

보일러 터빈 플랜트의 퍼지 논리 제어에 관한 연구

김 호동 * 김 옹호 안 상철 권 육현
서울대학교 공과대학 제어계측공학과

A Study on the Fuzzy Logic Control for Boiler-Turbine System

Ho-Dong Kim * Yong-Ho Kim Sang-Chul Ahn Wook-Hyun Kwon
Dept. of Control & Instrumentation Eng.
Seoul National University

ABSTRACT

To reduce the complexity in constructing a fuzzy logic controller of multivariable systems, three major methods are presented. One is the method of constructing single-input-single-output fuzzy logic controllers after decoupling the target system. Another is the method of using fuzzy relation matrices which indicate the relation between each input and output. The other is the method of using the hierarchically classified inputs which dominantly influence one output than other inputs. Using the last two methods, simulation results of fuzzy logic controller implemented on 160MW boiler-turbine plant model are also shown.

1. 서론

Lofti Zadeh 교수에 의해 만들어진 퍼지 로직 (fuzzy logic) 혹은 퍼지 집합 이론 (fuzzy set theory)은 Mamdani와 Assilian에 의해 제어기에 적용[5]됨으로써 퍼지 논리 제어기 (Fuzzy Logic Controller)가 나오게 되었다. 퍼지 논리를 기본으로하는 퍼지 논리 제어기는 이 세상의 애매 모호하고 불분명한 여러 사실을 논리화할 수 있다는 점과 그 논리가 인간의 생각하는 방식과 흡사하고 우리가 사용하는 일반 언어를 사용한다는 점을 그 특징으로 하기 때문에 플랜트의 모델이 잘 알려져 있지 않거나 기존의 방식으로 잘 정의가 안 되어지는 플랜트 즉 비선형성이 강한 플랜트에 적용이 유리[6]하나 그 대신에 그 플랜트에 대한 전문가의 지식이 필요하다. 이러

한 점들을 고려하여 대상 플랜트로 보일러-터빈 시스템[1][2]을 선택하였는데 이 플랜트는 전기적 출력과 드럼 증기압, 그리고 드럼내의 수위를 세개의 밸브로 조절하여 안정된 출력을 낼 수 있도록 제어 시스템이 설계되어야 발전소의 안전을 보장할 수 있다. 특히 이 시스템은 세개의 입력과 세개의 출력을 가지는 다변수 시스템으로 입력과 출력이 서로 복잡하게 연관되어 강한 비선형성을 나타내고 있어 퍼지 논리 제어기로 제어하기에 적합한 성질을 가지고 있다. 입력과 출력 사이의 관계가 서로 복잡하게 연관되어 있는 다변수 시스템을 퍼지 집합 논리로 제어하는 경우 제어기 설계를 쉽게하기 위해 세 가지 정도의 방법이 있다. 플랜트 입력과 출력 사이를 감결합 (Decoupling)한 후 제어기를 구성하는 방법[4]과, 각 입력과 출력 사이의 퍼지 관계 연산 행렬 (Fuzzy Relation Matrix)을 구해 제어하는 방법[8], 계층적으로 각 출력에 가장 영향을 많이 주는 입력만을 취해서 하나의 출력 제어에 하나의 입력만을 사용하는 방법[7]이 있다. 본 논문에서는 뒤의 두가지 방법을 사용하여, 보일러-터빈 시스템 모델에 퍼지 논리 제어기를 구성하여 모의 실험을 해보고 그 결과를 보였다.

2. 대상 플랜트 모델

본 논문에서 제어 대상으로 선택한 시스템은 Bell과 Åström에 의하여 잘 알려진 160MW 화력 발전기용 보일러-터빈 시스템[1][2][9]으로 보일러-터빈 시스템의 비선형 동특성을 수식적으로 표현한 많은 모델식들 중에서도 여기서 선택한 모델식은 Bell과 Åström의 많은 모의 실험을 통하여 그 신뢰도가 입증된 것이다. 보일러-터빈 시스템의 비선형 모델식은 다음과 같다.

- 비선형 모델식

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= -0.0018 u_2 x_1^{9/8} + 0.9 u_1 - 0.15 u_3 \\
 \dot{x}_2 &= (0.073 u_3 - 0.016) x_1^{9/8} - 0.1 x_2 \\
 \dot{x}_3 &= (141 u_3 - (1.1 u_2 - 0.19) x_1)/85 \\
 y_3 &= 0.05(0.13073 x_3 + 100 a_{cs} + q_e/9 - 67.975) \\
 a_{cs} &= (1 - 0.001538 x_3)(0.8 x_1 - 25.6) \\
 &\quad / (x_3(1.0394 - 0.0012304 x_1)) \\
 q_e &= (0.854 u_2 - 0.147) x_1 + 45.59 u_1 - \\
 &\quad 2.514 u_3 - 2.096 \dots \dots \dots (1)
 \end{aligned}$$

- 계수

a_{cs} : 증기의 질

q_e : 증발률 (Kg/s)

- 입력

u_1 : 보일러 연료 조절기의 위치

u_2 : 터빈으로의 증기의 양 조절 밸브 위치

u_3 : 급수 조절기의 위치

- 상태 변수

x_1 : 드럼 증기압 (kg/cm²)

x_2 : 전기적 출력 (MW)

x_3 : 드럼내의 유체의 농도 (kg/cm³)

- 출력

$$y_1 = x_1$$

$$y_2 = x_2$$

y_3 : 드럼의 수위 (m)

앞에서 보는 바와같이 보일러-터빈 플랜트 모델식은 세 개의 입력과 세 개의 출력을 갖고 이 중 입력은 정규화되어 다음 식과 같은 제한을 갖는다.

$$\begin{aligned}
 0 < u_1 \leq 1, |u_1| \leq 0.007 / \text{sec} \\
 0 \leq u_2 \leq 1, -2 / \text{sec} \leq u_2 \leq 0.02 / \text{sec} \\
 0 \leq u_3 \leq 1, |u_3| \leq 0.05 / \text{sec} \dots \dots \dots (2)
 \end{aligned}$$

퍼지 논리 제어기 구성에서 가장 중요하고 또한 퍼지 추론에 필수적인 제어 규칙들은 앞의 플랜트 비선형 모델식을 사용하여 개루우프 모의 실험 (Open Loop Plant Simulation) 을 거듭 반복하여 실행함으로써 얻어 내었다. 개루우프 모의 실험의 결과를 보면 보일러-터빈 시스템의 강한 비선형성을 잘 알 수 있는데 세개의 입력 각각이 세 개의 출력 각각에 영향을 미치고 상태 변수의 각 값에 따라 동일 입력에 대한 출

력 값이 달라진다. 다음은 개루우프 특성 중 몇 개를 나타내었다.

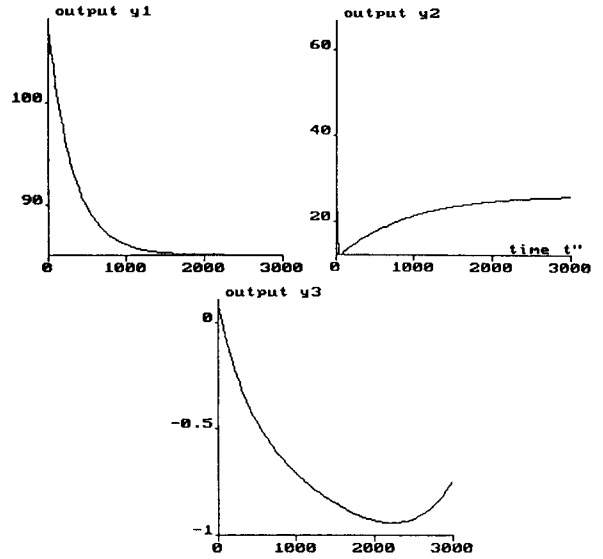


그림 1. 개루우프 특성 곡선

3. 퍼지 논리 제어기 설계 방법

다입력·다출력 퍼지 논리 제어기를 설계하는 방법에는 여러가지가 있을 수 있겠으나 단일 입·출력에서와 같이 모든 출력의 각 상태에 대한 제어 입력을 결정하여 플랜트의 입력으로 사용할 경우에는 사용되는 제어 규칙의 수가 커지고 연산이 느려지며 참조표 (Look Up Table)를 사용하는 경우 그 크기가 너무 커지게 되어 제어가 어려워진다. 따라서 이를 해결할 여러가지 방법들이 제시되는데 이는 대표적으로 세 가지 정도로 나누어 볼 수 있다. 첫번째는 감결합 방법 (Decoupling Method)에 의해 입·출력 사이에 복잡하게 얽혀 있는 특성을 감소시켜 단일 입·출력 퍼지 논리 제어기를 구성하는 방법이다. 이 경우 퍼지 논리 제어기 구성은 연관성 깊은 각각의 입력과 출력에 대한 퍼지 논리 제어기 구성으로 한정되기 때문에 사용되는 제어 규칙의 수나 참조표의 크기가 현저하게 작아지게 되고 그 구성이 간단하게 된다. 그러나 이 경우 연관성 깊은 입력과 출력을 찾아내는데 플랜트에 대한 정확한 모델식을 사용 복잡한 수식을 사용하거나 이를 찾기가 어려운 점이 있다. 또한 이와 유사한 방법으로 Kumar S. Ray 와 D. Dutta Majumder에 의해 200MW 증기 발생 장치를 대상으로 퍼지 논리 제어기를 설계하여 실험한 결과가 보고되어 있다[4].

두번째 방법은 Madan M. Gupta 등에 의해 제안된 방법[8]으로 퍼지 관계 연산 행렬 (Fuzzy Relation Matrix)을

사용하여 제어하는 방법이다. 퍼지 관계 연산 행렬이란 각 출력과 각 입력 사이의 관계를 퍼지 집합 이론을 사용하여 나타낸 행렬로 본 논문에서 대상으로 하는 보일러-터빈 시스템의 경우 세개의 입력과 세개의 출력을 사용하므로 아홉 개의 퍼지 관계 연산 행렬이 만들어지고 이는 다음의 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 R_{11} &= \bigvee_{i=1}^n \{ Y_{1(i)} \wedge U_{1(i)} \}, \\
 R_{21} &= \bigvee_{i=1}^n \{ Y_{2(i)} \wedge U_{1(i)} \}, \\
 R_{31} &= \bigvee_{i=1}^n \{ Y_{3(i)} \wedge U_{1(i)} \}, \\
 R_{12} &= \bigvee_{i=1}^n \{ Y_{1(i)} \wedge U_{2(i)} \}, \\
 R_{22} &= \bigvee_{i=1}^n \{ Y_{2(i)} \wedge U_{2(i)} \}, \\
 R_{32} &= \bigvee_{i=1}^n \{ Y_{3(i)} \wedge U_{2(i)} \}, \\
 R_{13} &= \bigvee_{i=1}^n \{ Y_{1(i)} \wedge U_{3(i)} \}, \\
 R_{23} &= \bigvee_{i=1}^n \{ Y_{2(i)} \wedge U_{3(i)} \}, \\
 R_{33} &= \bigvee_{i=1}^n \{ Y_{3(i)} \wedge U_{3(i)} \}. \dots \dots \dots (3)
 \end{aligned}$$

여기서 n 은 제어 규칙의 수를 나타내고, Y 와 U 는 각각 플랜트의 출력값과 입력값의 퍼지 값 (Fuzzy Value)이다. \bigvee 는 최대값, \wedge 는 최소값을 나타내는 연산자이다.

따라서 퍼지 집합 논리 (Fuzzy Set Theory)를 사용하여 한 출력과 한 입력과의 상관 관계만을 생각함으로써 플랜트의 입력을 간단히 계산할 수 있는 장점이 있다. 플랜트의 입력은 다음의 식과 같이 계산되어진다.

$$\begin{aligned}
 U_1 &= (Y_1 \circ R_{11}) \wedge (Y_2 \circ R_{21}) \wedge (Y_3 \circ R_{31}) \\
 U_2 &= (Y_1 \circ R_{12}) \wedge (Y_2 \circ R_{22}) \wedge (Y_3 \circ R_{32}) \\
 U_3 &= (Y_1 \circ R_{13}) \wedge (Y_2 \circ R_{23}) \wedge (Y_3 \circ R_{33}) \\
 &\dots \dots \dots (4)
 \end{aligned}$$

여기서 \circ 는 퍼지 최대·최소 합성 관계 연산자 (Max-Min Composition of Fuzzy Relation)를 나타내고 이는 다음과 같이 정의된다.

$$X \circ Y = \bigvee_{i=1}^n \{ X_{(i)} \wedge Y_{(i)} \} \dots \dots \dots (5)$$

세번째 방법은 G. V. S. Raju 등에 의해 제안된 것으로 계층적으로 입·출력 변수군을 선별, 선택하여 제어하는 방법 [7]이다. 이 경우 제어 규칙은 다음과 같이 특수하게 주어지게 된다.

첫번째 단계의 제어 규칙 :

If (X_1 is $a_{1,1}$, X_2 is $a_{1,2}$, $\dots \dots \dots$, X_{n1} is $a_{1,n1}$)
then output Y_1 is b_1 .

i 번째 단계의 제어 규칙 :

If (X_{n1+i} is $a_{n1,1}$, $\dots \dots \dots$, X_{n1+ni} is $a_{n1,ni}$)
then output Y_i is b_i .

이를 제어 규칙에 적용하면 출력의 상태에 따라 각 출력에 가장 크게 영향을 미치는 입력군을 결정한다. 플랜트 운전 시 이 상태에 도달하면 이 출력값을 제어하는데 미리 결정된 입력만을 사용하여 이 출력을 제어하게 된다. 따라서 한 출력에 대하여 이를 제어하는 각 입력군의 정보가 미리 만들어져 있어야 하고 어떤 상태에서는 출력을 기준값에 도달하게 하는 데 몇개의 입력이 안 쓰일 수도 있다.

4. 모의 실험 (Simulation)

앞에서 설명한 다입력·다출력인 경우의 퍼지 논리 제어기 설계 방법중 두번째와 세번째 방법을 각각 사용하여 모의 실험을 실행하였다. 먼저 두번째 방법인 퍼지 관계 연산자를 사용하여 퍼지 논리 제어기를 구성하는 경우에 제어기는 출력 변수의 값을 퍼지화 (Fuzzification) 시키는 부분과 퍼지 관계 연산 행렬을 만드는 부분, 이 관계 연산 행렬을 사용 입력으로 사용될 퍼지 변수를 계산해내는 부분 그리고 입력 퍼지 변수의 값을 역퍼지화 (Defuzzification)하는 부분으로 이루어진다. 출력 쪽의 언어 변수 (Linguistic Variable)로는 LP (Large Positive), SP (Small Positive), NL (Null), SN (Small Negative), LN (Large Negative)의 다섯개로 잡았고, 입력 쪽의 언어 변수로는 LO (Large Open), SO (Small Open), HF (Half), SC (Small Closed), LC (Large Closed)의 다섯개로 잡았다. 각 퍼지 변수들의 멤버십 함수 (Membership Function)의 형태는 11개의 Universe of Discourse 안에서 다음과 같은 값을 지니는 사다리꼴 모양으로 설정하였다.

$$\begin{aligned}
 LP &= 0/0 + 0/1 + 0/2 + 0/3 + 0/4 + 0/5 + 0.1/6 + \\
 &\quad 0.6/7 + 1.0/8 + 0.6/9 + 0.1/10 , \\
 SP &= 0/0 + 0/1 + 0/2 + 0/3 + 0/4 + 0/5 + 0.1/6 + \\
 &\quad 0.6/7 + 1.0/8 + 0.6/9 + 0.1/10 , \\
 NL &= 0/0 + 0/1 + 0/2 + 0.1/3 + 0.6/4 + 1.0/5 + \\
 &\quad 0.6/6 + 0.1/7 + 0/8 + 0/9 + 0/10 , \\
 SN &= 0/0 + 0/1 + 0.1/2 + 0.6/3 + 1.0/4 + 0.6/5 + \\
 &\quad 0.1/6 + 0/7 + 0/8 + 0/9 + 0/10 , \\
 LN &= 0.1/0 + 0.6/1 + 1.0/2 + 0.6/3 + 0.1/4 + 0/5 +
 \end{aligned}$$

$$0/6 + 0/7 + 0/8 + 0/9 + 0/10 .$$

입력의 멤버십 함수는 출력의 멤버십 함수와 같다.

여기에 개루우프 특성으로부터 구한 제어 규칙을 각 출력과 입력에 대하여 적용하여 앞에서 설명한 것과 같은 퍼지 집합 이론의 최대·최소 연산 (Max-Min Operation)을 수행함으로써 퍼지 관계 연산 행렬 $R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{22}, R_{23}, R_{31}, R_{32}, R_{33}$ 를 얻는다. 다음은 이렇게 해서 구한 퍼지 관계 연산 행렬의 하나이다.

$$\begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.1 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.1 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.1 & 0.1 & 0.6 & 1.0 & 0.6 & 0.6 & 0.1 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.1 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.1 \\ 0.0 & 0.0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.6 & 1.0 & 0.6 & 1.0 & 0.6 & 0.1 \\ 0.0 & 0.0 & 0.1 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.6 & 1.0 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.1 & 0.6 & 1.0 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.1 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

이 퍼지 관계 연산 행렬을 살펴보면 행렬의 우상방향에서 좌하방향으로 값들이 먹여져 있음을 알 수 있는데 이는 이 관계 연산 행렬에 해당하는 입력과 출력이 비례함을 나타낸다. 반대로 관계 연산 행렬이 좌상방향에서 우하방향으로 값들이 채워져 있으면 이는 그에 해당하는 입력과 출력이 반비례 관계에 있음을 나타내어 이 퍼지 관계 연산 행렬을 가지고 해당 시스템의 분석이나 특성을 알아낼 수 있다.

입력은 앞에서 소개한 식 (4)에 의해서 구해진다.

모의 실험은 출력 값을 일정한 기준값 즉, $Y_1 = 108$, $Y_2 = 66.65$, $Y_3 = 0.0$ 으로 유지시켜 주도록 제어 입력을 가하였다. 모의 실험의 결과치는 다음의 그림과 같은데 상태 변수가 약 $\pm 10\%$ 정도 변화했을때 출력의 변화를 그림으로 나타내었다.

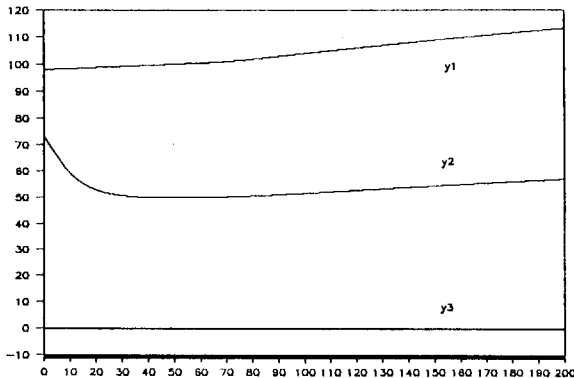


그림 2. 퍼지 관계 연산 행렬을 이용한 모의 실험

위와같이 퍼지 관계 연산 행렬을 이용하여 퍼지 논리 제어기를 구성하는 경우 플랜트의 각각의 출력과 입력과의 관계

를 하나의 행렬 형태로 나타냄으로써 제어 시간이 늦어지거나 오차를 발생시킬 수있다. 이를 퍼지 집합 논리의 최대·최소 연산 등으로 보상하려 하지만 완전한 보상이 이루어지지 않아 오차가 생기게 된다. 따라서 시스템의 상황에 따라 오차를 감소할 수 있으면 이 방법도 다변수 시스템의 제어기 설계를 손쉽게 해줄 수 있을 것이다.

세번째 방법인 계층적으로 구성하는 경우에는 제어를 하기 전에 각각의 상태에서 하나 하나의 출력에 대하여 가장 영향을 많이 주는 입력 즉 그 출력을 가장 많이 변화시킬 수 있는 출력을 찾아내어 이를 제어에 사용한다. 이를 위해 별도의 기억 장소를 할당하였는데 출력의 어떤 상태에서 Y_1 에 가장 영향을 주는 것이 U_2 이고 Y_2 에는 U_3 , Y_3 에는 U_1 이 가장 영향을 준다는 것이 밝혀지면 할당된 기억 장소안의 일부에는 2, 3, 1 이라는 수가 구조체 형태로 들어가 제어시 제어 입력의 결정에 쓰이게 된다. 이의 구조를 보면 다음의 그림과 같다.

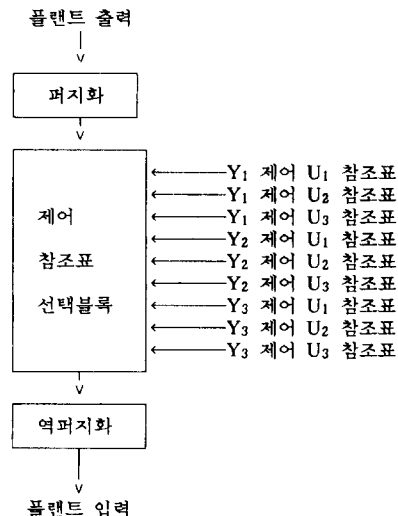


그림 3. 계층적 구조 제어기의 구조

여기서 제어 참조표 선택블록이 각 상태에서 각각의 출력에 대해 가장 영향을 많이 끼치는 입력에 대한 정보를 가지고 그에 따라 각각의 참조표를 선택하는 블록이다. 여기서 각각의 제어 참조표는 개루우프 특성을 통해서 얻어내었다.

이 방법을 사용한 모의 실험 결과는 다음과 같고 앞의 방법과 같이 출력을 일정하게 유지시켜 주는 것을 제어의 목적으로 삼았다.

이 방법의 경우 어떤 출력의 상태에서는 여러 개의 입력에 한개의 입력만이 가장 크게 영향을 미치게 되어 다른 입력은 출력 상태의 변화에 따라 변화하지 않는 경우가 생기게 되

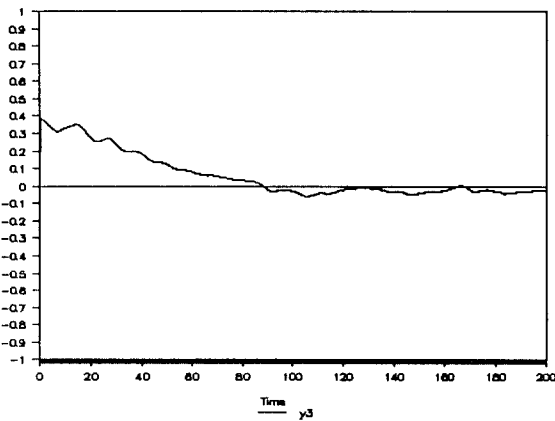
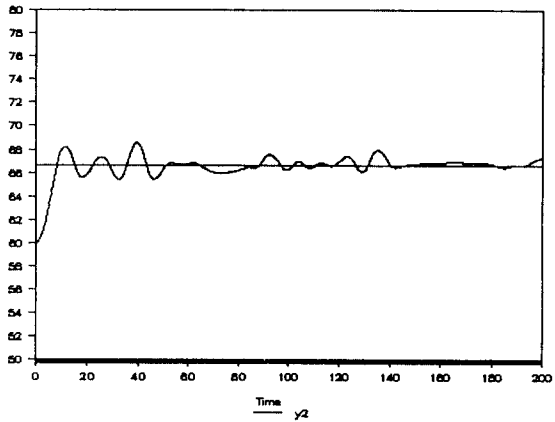
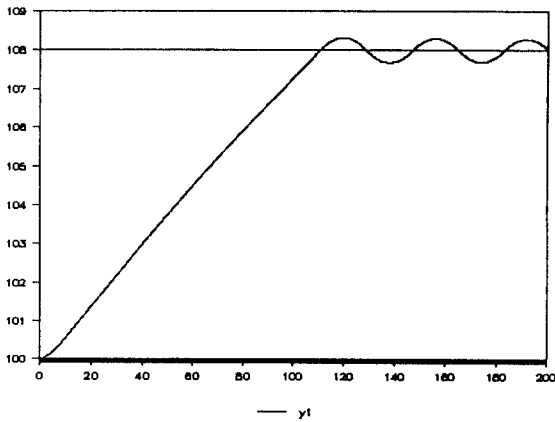


그림 4. 계층적 구조를 사용한 모의 실험

고, 각각의 다른 출력을 제어하는 입력이 같은 경우 제어로 주어지는 입력의 값이 서로 상반되어 실제로는 아무 입력이 주어지지 않는 경우가 생기게 되어 그 결과로 제어가 지연되는 특징을 보이게 된다. 이는 모두 다수개의 출력 제어에 한 개의 입력만을 사용하게 되기 때문에 발생하는 문제로서 제어 참조표 선택 블록 작성시에 다른 출력 제어에 같은 입력이 증

복되지 않게 작성하면 해결된다.

5. 결론

본 논문에서는 다입력·다출력 플랜트인 경우 퍼지 논리 제어기 구성의 복잡함을 감소시킬 수 있는 방법들을 검토하여 그 두가지 방법에 대해서는 160MW 화력 발전기용 보일러-터빈 플랜트 모델을 대상으로 하여 모의 실험을 실행하여 그 결과와 장·단점 등을 들었다. 특히 계층 구조의 퍼지 논리 제어기를 설계할 때 각각의 출력에 대한 가장 영향력 있는 입력군을 선택하기 위해 개루우프 특성에 의한 참조표를 작성하는 알고리즘을 제시하였다. 여기에서 알 수 있듯이 플랜트의 비선형성이 강하고 입력과 출력들이 강하게 결합되어 있을 경우에는 앞의 방법을 사용하여도 오차가 발생하나 허용 오차 범위 안에 있는 경우 다변수 시스템에 대한 퍼지 논리 제어기 설계에 좋은 방법이 될 수 있을 것이다. 발생하는 오차에 대한 정밀한 해석이나 항상 퍼지 논리 제어기의 문제로 제시되어지는 안정성, 강인성에 대한 해석이 앞으로 연구되어야 할 것이다.

4. 참고 문헌

- [1] 권육현, 김상우, 박부건, 김은기, "개선된 LQG/LTR 방법에 의한 보일러-터빈 제어 시스템 설계," 전기학회 논문지 39권2호, 1990년 2월.
- [2] 이시곤, "보일러 터빈 시스템의 견실제어에 관한 연구," 공학석사학위 논문, 1989년.
- [3] 구관모, "로보트의 3차원 충돌회피운동을 위한 퍼지 제어 응용," 공학석사학위논문, 1990년.
- [4] Kumar S. Ray and D. Dutta Majumder, "Fuzzy Logic Control of a Nonlinear Multivariable Steam Generating Unit Using Decoupling Theory," IEEE Tr. on System, Man, and Cybernetics, 1985.
- [5] E. H. Mamdani and S. Assilan, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller," Int. Journal of Man-Machine Studies, Vol.7, 1984.
- [6] Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I and part II," IEEE Tr. on SMC, Vol.20, No. 2, March/April, 1990.
- [7] G. V. S. Raju and Jun Zhou, "Fuzzy Logic Controller to a Steam Generator Feedwater Flow," ACC, 1990.

- [8] Madan M. Gupta, Jerzy B. Kiszka, and G. M. Trojan, "Multivariable Structure of Fuzzy Control Systems," IEEE Tr. on SMC., vol. SMC-16, No.5, Sep./Oct. 1986.
- [9] K. J. Åström and R. D. Bell, "A Simple Drum Level Control," Lund Institute of Technology, May, 1979.