

개선된 퍼지 모형화 기법에 의한 퍼지 제어

* 이상용 * 서진현
* 서울대학교 공과대학 전기공학과

Fuzzy Control Using A Modified Fuzzy Modelling

* Sang Yong Lee * Jin Heon Seo
* Dept. of Electrical Eng. Seoul National University

ABSTRACT

Fuzzy modelling is a useful method when the variation of plant dynamics is large. In the fuzzy modelling by parameter identification, a new method is proposed in the part of premise parameters identification and in expanding MISO system into MIMO system. Using the proposed method, a fuzzy model of the drum boiler of the thermal power plant can be derived. In addition, feedwater control of the drum by fuzzy controller using the fuzzy model, is simulated.

1. 서론

플랜트의 수학적 모형을 얻기 힘든 경우나, 플랜트의 동적특성의 변화가 심한 경우에는 종래의 모형에 의한 제어기 설계에 많은 어려움이 있다. 이러한 특성의 플랜트를 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지 이론을 이용한 제어기의 설계방법이 E.H. Mamdani 등에 의해 제안되었다. 퍼지 이론은 수학적으로 다루기 힘든 모호한 사실들을 퍼지집합으로 표현하고, 이를 퍼지연산법에 의해서 추론하여 목적하는 결과를 얻는 이론이다. [4, 5]

퍼지제어기를 설계하는 방법으로서, 전문가의 경험적 지식에 의한 방법, 작업자의 조작모형을 만드는 방법, 학습에 의한 방법, 플랜트의 퍼지모형에 의한 방법 등이 있는데, 퍼지모형에 의한 제어기법은 전문가의 지식이 부족한 플랜트나, 작업자 보다 좋은 제어를 목표로 할 경우에 유용한 기법이다.

퍼지 모형에 의한 제어기법 중에서 M. Sugeno 등이 제안한 퍼지 모형화 기법은, 주어진 수치적 자료로부터 선형모형을 구할 수 있으므로 현대제어 기법을 이용한 제어를 할 수 있는 장점이 있다.

제어대상으로는 발전소 정지시의 보일러 드럼 급수제어를 택하였다. 현재까지 제시되어 있는 드럼에 관한 현대제어 기법은 복잡한 비선형 함수로 나타나는 모형을 몇 개의 동작점을 취하여 선형화 모형을 구한 후, 제어하는 방법을 사용하는 것이다. 그런데, 발전소 터빈 정지시의 경우에는 특별한 정상상태 부분이 존재하지 않으므로, 동작점을 취하여 선형화 모형을 구하는 방법이 용이하지 않다. 그리고, PID 제어의 경우에는 짧은 시간에 출력을 크게 변화시킬 경우, 제어능력을 상실하는 경우가 생기므로 터빈을 정지시키는데 많은 시간을 요하게 된다. 따라서, 복잡한 비선형 시스템에 적용가능한 퍼지 모형화 기법을 적용하는 좋은 대상이 된다.

본 논문에서는 위의 모형화 기법 과정 중에서, 전건부 계수 추정 과정과 다변수 시스템으로 확장시키는 과정에서 개선된 방법을 제시하고, 발전소 정지시, 보일러 드럼의 급수 제어 데이터를 이용하여, 제안된 방법의 효용성을 보였다. 또한 제어 시뮬레이션을 통해, 보일러 드럼의 급수제어에 유용하게 적용될 수 있음을 보였다.

2. 퍼지 모형화 기법

M. Sugeno 등이 제안한 계수 추정에 의한 퍼지 모형은 If-then 형식으로 표현되며, 다음과 같이 나타내어 진다.

$$L^i : \text{if } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_m \text{ is } A_m^i \\ \text{then } y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots + a_m^i x_m \quad (2-1)$$

여기서 $L^i (i=1, 2, \dots, n)$ 는 플랜트의 i 번째 규칙이고, $x_j (j=1, 2, \dots, m)$ 는 입력, y^i 는 i 번째 규칙에 의한 플랜트의 출력을 나타내며, A_j^i 는 사다리꼴의 퍼지변수를 나타낸다.

이러한 n 개의 규칙으로부터 출력 y^0 를 추론하는 방법은,

$$y^0 = \frac{\sum_{i=1}^n \omega^i y^i}{\sum_{i=1}^n \omega^i} \quad (2-2)$$

$$\omega_i = A_{1i}(x_1) \wedge \dots \wedge A_{mi}(x_m) \quad (2-3)$$

로 나타내어 진다. [1] $A_{ji}(x_j)$ 는 퍼지 변수 A_{ji} 의 x_j 에 대한 소속정도(membership value)를 나타내며, ω_i 는 입력에 대한 플랜트 법칙 L_i 의 적합도이다.

퍼지모형의 설정 알고리즘은 다음과 같다. [2]

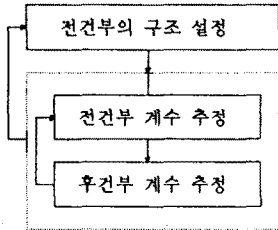


그림2-1 설정 알고리즘

1) 후건부의 계수 추정

후건부의 계수 추정은 전건부 조건의 가정하에서 최소 자승법을 이용하여 목적함수(출력 오차의 평방합)를 최소로 하는 계수를 구하는 것이다. 그 방법은 다음과 같다.

$$P_{i+1} = P_i + S_{i+1} \cdot x_{i+1} \cdot (y_{i+1} - x_{i+1} \cdot P_i) \quad (2-4)$$

$$S_{i+1} = S_i - \frac{S_i \cdot x_i + x_{i+1} \cdot S_i}{1 + x_{i+1} \cdot S_i \cdot x_i^T}, \quad i=0, 1, \dots, k-1 \quad (2-5)$$

$$P = P_k$$

여기서,

$$x_i = [\beta_{1i}, \dots, \beta_{mi}, x_{1i}, \beta_{1i}, \dots, x_{1i}, \beta_{mi}, \dots, x_{ni}, \beta_{1i}, \dots, x_{ni}, \beta_{mi}]$$

$$\beta_{ij} = \frac{A_{ij}(x_{ij}) \wedge \dots \wedge A_{in}(x_{nj})}{\sum_j A_{ij}(x_{ij}) \wedge \dots \wedge A_{in}(x_{nj})} \quad (2-6)$$

$$P = [a_0^1, \dots, a_0^m, a_1^1, \dots, a_1^m, \dots, a_n^1, \dots, a_n^m]$$

m 은 규칙의 수, n 은 입력변수의 수, k 는 주어진 데이터의 수를 나타내며, P 는 후건부 계수들로 이루어진 벡터이다. 초기값인 P_0, S_0 는

$$P_0 = 0, \quad S_0 = a \cdot I$$

I 는 단위행렬이고, a 는 큰 값의 수이다.

2) 전건부의 계수 추정

전건부의 계수 추정은 후건부와 전건부의 구조를 가정한 상태에서 목적함수를 최소로 하는 소속함수의 형태를 구하는 것이다. 여기서는 소속함수를 직선으로 나타내어 소속정도가 0인 점과 1인 점을 추정하여 소속함수의 식을 계산한다. 목적함수를 최소화 시키는 계산은 컴플렉스법을 사용하는데, 점들 사이에 여러 제약 조건이 따르게 된다.

예를 들어, 그림2-2와 같은 규칙이 2개(big, small)인 시스템을 가정한다.

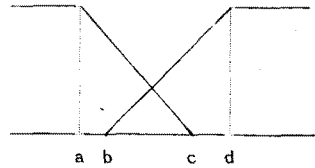


그림2-2 소속 함수

이 때의 제약조건은 a, b, c, d 점들이 데이터가 분포한 곳이나 그 근처에 분포해야만 한다. 만약 a점이 데이터가 분포한 곳에서 멀리 떨어진 곳에 위치한다면, 점 a, c에 의해 생성되어지는 소속함수의 값은 데이터간에 별 차이가 없게 되어진다. 즉, 전건부를 분할하는 의미를 잃게 된다. 따라서 점들의 위치는 제한되어야 한다.

또한, c점은 b점 보다 커야 한다. 만약 b점이 c점 보다 크게 되면 b점과 c점 사이의 데이터는 소속함수 값을 갖을 수 없게 되어 완결성(completeness)가 깨어지게 된다. 따라서, 위의 제약조건이 들어가게 된다.

이러한 제약조건 때문에 기존의 컴플렉스 방법을 이용할 경우, 변수 상호간의 제약으로, f 를 줄이는 새로운 점을 구하지 못하고 작업이 멈추는 문제점이 발생하게 된다.

위의 제약조건을 고려한 전건부 계수 추정의 방법은 다음과 같다.

목적함수를 $f(a, b, c, d)$ 로 하여 f 를 최소화하는 a, b, c, d를 구하는 것을 가정한다. 먼저, 난수를 이용하여 점(a, b, c, d)를 5개 골라서, A, B, C, D, E라 하고, 이들 점에서의 f 의 값, f^A, f^B, f^C, f^D, f^E 를 계산한다. 점A의 좌표를 (a^A, b^A, c^A, d^A) 로 표시하고, 각 f 를 질량으로 하여 무게중심을 구한다. 만일 f^E 가 가장 큰 값을 가진다면, 우선 a^E 부터 a^A 좌표에 대한 무게중심값의 반대편으로 보내어, 그 좌표를 $a^{E'}$ 이라 두고 $(a^{E'}, b^E, c^E, d^E)$ 에 대한 f 값을 계산한다. 계산된 f 의 값이 f^E 에 비해 줄어들었으면, 다음 b^E, c^E, d^E 에 대해 반복해서 계산하며, f 가 줄어들지 않은 좌표에 대해서는 원래의 값을 갖게 한다. 즉, c^E 에 대한 f 의 값만이, c^E 에 대한 f 의 값보다 컸다면, 새로운 좌표점 F의 좌표값은 $(a^{E'}, b^{E'}, c^E, d^E)$ 가 된다. 이후, E점을 제거하고, F점을 추가하여 앞의 방법을 반복하고, f 의 감소율이 작아지는 부분에서 탐색을 멈추고, 새로운 난수에 의한 5개의 출발점으로 부터 앞의 과정을 반복한다. 만일 c를 개선하는 과정에서 b보다 작은 값을 갖게되는 경우에는 c의 값을 b의 값 보다 약간 크게 하여, 제약조건을 만족시킬 수 있다.

3) 전건부의 구조 설정

전건부의 구조 설정은 먼저 m개의 입력 중에서 한개의 입력을 택하여 두 부분(big, small)으로 나누어 전건부 계수추

정과 후건부 계수조정 과정을 통하여 최소화된 목적함수 값을 구한다. 각각의 입력에 대하여 위의 작업을 반복하여, 가장 작은 입력을 고른다. 그 다음, 선택된 입력을 네개의 부분으로 나누어 목적함수의 값을 구하고, 그 입력과 다른 입력의 하나를 택해서, 각각 두 부분으로 나누어 목적함수의 값을 계산한다. 다시 말해서, 처음에는 두 개의 규칙을 갖는 구조를 설정하고, 그 후에 최적의 값을 갖는 입력을 가지고 네 개의 규칙을 갖는 구조로 확장해 나가는 것이다. 일반적으로, 구조를 많이 나눌수록 목적함수의 값이 작아지나, 이는 주어진 데이터에만 충실한 결과를 나타내게 되므로, 적당한 선까지의 확장을 하여야 한다. 규칙의 확장을 제한하기 위해 GMDH법과 같은 방법을 쓰기도 한다. [8]

4) 다출력 시스템으로의 확장

이제까지는 다입력단출력(MISO)의 경우에 대한 방법이고, 각 출력에 대한 규칙을 가지고 다입력다출력(MIMO)의 경우도 확장한다.

우선, 출력변수는 Y_1, Y_2 로, 입력변수는 x_1, x_2, x_3, x_4 라고 가정한다. 그리고 Y_1 에 대한 규칙은 x_1, x_2 각각이 2개의 공간으로 나누어진 4개의 규칙으로 이루어졌고, Y_2 에 대한 규칙은 x_2, x_3 가 각각 2개의 공간으로 나누어진 4개의 규칙으로 이루어졌다고 가정한다. 이 경우에 x_2 는 Y_1, Y_2 에 중복되어 있으나, 나누어진 공간의 형태는 일치하지 않는다. 따라서 각 출력에 대한 4개의 규칙에 논리곱을 취하여 다출력 시스템에 대한 16개의 규칙을 얻는다.

이렇게 하여 얻은 다출력 시스템의 소속함수는, 논리곱에 의해 각 데이터 쌍에 의한, Y_1 에 대한 소속함수값과, Y_2 에 대한 소속함수값 중 작은 값을 갖거나 또는, 그보다 더 작은 값을 취하게 되어, 각 출력에 대한 소속함수값을 잘 따르지 못하는 경우가 생기게 된다. 예를 들어, 각 데이터 쌍에 대해, Y_1 의 소속함수값이 Y_2 의 소속함수값에 비해 대체적으로 작다면, 다출력 시스템이 Y_1 에 대해서는 대체로 좋은 결과를 나타내나, Y_2 에 대해서는 좋지않은 결과를 나타내게 된다.

이런 점을 개선하기위해 각 출력의 공간을 나누는 데 쓰여진 입력변수 x_1, x_2, x_3 를 가지고, 다입력다출력에서 사용되었던 알고리즘을 반복한다. 이 경우에 Y_1 에 대한 목적함수를 f_{Y1} , Y_2 에 대한 목적함수를 f_{Y2} 라 할 경우, 목적함수는 다음과 같이 주어진다.

$$F = a_1 \cdot f_{Y1} + a_2 \cdot f_{Y2} \quad (a \text{는 가중치}) \quad (2-7)$$

이렇게 하여, F를 최소로 하는 규칙을 구할 경우에 위의 방법보다 적은 수의 규칙으로, 보다 작은 F값을 갖는 다출력 시스템을 얻을 수 있다. 또한 처음부터 다입력다출력 시스템을 고려하여 F를 계산할 경우보다 목적함수의 식 계산등에서 계산시간을 줄일 수 있는 장점이 있다.

3. 퍼지 모형을 이용한 퍼지 제어기

퍼지 모형을 이용한 퍼지 제어기는, 모형의 규칙 하나하나로부터 제어 규칙을 유도하고, 이를 모아서 퍼지 제어를 구성한다. 즉, 플랜트의 하나의 규칙 Li 에 대응하는 제어기 규칙을 Ri 로 하며, Ri 의 전건부는 Li 의 전건부와 같은 형태를 가진다. 이때, Li 의 전건부에는 통상 입력에 대한 항들이 나타나기 때문에, 제어기 규칙 Ri 에 의한 출력인, 플랜트 입력이 제어기 규칙의 전건부 변수로 나타나게 된다. 그러므로, Li 와 Ri 의 정합성을 고려하여 통상의 하중치 평균법을 수정하여야만 한다. 왜냐하면, 제어규칙 Ri 는 플랜트규칙 Li 에 자신의 출력을 직접 입력한 것으로 구한 것이나, 실제로 플랜트에 입력되는 것은 각 제어규칙의 출력의 하중치 평균이므로 제어규칙을 구할때의 가정이 성립되지 않기 때문이다.

제어기 Ri 에 의한 플랜트 입력을 u_i 라 하고, 이에의한 플랜트규칙 Li 의 출력을 \tilde{y}_i 라 가정한다. 그리고, 제어기 출력의 추론 결과를 u_0 라 가정하고, 이를 플랜트규칙 Li 에 적용하여 얻은 출력을 y_i 라 가정한다. 이 경우에 정합성의 조건은 다음 식과 같이 나타내어 진다.

$$y_0 = \frac{\sum_i \omega_i y_i}{\sum_i \omega_i} = \frac{\sum_i \omega_i \tilde{y}_i}{\sum_i \omega_i} \quad (2-8)$$

각각의 플랜트 입력 u_i 는 현대제어 기법을 이용하여 계산해 내며, 위의 정합성 조건으로 부터 플랜트로의 실제 입력인 u_0 를 구하게 된다. 다입력다출력 시스템의 경우에도 식 (2-8)과 유사한 형태의 정합성 조건식이 사용되어 진다.

4. 시뮬레이션

제안된 방법의 효율성을 보이기 위해, 화력 발전소의 보일러 드럼을 모형화 하였다.

발전소 드럼의 모형은 K. J. Aström의 모형[6]에 의해 3차라 가정하며, 입력은 급수량, 연료량과 밸브의 위치이고, 출력은 전력과 드럼의 수위이다. 여기서는 수위 대신에 드럼내의 물의 부피를 출력으로 하였다. 그리고, 퍼지 모형을 구하기 위한 데이터로써, 발전소 정지시의 데이터를 이용하였다.

다입력다출력시의 퍼지 모형화 기법에 의한 모형은 그림 4-1과 같으며, 그림 4-2는 개선된 방법에 의한 다입력다출력 시스템의 모형이다. 다입력다출력시와 거의 비슷하게 잘 모형화되어짐을 볼 수 있다.

퍼지모형에 대한 i 번째 규칙의 식은 다음과 같다.

$$y_i^1[n] = a_{11}^i \cdot y_1^1[n-1] + a_{12}^i \cdot y_1^1[n-2] + a_{13}^i \cdot y_1^1[n-3] + b_{11}^i \cdot u_1^1[n-1] + b_{12}^i \cdot u_1^1[n-2] + b_{13}^i \cdot u_1^1[n-3] + b_{14}^i \cdot u_2^1[n-1] + b_{15}^i \cdot u_2^1[n-2] + b_{16}^i \cdot u_2^1[n-3] + b_{17}^i \cdot u_3^1[n-1] + b_{18}^i \cdot u_3^1[n-2] + b_{19}^i \cdot u_3^1[n-3] + d_1 \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned}
 y_2^i[n] = & a_{21}^i \cdot y_2^i[n-1] + a_{22}^i \cdot y_2^i[n-2] + a_{23}^i \cdot y_2^i[n-3] \\
 & + b_{21}^i \cdot u_1^i[n-1] + b_{22}^i \cdot u_1^i[n-2] + b_{23}^i \cdot u_1^i[n-3] \\
 & + b_{24}^i \cdot u_2^i[n-1] + b_{25}^i \cdot u_2^i[n-2] + b_{26}^i \cdot u_2^i[n-3] \\
 & + b_{27}^i \cdot u_3^i[n-1] + b_{28}^i \cdot u_3^i[n-2] + b_{29}^i \cdot u_3^i[n-3] \\
 & + d_2 \quad (4-2)
 \end{aligned}$$

위의 식으로부터, 현대제어기법을 이용하기 위한 상태방정식을 만들면,

$$X^i[n+1] = A^i \cdot X^i[n] + B^i \cdot U^i[n] + d^i \quad (4-3)$$

$$Y^i[n] = C^i \cdot X^i[n] \quad (4-4)$$

여기서,

$$A^i = \begin{pmatrix} a_{11}^i & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{21}^i & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{12}^i & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & a_{22}^i & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{13}^i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{23}^i & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

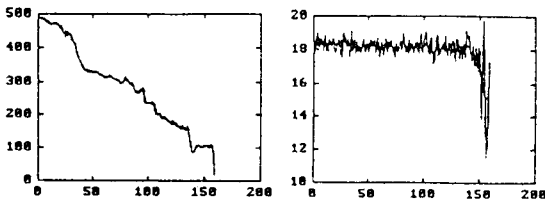
$$B^i = \begin{pmatrix} b_{11}^i & b_{12}^i & b_{13}^i \\ b_{21}^i & b_{22}^i & b_{23}^i \\ b_{14}^i & b_{15}^i & b_{16}^i \\ b_{24}^i & b_{25}^i & b_{26}^i \\ b_{17}^i & b_{18}^i & b_{19}^i \\ b_{27}^i & b_{28}^i & b_{29}^i \end{pmatrix} \quad D^i = \begin{pmatrix} d_1^i \\ d_2^i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C^i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

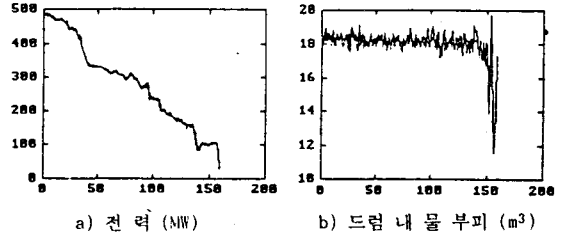
위의 상태 방정식을 이용하여, 입력의 크기를 제한하면서, 다음 스텝의 출력을 따라가는 제어입력을 구하면(7),

$$\begin{aligned}
 u^i[n] = & -(R^i + B^i C^i P^i C^i B^i)^{-1} \cdot B^i C^i P^i \\
 & \cdot (C^i A^i X^i[n] + C^i D^i - r^i) \quad (4-5)
 \end{aligned}$$

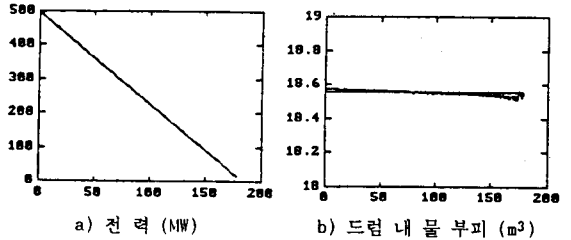
로 표시된다. 여기서, R과 P는 각각 입력과 출력에 대한 가중행렬을 나타내며, r은 다음 스텝에 따라가야 할 출력의 값을 나타낸다. 이렇게 구한 r값들과, 앞에서 제시한 청합성에 대한 조건을 이용하여, 드럼의 수위를 일정하게 유지하면서, 3시간 동안에 전력을 30MW이하로 떨어뜨리는 제어를 시뮬레이션하였다. 그림4-3에서 보듯이, 퍼지 모형에 의한 시스템이 잘 제어됨을 알 수 있다.



4-1 데이터의 대한 MISO 시스템의 모형



4-2 데이터에 대한 MIMO 시스템의 모형



4-3 퍼지 제어에 의한 출력

5. 결론

본 논문에서는 퍼지 모형화 기법에서, 전건부 계수 추정 과정과 다입력다출력 시스템으로의 확장 과정에서의 개선된 방법을 제시하였다. 또한, 발전소 정지시의 보일러 드럼의 급수제어를 통해, 개선된 방법의 유용성을 보였다.

추후과제로는 실제 시스템의 응용을 위해, 개회로 실험을 통해, 시스템의 출력에 영향을 끼치는 변수들을 정하고, 이들에 의한 퍼지 모형을 구하는 문제가 되겠다.

6. 참고 문헌

- [1] M. Sugeno and T. Takagi, "Multi-Dimensional Fuzzy Reasoning," Fuzzy Set and System 9, 1983.
- [2] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-15, No.1, 1985.
- [3] M. Sugeno and G.T. Kang, "Fuzzy Modelling and Control of Multilayer Incinerator," Fuzzy Set and System 18, 1986.
- [4] C.C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. 20, No.2, 1990.
- [5] C.C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part II," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. 20, No.2, 1990.
- [6] K.J. Aström and R.D. Bell, "Simple Drum-Boiler Models," IFAC Symposium Power Systems. Modelling and Control Application, Brussel, 5-8 Sep. 1988.
- [7] F.L. Lewis, Optimal Control, John Willey & Sons, 1986.
- [8] 박민용 외, 퍼지 제어 시스템, 대영사, 1990.