

화력발전 보일러를 위한 퍼지제어기의 설계

문운철
우석대학교 전기공학과

A Fuzzy Control for Boiler System of Fossil-Power Plant

Un-Chul Moon
Electrical Engineering Department of Woosuk University

Abstract - Three single loop fuzzy logic controllers are designed independently for the control of boiler system of fossil-power plant. The control rules and the membership functions of proposed fuzzy logic control system are generated automatically without using plant model. The simulation shows successful results for wide range operation of boiler system of fossil-power plant.

1. 서 론

화력발전용 보일러 시스템은 입출력 상호간이 강하게 연관된 다변수 비선형 시스템으로 묘사되고 있다[1]. 이러한 보일러 시스템의 심한 비선형성과 다중 입출력 특성을 극복하면서 넓은 동작영역으로 효과적인 제어를 위하여 많은 연구들이 수행되어왔다. Hogg와 Ei-Rabaie는 일반 예측 제어 (Generalized Predictive Control, GPC) 기법을 적용하였으며[2], Rovnak과 Corlis는 동역학 행렬 제어 (Dynamic Matrix Control, DMC) 기법을 적용하였다[3]. 기본적으로 이러한 기법들은 선형시스템을 바탕으로 하여 제어하는 방식이다.

보일러 시스템의 심한 비선형성을 극복하기 위하여, 다양한 지능제어 기법 또한 제시되었다. Ray와 Majumder[4]는 대상시스템을 입출력 제한선형화에 의하여 비결합화시킨 후, 이를 바탕으로 퍼지제어기를 구성하는 방식을 제안하였다. Prasad 등은 인공 신경망 모델을 바탕으로 한 예측제어기를 제시하였다[5]. Dimeo와 Lee는 넓은 동작영역에서의 효과적인 제어를 위하여, 유전자 알고리즘을 이용하여 기존의 PI 제어기와 LQR 제어기의 설계변수를 결정하였다[6]. Alturki와 Abdennour는 신경망-퍼지 시스템 제어기를 제시하였다[7]. 그들은 각 동작영역에서 설계된 여러 개의 LQR 제어기를 하나의 신경망-퍼지 시스템에 학습시키는 방식을 제시하였다.

본 논문에서는 [8]에서 저자가 제시한 퍼지 자동회귀 이동평균 (Fuzzy Auto-Regressive Moving Average, FARMA) 제어기를 화력 발전의 보일러 시스템에 적용하였다. 저자들은 [8]에서 대상시스템의 수식적 모델을 이용하지 않는 실시간 퍼지 적용 제어기를 제시하였다. 기존의 퍼지제어기가 전문가에 의해 형성된 퍼지 제어 룰을 사용하는데 반하여 퍼지 자동회귀 이동 평균 제어기는 실시간으로 퍼지 제어 룰을 형성하고 개선해나가는 구조이다. 따라서 제어룰을 형성하는데 전문가의 의존하지 않게 되는 장점이 있다.

이러한 FARMA 제어기를 보일러에 적용하기 위하여, 먼저 일반적으로 사용되는 비선형 3 입력 3 출력 모델을 대상시스템으로 선정하였다. 그 후, 단일

루프 제한을 위하여, 중요한 연관성을 갖는 3개의 입출력 쌍을 선정하였다. 결정된 3개의 제한 루프는 3개의 독립된 퍼지 자동회귀 제어기에 의하여 독립적으로 제어된다. 최종적으로 제시된 제어시스템의 성능을 확인하기 위하여 넓은 동작 영역을 대상으로 한 컴퓨터 모의 실험 결과를 제시하였다.

2. 퍼지 자동회귀 이동평균(FARMA) 제어기

2장에서는 저자들이 제시한 퍼지 이동평균 제어기의 개요를 소개한다[8].

2.1 FARMA 제어규칙

FARMA 제어규칙은 다음과 같은 형태로 정의된다.

IF y_{ref} is A_{1i} , $y(k)$ is A_{2i} , $y(k-1)$ is A_{3i} , ..., $y(k-n+1)$ is $A_{(n-1)i}$, AND $u(k-1)$ is B_{1i} , $u(k-2)$ is B_{2i} , ..., $u(k-m)$ is B_{mi} , THEN $u(k)$ is C_i (i -번째 제어규칙) (1)

여기서,
 n, m : 입출력 변수의 갯수,
 A_{ij}, B_{ij} : i -번째 제어규칙의 전건부 언어변수,
 C_i : i -번째 제어규칙의 후건부 언어변수.

이때, 언어적인 퍼지 변수 A_{ij}, B_{ij} , 와 C_i 는 미리 적절하게 가정된 입출력 범위를 바탕으로 하여, 해당되는 crisp 입출력값을 이용한 퍼지화(Fuzzification)로서 지정된다. (1)와 같은 형태의 제어규칙은 매 이산시간마다 생성되어 제어규칙베이스에 저장된다.

2.2 퍼지추론 및 역퍼지화(Defuzzification)

새로운 플랜트의 입출력쌍이 제어기에 입력되면, 먼저 각 제어규칙 전건부와의 적합도(Truth value)가 계산된다. FARMA 제어기에서는 다음과 같이 적합도와 제어규칙 후건부 C_i 의 ϕ -연산[9]를 이용하여 제어기의 출력 퍼지집합 C_n 을 계산한다.

$$C_n = \bigcap_i (\omega_i \phi \mu_{C_i}) \quad (2)$$

$$\omega_i \phi \mu_{C_i} = \begin{cases} 1 & \text{if } \omega_i \leq \mu_{C_i} \\ \mu_{C_i} & \text{if } \omega_i > \mu_{C_i} \end{cases} \quad (3)$$

여기서,
 C_n : 출력 퍼지집합,
 ω_i : i -번째 제어규칙의 적합도,
 μ_{C_i} : C_i 의 소속정도(memberhip degree).

역퍼지화는 일반적으로 출력 퍼지집합 C_n 으로부터 crisp한 제어기의 출력 $u(k)$ 를 결정하는 과정이다. FARMA 제어기에서는 (2)과 같이 추론된 출력퍼지집

합 C_n 에 대하여 그 최대값인 $\alpha = \max \mu(C_n)$ 으로 α -cut을 시행한 후, 이를 순수 제어범위(Net Control Range, NCR)로 정의한다. NCR은 가정된 출력범위 $[a, b]$ 의 부분집합으로써, "가장 높은 가능성을 갖는 $u(k)$ 의 범위"라는 물리적인 의미를 갖는다.

최종적인 제어기의 출력 $u(k)$ 는 플랜트의 예상 출력 $(k+1)$ 과 $k+1$ 시간에서의 임시 목표값 $y_r(k+1)$ 을 다음과 같이 생성, 비교함으로써 구해진다.

$$y_r(k+1) = y(k) + \beta(y_{ref} - y(k)), \quad (4)$$

여기서 β 는 목표추종상수(Target Ratio Constant)로써 0에서 1사이의 고정된 값을 갖는다. 최종적인 제어기의 출력 $u(k)$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$u(k) = \begin{cases} (u(k-1) + q)/2 & \text{for } y_r(k+1) < \hat{y}(k+1) \\ (p + u(k-1))/2 & \text{for } y_r(k+1) > \hat{y}(k+1) \end{cases} \quad (5)$$

여기서 p 와 q 는 각각 NCR의 하한과 상한이다.

2.3 제어규칙 베이스의 자동 구성

앞장에서 기술된 FARMA 제어규칙은 매 이산 시간마다 생성된다. 생성된 각 제어규칙은 $(n+m+1)$ 차원 제어규칙 공간(Rule space) $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{(n+m+1)i})$ 에서 하나의 점으로 표현 될 수 있다. 제어규칙 베이스를 개선하기 위해서 다음과 같은 평가함수가 정의된다.

$$J = |y_r(k+1) - y(k+1)|, \quad (6)$$

여기서, $y(k+1)$ 은 $k+1$ 번째 이산시간에서 실제 측정된 플랜트의 출력이며, $y_r(k+1)$ 은 k 번째 이산시간에서의 임시 목표값이다. 따라서 J 는 k 번째 이산시간에서의 제어의 결과로서 $k+1$ 번째 이산시간에서 계산된다.

이때, 각 변수 x_i 에 대하여 몇 개의 구간으로 분할함으로써, 퍼지 제어규칙 공간은 유한한 부공간(Subspace)들로 분할되게 한다. 만일 동일한 부공간에 더 작은 J 를 갖는 제어규칙이 생성되면, 기존의 제어규칙은 새로운 제어규칙으로 대체된다. 따라서 시간이 지날수록 대상 플랜트를 학습하는 것이 가능하게 된다. 그림 1은 이러한 FARMA 제어기의 구성도를 나타낸다.

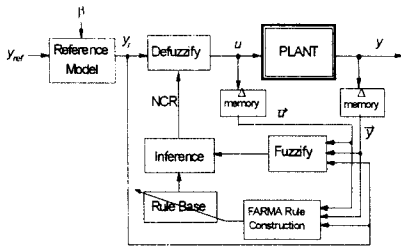


그림 1. FARMA 제어기의 구성도

Fig. 1. The FARMA control system architecture.

3. 발전용 보일러 시스템 제어

3.1 보일러 시스템 모델

본 논문에서는 비선형 보일러 시스템의 동역학을 위하여 가장 널리 사용되는 벨과 웅스트롬의 모델을 이용하여 모의실험을 실시한다. 이의 3차 비선형 다변수 상태방정식은 다음과 같다[1].

$$\dot{x}_1 = -0.0018u_2x_1^{0.8} + 0.9u_1 - 0.15u_3, \quad (7)$$

$$\dot{x}_2 = [(0.73u_2 - 0.16)x_1^{0.8} - x_2]/10 \quad (8)$$

$$\dot{x}_3 = [141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1]/85 \quad (9)$$

$$y_2 = x_2 \quad (10)$$

$$y_1 = x_1 \quad (11)$$

$$y_3 = 0.05(0.13073x_3 + 100a_{cs} + q_c/9 - 67.975) \quad (12)$$

여기서,

$$a_{cs} = \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_1(1.0394 - 0.0012304x_1)} \quad (13)$$

$$q_c = (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \quad (14)$$

상태변수 x_1, x_2 과 x_3 는 각각 드럼내 증기압력 (P , [kg/cm²]), 전기적 출력 (E , [MW]) 그리고 드럼 내부의 증기-물 유체밀도 (ρ , [kg/m²])이다. 출력 y_1, y_2 과 y_3 는 각각 드럼내 증기 압력 (x_1), 전기적 출력 (x_2) 그리고 드럼내 유체의 높이 (L , [m]) 이다. 드럼내 유체 높이 L 은, 증기의 질(quality) a_{cs} 와 증발율 q_c 를 이용한 대수 방정식에 의하여 계산된다. 입력 u_1, u_2 그리고 u_3 는 제어 밸브의 위치로서, 각각 연료의 양, 터빈에 공급되는 증기의 양 그리고 드럼내의 물 공급량이다. 이러한 밸브의 위치는 [0,1] 사이의 값으로 규정되며, 각각의 변화율은 다음과 같이 제약된다.

$$-0.007 \leq du_1/dt \leq 0.007 \quad (15)$$

$$-2.0 \leq du_2/dt \leq 0.02 \quad (16)$$

$$-0.05 \leq du_3/dt \leq 0.05 \quad (17)$$

3.2 퍼지 자동회귀 이동평균 제어기의 적용

본 논문에서는 단일입출력 (Single-Input Single-Output, SISO) 시스템에 적용된 퍼지 자동회귀 이동평균 제어기를 보일러시스템에 직접 적용한다. 입력과 출력의 관점에서 보면, 벨과 웅스트롬의 보일러 모델 (7)~(14)는 3-입력 3-출력 시스템이다. 따라서, 퍼지 자동회귀 이동평균 제어기가 적용된 3개의 단일 제어루프를 독립적으로 적용한다.

그림 2는 발전용 보일러 시스템의 전체적인 제어 시스템 구성도이다. 그림 2에서 FARMA FLC I, II 그리고 III는 각각 u_1 (연료의 양), u_2 (증기의 양) and u_3 (물 공급량)을 이용하여 y_1 (P), y_2 (E) 그리고 y_3 (L)를 제어하기 위하여 구성된 제어기들이다.

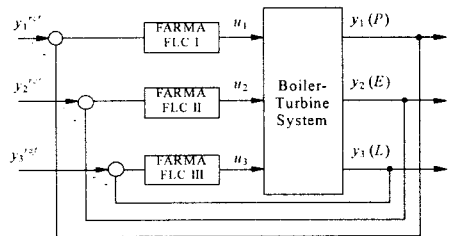


그림 2. 보일러 시스템 제어 구성도.

Fig. 2. The Boiler-Turbine Control System.

4. 모의 실험 결과

제시된 제어기와 보일러 시스템은 개인용 컴퓨터에서 c-언어를 이용하여 구현되었다. 모의실험을 위한 이산시간구간은 0.5초이다. [10]에서 저자들은 드럼 증기압력 y_1 의 목표값은 전기적 출력 y_2 의 목표값에 따라 연동하여 결정되어야 함을 지적하였다. 따라서 본 모의실험에서도, y_1 의 목표값은 y_2 의 목표값에

증가하도록 지정하였다.

시스템이 초기에 $X = (100, 50, 449.5)$, $Y = (100, 50, 0)$, $U = (0.271, 0.604, 0.336)$ 의 정상상태에 있다고 가정하여, 다음과 같은 3가지 경우를 고려하였다.

사례 1) $y_1^{ref} = 110, y_2^{ref} = 80, y_3^{ref} = 0$,

사례 2) $y_1^{ref} = 120, y_2^{ref} = 100, y_3^{ref} = 0$,

사례 3) $y_1^{ref} = 130, y_2^{ref} = 120, y_3^{ref} = 0$,

그림 3은 사례 1)의 결과이다. y_1 은 약 80초 이후부터 목표값인 110으로 추종하며, y_2 는 약 50초 이후부터 목표값인 80에 추종함을 알 수 있다. y_3 는 초기에 약 20까지 증가하지만 150초 이후부터는 원래의 수위를 유지함을 알 수 있다. 그림 4와 5는 각각 사례 2)와 3)의 결과이다. y_1, y_2, y_3 가 주어진 목표값을 추종함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 자기구성 퍼지제어기를 화력 발전용 보일러에 적용한 결과를 제시하였다. 제시된 제어기의 제어규칙과 언어적인 퍼지 집합은 플랜트의 구체적인 수식을 사용하지 않고 자동적으로 생성된다. 생성된 제어규칙은 퍼지 제어규칙 베이스에 저장되며, 플랜트에 대한 경험이 축적됨에 따라 개선된다. 이러한 퍼지 자동회귀 이동평균 제어기를 보일러 시스템에 적용하기 위하여, 주요한 상관 관계를 갖는 입출력에 대하여 세 개의 단일 계환 루프를 구성하였다. 여러 경우의 모의실험을 통하여 제시된 제어 시스템의 성능을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. D. Bell and K. J. Astrom, Dynamic models for boiler-turbine-alternator units: Data logs and parameter estimation for a 160 MW unit, Report: TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987.
- [2] B. W. Hogg and N. M. Ei-Rabaie, "Multivariable Generalized Predictive Control of a Boiler System", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 2, pp. 282-288, June 1991.
- [3] J. A. Rovnak and R. Corlis, "Dynamic Matrix based Control of Fossil Power Plant", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 2, pp. 320-326, June 1991.
- [4] K. S. Ray and D. D. Majumder, Fuzzy Logic Control of a Nonlinear Multivariable steam generating unit using Decoupling Theory, IEEE Trans. On SMC, Vol. 15, No. 4, pp. 539-558, 1985.
- [5] G. Prasad, E. Swidenbank and B. W. Hogg, "A Neural Net Model-based Multivariable Long-range Predictive Control Strategy Applied in Thermal Power Plant Control", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 2, pp. 176-182, March 1991.
- [6] R. Dimeo and K. Y. Lee, "Boiler-Turbine Control System Design using a Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 4, pp. 752-759, December 1995.
- [7] F. A. Alturki and A. B. Abdennour, "Neuro-Fuzzy Control of a Steam Boiler-Turbine Unit", Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, pp. 958-962, Hawaii, U.S.A., 1999.
- [8] Y. M. Park, U. C. Moon and K. Y. Lee, A Self-Organizing Fuzzy Logic Controller for dynamic systems using a Fuzzy Auto-Regressive Moving

Average (FARMA) Model, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 75-82, February 1995.

[9] W. Pedrycz, Fuzzy Control and Fuzzy Systems, John Wiley & Sons, 1989.

[10] A. Ben-Abdennour and K. Y. Lee, "A Decentralized Controller Design for a Power Plant Using Robust Local Controllers and Functional Mapping", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, pp. 394-400, June 1996.

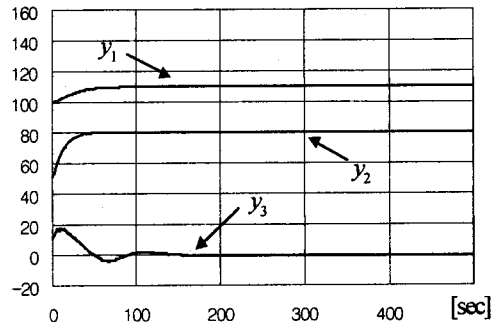


그림 3. 사례 1)의 모의실험 결과
Fig. 3. Simulation result for Case 1.

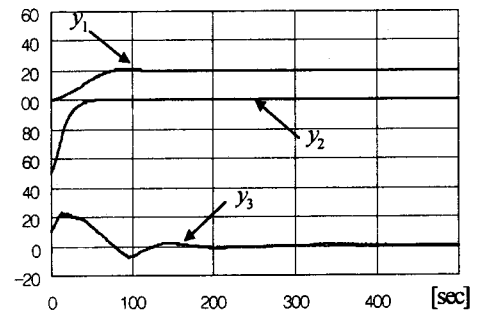


그림 4. 사례 2)의 모의실험 결과
Fig. 4. Simulation result for Case 2.

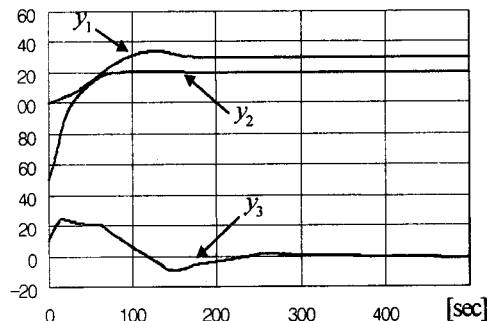


그림 5. 사례 3)의 모의실험 결과
Fig. 5. Simulation result for Case 3.

[알림]

본 연구는 우석대학교의 지원에 의하여 수행되었습니다.