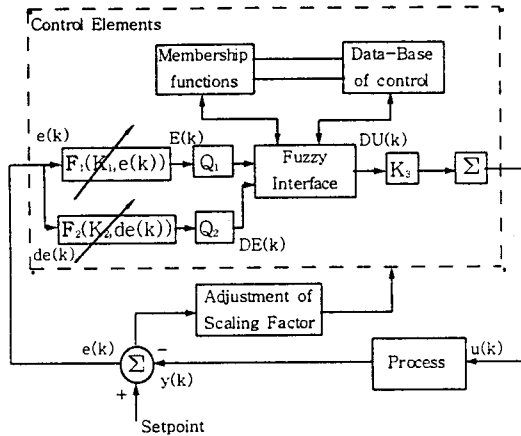


그림 2. 전체 제어시스템의 블록선도
Fig. 2. Block diagram of overall control system.

멤버십 함수는 퍼지한 정도를 지정하여 퍼지집합을 결정하는 요소이며 제어규칙과 합성하여 퍼지 데이터를 얻는데 이용되며, 본 논문에서는 직접 추론법을 선정하였다.

삼각형 퍼지변수를 표시하면 그림 3과 같고 각 변수(Fuzzy set)의 라벨은 다음과 같다.

- NB = Negative Big NM = Negative Medium
- NS = Negative Small ZE = Zero
- PS = Positive Small PM = Positive Medium
- PB = Positive Big

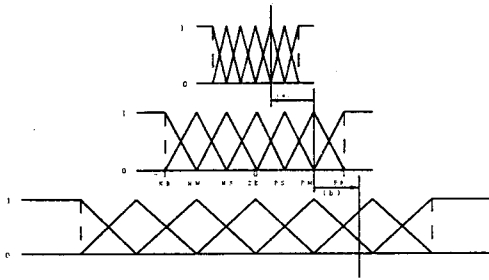


그림 3. 삼각형형의 퍼지변수
Fig. 3. Fuzzy variables of triangular type.

양자화레벨 $E(k)$, $DE(k)$ 는 오차 $e(k)$ 와, 오차변화량 $de(k)$, 그리고 입력 이득요소 k_1 , k_2 의 함수로서 각각 비선형사상되며, 이것은 그림 3에서와 같이 UOD가 $e(k)$ 와 $de(k)$ 에 따라 가변하는 것과 같다. 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(k) = \text{Quantize}[F_1(k_1, e(k))] \quad (2)$$

$$DE(k) = \text{Quantize}[F_2(k_2, de(k))] \quad (3)$$

$$F_1(k_1, e(k)) = \tanh(k_1 e(k)) \quad (4)$$

$$F_2(k_2, de(k)) = \tanh(k_2 de(k)) \quad (5)$$

퍼지추론에서 나온 제어입력의 멤버십함수는 하나의 제어입력 값으로 변환하는 비퍼지화방법으로 보편적인 평균 무게중심법을 사용하였다.

$E(k)$ 와 $DE(k)$ 는 규칙기반(rule base)과 멤버십함수에 추론과 비퍼지화 과정을 거쳐 DU 가 얻어지게

되며 여기에 출력이득요소 K_3 가 곱해져 제어 입력 신호가 된다.

또, 비퍼지화 과정을 거친 DU 는 다음 과정에 의해 새로운 제어입력신호를 얻게 된다.

$$du(k) = DU(k) \times K_3 \quad (6)$$

플랜트 구동에 필요한 조작량 $u(k)$ 는 식(7)과 같다.

$$u(k) = u(k-1) + du(k) \quad (7)$$

표 1. 제어입력을 계산하기 위한 퍼지 규칙

Table 1. Fuzzy_Rule for calculating control input.

de/E	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

제어기에 학습능력을 부여하기 위해서는 성능평가 방법이 선행되어야하며, 최적의 계단응답을 결정하기 위한 성능지수로서 ITAE(Integral of time multiplied absolute error)를 사용하며, ITAE는 식(8)로 정의한다.

$$ITAE = \int |error(t)| \times t \quad \text{또는}$$

$$E = \sum_{t=0}^{\infty} (t \cdot |error(t)|) \quad (8)$$

여기서 오차는 $error = r(k) - y(k)$ 이다.

성능지수로 결정된 ITAE로써 목적함수 E 가 구성되며, 비선형 사상되는 입력요소와 출력이득요소들 동시에 튜닝시킨다.

퍼지 제어기의 목적함수(ITAE)는 수식으로 정규화되지 않은 비선형 동적 특성을 가진다. 또한 목적함수의 미분치를 구하기 어렵기 때문에 일반적인 최적화기법을 적용하기가 어려운 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 콤플렉스기법과 유전알고리즘을 사용하였으나, 콤플렉스기법은 국부최소점(local minimum point)에 빠지기 쉬운 단점이 있으며, 유전알고리즘은 전영역을 탐색하므로 수렴시간이 오래 걸리는 단점을 가지고 있다.

이득요소의 학습법칙은 식(9)와 같으며, 국부최소점에 빠지지 않도록 노이즈항이 추가된 어닐링(annealing)형태이다.

$$k(h+1) = k(h) - \eta^{(h)} \cdot \left(\frac{\partial E(h)}{\partial k} \right) + C(h) N(h) \quad (9)$$

여기서 $k = [k_1, k_2, k_3]^T$ 벡터이며, $C(h) = \exp(-h)$

$N(h)$ 는 잡음원(noise source)이다.

본 논문에서 사용된 스텝 크기는 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{if } E(k^{(h)}) > E(k^{(h-1)}) \\ \eta^{(h)} &= a \eta^{(h-1)} / \|\nabla E(k^{(h)})\| \\ \text{otherwise} \\ &= \eta^{(h-1)} / \|\nabla E(k^{(h)})\| \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $a=0.8$, 초기값 $\eta^{(0)}=1$ 이다.

그림 4은 퍼지 제어기의 이득요소 튜닝에 대한 흐름도이다

$$\nabla E = \frac{\partial E}{\partial k} = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{E(k+\omega) - E(k)}{\omega} \quad (11)$$

여기서 ω 는 양의 아주 작은값이다.

4. 사례 연구

본 논문에서 제안한 방법에 의해 산출한 이득요소를 사용하여 설계한 제어 시스템의 성능평가를 위해 모의실험에 적용한 전동기의 특성은 Torque constant는 1.088[Nm/A], Voltage constant는 1.1 [V/rad/sec], Armature inductance는 10 [mH], Armature resistance는 3.5[Ohm], Moment of inertia는 0.0945 [Kgm]이다. 그리고, 전달함수는 2차계로서 식 (12)과 같다.

$$G(s) = \frac{1}{s(s+3.6)} \quad (12)$$

표 2. 초기치와 이득요소

Table 2. Initial value and scaling factors.

Initial ITAE	17.2552955		
Tuned ITAE	4.2663163		
Initial value	Scaling factor		
	k1	k2	k3
	1.0	0.5	0.5
Tuned value	Scaling factor		
	k1	k2	k3
	0.5483559	1.4353962	0.8599424

표 2에서와 같이 자동동조된 이득요소의 값은 각각 $k_1=0.5483559$, $k_2=1.4353962$, $k_3=0.8599424$ 로, 그리고 선형 이득요소를 이용하였을 때 $k_1=0.8332724$, $k_2=1.976112$, $k_3=0.5569294$ 로 나타났으며, 튜닝된 성능지수는 비선형 이득요소를 사용하였을 때는 표 2에서와 같이 4.2663163로, 선형 이득요소를 이용하였을 때는 4.4258407로 수렴하여 비선형 이득요소가 더 우수한 성능을 보였다.

입력 이득요소인 k_1 , k_2 와, 출력 이득요소인 k_3 이 자동 튜닝되는 과정을 그림 4에 나타내었다. 또, 각 이득요소에 따른 자동동조되는 출력응답을 그림 5에서 나타내었다.

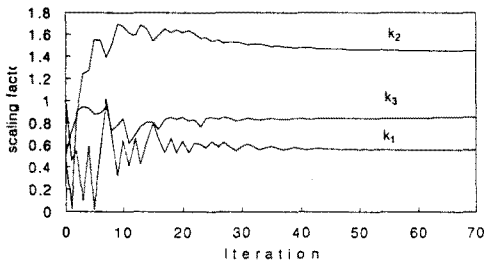


그림 4. 시스템의 입,출력 이득요소

Fig. 4. Input/Output scaling factors of system.

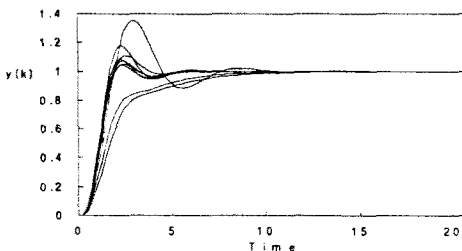


그림 5. 이득요소튜닝에 따른 출력응답

Fig. 5. Output response for scaling factor tuning.

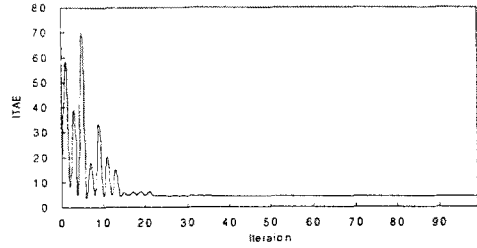


그림 6. 성능지수 ITAE

Fig. 6. ITAE(Integral of time multiplied absolute error).

5. 결 론

퍼지제어기의 성능에 중요한 영향을 미치는 요소들은 제어규칙, 이득요소, 멤버쉽함수, 퍼지추론, 비퍼지화 등을 들 수 있으며, 퍼지제어기의 입,출력단에 작용하는 이득요소(Scaling factor)들은 제어 시스템 출력에 직접적인 영향을 미치므로 이들의 선정에 매우 신중을 기해야 한다. 그러나 체계적인 방법이 제시되어있지 않아 시행착오에 의존하여 왔다. 본 논문에서는 이러한 요소들 중 입,출력 이득요소를 동시에 최적화기법을 이용하여 튜닝시킨다. 또한 입력 이득요소는 비선형으로 사상하였다. 이러한 비선형 사상은 일종의 가변 이득요소라 할 수 있으며, UOD(Universe of discourse)의 범위가 가변하는 것과 같은 효과를 가진다. 모의 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 효용성을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Han-Xiong, L. and Gatland, H. B, "A New Methodology for Designing a Fuzzy Logic Controller" *IEEE Tr. on SMC*, Vol. 25, No 3, March 1995
- [2] L.Zheng, "A practical computer-aided tuning technique for fuzzy control," *2nd IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst. 1993*, San Francisco, Mar. 1993, pp. 702-707.
- [3] A.Boscolo and F. Drius, "Computer aided tuning and validation of fuzzy system," in *1st IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst. 1992*, San Diego, Mar. 1992, pp 605-614.
- [4] S.M. simith and D.J. Comer, "An algorithm for automated fuzzy logic controller tuning," in *1st IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst. 1992, Fuzz-IEEE '92-Proc.*, San Diego, Mar. 8-12, pp. 615-622.
- [5] G.M. Abdelnour, C.H. Chang, F.H. Huang and J.Y. Cheung, "Design of a fuzzy controller using input and output mapping factor." *IEEE Trans.on systems, Man and Cybernetics*, vol.21, No. 5, sep./oct., 1991.
- [6] A. Karimi, "Computer aided design of control Systems using simulated annealing," *M.S thesis, Univ. Calif, San Diego, CA 1988*