

보일러 제어를 위한 퍼지 자기구성 제어기의 설계

°박태홍, 배상욱, 박귀태, 이기상*
고려대학교 전기공학과, *단국대학교 전기공학과

Fuzzy Self-Organizing Controller for the Industrial Boiler System

°Tae-Hong Park, Sang-Wook Bae, Gwi-Tae Park, Kee-Sang Lee*
Dept. of Elec. Eng., Korea Univ., *Dept. of Elec. Eng., Dankook Univ.

Abstract

In this paper, we design the fuzzy logic controller(FLC) for a nonlinear multivariable steam generating unit. Based on the knowledges of operator, the self-organizing controller(SOC) - a kind of FLC - is developed and tested. Both FLC and SOC based on linguistic rules have the advantages of not needing of some exact mathematical model for plant to be controlled. Beside, the SOC modifies the existing control rules by monitoring the control performance.

The computer simulations have been carried out for the 200MW steam generating unit to show the usefulness of the proposed method and the effects of disturbances and parameter variations are considered.

1. 서 론

산업발전의 급속화에 따른 보일러의 수요는 증가 추세에 있으며 안정된 부하추종과 안전, 에너지 절약에 대한 적절한 제어가 설계되어야만 한다. 보일러 계통의 모델링 및 제어에 관한 연구는 1950년대 부터 각종 형태의 보일러에 대하여 학계나 연구소등에서 활발히 진행되어 왔으며 대부분 효과적인 제어를 하고 있다. 일반적으로 화력 발전소용 드럼형 보일러에서 드럼은 절탄기(economizer)로부터 공급받은 물을 수증기로 바꾸고 물과 수증기를 분리하여 과열기(superheater)를 거쳐 터빈으로 공급하는 역할을 하는 부분이다. 드럼의 수벽(water wall)은 공급받은 열량에 의하여 물을 수증기로 바꾸어 주고 이러한 과정을 통하여 드럼 내의 물은 하강관(downcomer)과 상승관(riser)을 자연 순환하게 된다. 상승관을 통해 상승부로 모인 수증기는 과열기를 거쳐 제어 밸브에 의해 터빈으로 공급되어 발전소의 출력이 결정된다. 이러한 보일러 시스템에서 드럼 내의 증기 압력, 드럼 수위, 터빈으로 유입되는 증기양 들은 서로 강하게 연관되어 있으며, 안정된 부하 추종을 위하여는 보일러 시스템 변수들이 기준 입력을 잘 추종하는 제어가 설계되어 안전한 운전을 위하여 제어기는 드럼 내의 증기 압력, 드럼 수위, 터빈으로 유입되는 증기양 등을 조절하여 보일러와 터빈을 보호할 수 있어야 한다.

그러나 보일러 계통의 동적 특성은 내재하는 외란이나 설정치에 크게 의존한다. 또한 대부분의 보일러 계통은 제어의 입장에서 고려할 때 상태들이 강하게 상호 결합된 시변 비선형 대부분 계통으로 알려져 있어 해석적인 기법들에 의한 제어가 쉽지는 않다. 최근까지 연구된 보일러 제어기법은 보일러 시스템의 변수들을 동시에 제어하기 위하여 다변수 제어 이론에 근거하여 설계되었다. 그러나, 대부분의 제어기는 동작점 부근에서 선형화한 모델에 기초한 것이므로, 모델링 오차나 외란에 의하여 동작점이 크게 변화할 경우 설계된 제어기는 만족할 성능을 얻을 수 없게 된다. 따라서 좀더 유연한 제어기를 설계하기 위하여는 계통을 잘 알고 있는 설계자의 경험에 의하여 설계 되어야만 한다. 최근 계통 운전자의 경험용 제어기에 포함시킬 수 있도록 언어적 제어규칙을 이용한 퍼지제어기에 대한 연구가 전 세계적으로 활발하지만 보일러와 같은 다변수 입출력계통에 대한 연구는 그다지 많지 않다. Ray의 최근 연구는 비선형계통을 입출력 제한 선형화에 의하여 비결합화(decoupling)시킨후 퍼지제어기를 구성한 것으로 선형화 과정으로 인하여 해석적인 복잡성을 피할 수 없으며 동작점용 크게 벗어난 경우 제어성능 저하의 단점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 시스템의 각 출력 정보로부터 구성된 퍼지 제어기와 자기구성 제어기를 이용하여 Ray 와 Majumder에 의하여 알려진 200MW급 화력 발전기용 보일러 시스템의 동특성 모델[2]에 대하여 보일러 시스템에 존재하는 불확실성에도 불구하고 보일러 변수들이 정상 운전 상태를 유지하도록 하는 제어기를 설계한다. 기본적인 퍼지 제어기에서 강하게 결합된 상태들간의 관계를 고려하여 구성된 부 퍼지제어기를 설계한 후 성능개선을 위하여 자기구성 제어기법을 도입하고 그 유용성을 보이고자 한다.

2. 보일러 모델

일반적으로 보일러 모델링은 보일러 계통에 대한 열,유체,역학 법칙을 이용하여 물리적인 모델을 수식화 하는 연역적 방법이 많이 사용되고 있다.[3] 본 연구에서는 보일러 계통의 동특성을 나타내는 비선형 모델 중에서 서론에서 언급한 Ray등에 의하여 신뢰도가 입증된 200MW급 화력 발전기용 보일러 시스템의 동특성 모델을 채택하였다. 사용된 보일러를 포함한 증기발전 장치의 개략적인 구조는 그림 1.과 같으며 동특성 방정식은 식 (1)과 같이 1차 비선형 미분방정식의 형태로 주어진다. [2]

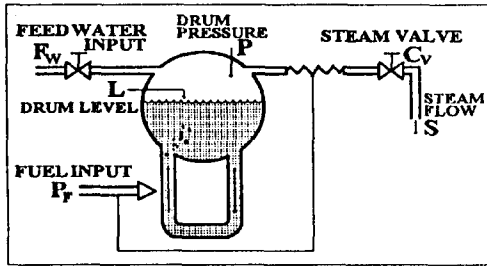


그림 1. 200MW 증기 발생 장치 구조

$$\begin{aligned}
 \frac{dP}{dt} &= -a_1 \cdot S \cdot P^{1/2} + a_2 \cdot P_f - a_3 \cdot F + a_4 \cdot L + a_5 \cdot T_R \\
 \frac{dS}{dt} &= 10 \cdot C_v \cdot P^{1/2} - a_6 \cdot S \\
 \frac{dL}{dt} &= a_7 \cdot F_w + a_8 \cdot P_f + a_9 \cdot C_v - a_{10} \cdot P^2 \\
 &\quad - a_{11} \cdot L - a_{12} \cdot L^2 - a_{13} \cdot S
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 P, S, L 은 각각 드럼증기압 (kg/cm^2), 터빈으로 공급되는 증기량 (kg/s), 드럼의 수위 (cm)를 나타내며, P_f, C_v, F_w 는 각각 공급되는 연료량 (kg/s), 터빈으로 유입되는 증기량을 조절하는 터빈 밸브의 위치, 급수량 (kg/s)을 의미한다. 또한, T_R 는 급수의 온도 ($^{\circ}\text{C}$)를 나타내며 일반적으로 급수온도 T_R 는 예측할 수 없는 파라미터이다.

본 논문에서는 시스템이 60% MCR (maximum continuous rating)하에서 동작된다고 가정하였으며, 동작 조건은 표 1.과 같다.

표 1. 60 % MCR 동작 조건

	기 호	동 작 점
드럼 증기압	P	175.8 kg/cm^2
터빈으로 공급되는 증기의 양	S	135.0 kg/s
드럼의 수위	L	64.0 cm
공급되는 연료의 양	P_f	38.58 kg/s
유출 증기량 조절 밸브의 위치	C_v	0.8
급수량	F_w	190.96 kg/s

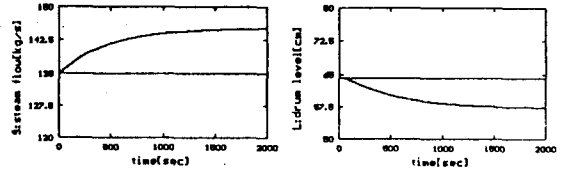
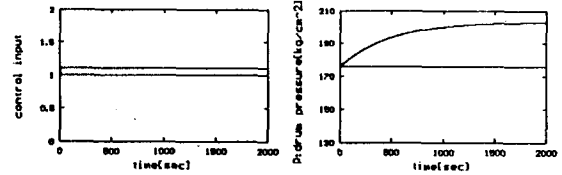
또한 동작점에서 구한 계통 파라미터들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 0.00193 & a_2 &= 0.014524 & a_3 &= 0.000736 \\
 a_4 &= 0.00121 & a_5 &= 0.000176 & a_6 &= 0.785716 \\
 a_7 &= 0.00863 & a_8 &= 0.002 & a_9 &= 0.463 \\
 a_{10} &= 0.000006 & a_{11} &= 0.00914 & a_{12} &= 0.000082 \\
 a_{13} &= 0.007328 & T_R &= 288
 \end{aligned}$$

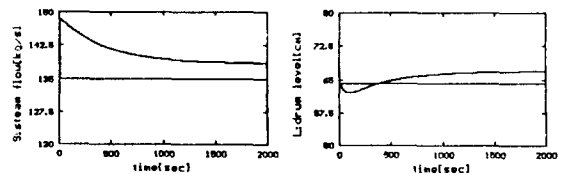
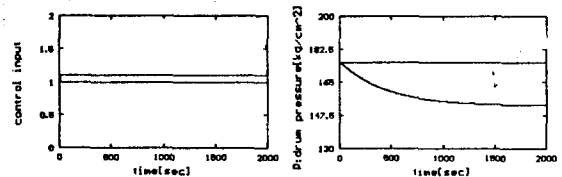
상태변수들은 $[P, S, L]^T$ 로 정의되며 시스템출력은 $[P, S, L]^T$ 이며 제어입력은 $[P_f, C_v, F_w]^T$ 이고, 제어입력들은 다음과 같이 제한된다고 가정하였다.

$$\begin{aligned}
 P_{Fmin} &\leq P_f \leq P_{Fmax} \\
 C_{Vmin} &\leq C_v \leq C_{Vmax} \\
 F_{Wmin} &\leq F_w \leq F_{Wmax}
 \end{aligned}$$

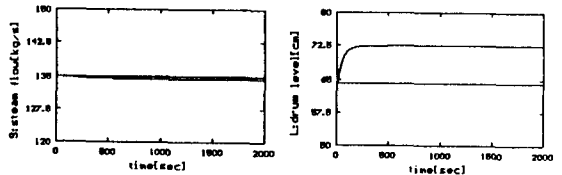
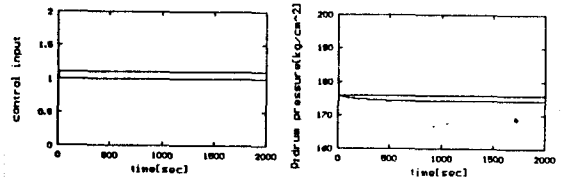
이상의 계통에 대한 동작점의 약 10 % 단위 응답 특성은 그림 2. 와 같다. 이러한 비선형 모델로부터 직접 퍼지제어 규칙을 작성하여 제어를 설계하기 위하여 입력과 출력의 관계를 분석하고 제어를 설계한다.



(a) 공급 연료량 10 % 증가시 응답



(b) 증기량 10 % 증가시 응답



(c) 급수량 10 % 증가시 응답

그림 2. 동작점 10 % 단위 응답 특성

3. 보일러 시스템에 대한 퍼지제어기 설계

이까지 다변수 계통에 대한 일반적인 퍼지 제어기의 설계 기법이 제시되지 못한 상황에서 본 연구의 제어 대상으로 하고 있는 보일러 계통의 안정된 퍼지제어기를 설계하고 성능개선을 위하여 본 연구에서는 퍼지제어기를 다음과 같은 두 단계에 의하여 설계한다.

- i) 기본 퍼지제어기의 결합
- ii) 자기구성제어기에 의한 성능 개선

3.1 퍼지제어기

보일러의 비선형 모델 식 (1)로부터 또는 운전자의 경험 으로부터 제어 입력 (P_r, C_v, F_w)들과 계통 출력 (P, S, L)들간의 영향 정도를 직관적으로 추론하여 다음과 같이 강하게 결합된 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 시뮬레이션 결과에서도 알 수 있듯이 일반성을 잃지 않는다.

$$P_r \rightarrow P, C_v \rightarrow S, F_w \rightarrow L$$

이와 같은 가정하에서 퍼지제어기를 구성하면 다음 그림 3과 같이 독립적인 세계의 부 퍼지제어기를 구성할 수 있다.

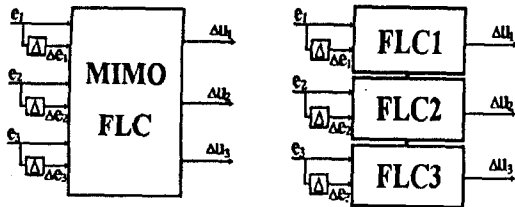


그림 3. 부퍼지제어기 구성

이와 같은 퍼지 제어기는 인간 조작자가 각 출력의 양상을 독립적으로 관측하고 각각의 제어량을 순간적으로 변화시키는 과정과 같다.

다음과 같이 정의된 각 변수의 편차, 편차 증분 및 제어 입력에 대한 전체공간을 정의하고 Mamdani의 meta rule 을 각각 적용하여 부 퍼지제어기 $FLC1$, $FLC2$, $FLC3$ 를 구동한다.

$$e(k) = r(k) - y(k), \quad \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \\ \Delta u(k) = f(e(k), \Delta e(k)), \quad u(k) = u(k-1) - \Delta u(k)$$

여기서 $e(k)$, $\Delta e(k)$, $\Delta u(k)$ 은 각각 k 스텝에서의 편차, 편차 증분 및 제어입력의 증분을 나타내는 벡터로 퍼지 추론에 의하여 다음과 같은 전체공간내에서 대칭 삼각형 형태의 소속함수를 사용한다. 또한 $f(\cdot)$ 은 $\Delta u(k)$ 를 계산하는 과정이다.

$$e(k) \in E, \quad \Delta e(k) \in CE, \quad \Delta u(k) \in U$$

또한 퍼지 규칙의 추론은 max-min, 비퍼지화는 무게 중심법을 사용한다.

이상의 단순 퍼지제어기에 의한 제어특성을 그림 4에 나타내었다. 증기량의 경우 규칙개정이 필요함을 알 수 있다.

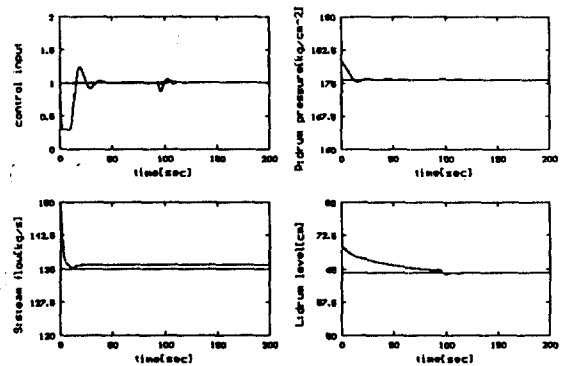


그림 4. 단순 퍼지 제어기에 의한 응답

3.2 자기 구성 제어기의 설계

3.1절의 기본 퍼지 제어기에 의한 설계 기법은 단일 변수간의 결합만을 가정한 것으로 독립적인 단일 입출력 계통의 병렬 제어기로 생각할 수 있다. 따라서 상호 결합에 의한 성능저하는 피할 수 없는 문제이며 경우에 따라서는 제어기 성능을 잃어 버릴 수도 있다.

본 절에서는 각 변수간의 결합성에 의한 성능 저하에 대한 보상을 위하여 그림 5와 같이 자기 구성 제어기를 구성하고 매 샘플링 순간마다 극부적 성능을 평가하여 성능 개선을 위한 규칙 개정을 하도록 한다.

SOC의 형태는 Mamdani가 처음 제안한 후 여러가지로 변형이나 제안되어 왔으나[7] 본 논문에서는 초기 개념의 SOC를 사용하였다.

한편 퍼지제어기의 환산계수는 페루프 계통의 동특성, 특히 상승시간, 진동, 오버슈트등에 강하게 영향을 주기 때문에 전체 성능을 개선하기 위한 성능지표로 사용하기에는 부적절할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 정상상태의 성능 개선을 위하여 오버슈트나 정상상태 편차등을 이용하여 전체적 성능을 평가하고 환산계수들 적은 범위내에서 변화시키도록 한다.

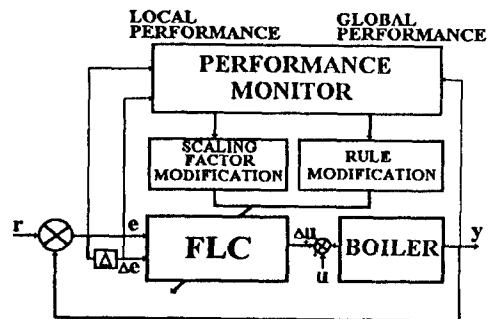


그림 5. 자기구성 제어기의 구조

사용된 자기구성제어기의 제어규칙 개정 과정을 간단히 설명하면 다음과 같다.[6]

- i) kT 순간의 제어기 입력을 $e(kT)$, $ce(kT)$ 라 하고 제어기 출력을 $u(kT)$ 로 하여
- ii) 이 순간의 성능 평가에 의한 입력 보상량을 $p(kT)$ 라 할때
- iii) rT 시간 전의 계통입력이 현재 상태에 영향을 미친다면 측정치 $e(kT-rT)$, $ce(kT-rT)$ 에 대하여 제어기 출력은 $u(kT-rT)+p(kT)$ 가 바람직한 것으로 판단하여 제어규칙을 개정한다.

4. 시뮬레이션 및 결과 검토

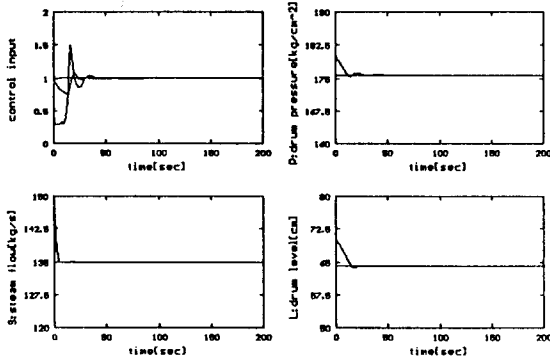
SOC에 의하여 사용된 보일러 계통의 제어 성능개선을 검토하기 위하여 다음과 같은 여러 상황에서 시뮬레이션하였다. 각 경우 설정치는 드럼 압력 175.8 kg/cm^2 , 터빈으로 공급되는 증기량 135 kg/s , 드럼 수위 64 cm 이다. 또한 사용된 전체공간의 값은 표 2.와 같다. 사용된 규칙 개정을 위한 성능 지표는 제어입력과 같은 형태의 look-up table을 만들어 사용하였다.

표 2. 전체 공간값

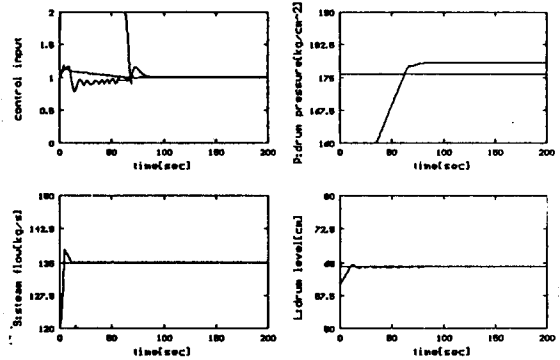
	편 차	편차변화	제어입력
증기 압 P	-5.0 ~ 5.0	-0.5 ~ 0.5	-10. ~ 10.
증기 량 S	-0.1 ~ 0.1	-0.1 ~ 0.1	-0.01~0.01
드럼수위 L	-0.5 ~ 0.5	-0.1 ~ 0.1	-5.0 ~ 5.0

1) 초기 상태 섭동에 대한 응답

그림 6. 는 정상상태 운전 가정하에서 초기상태의 섭동에 대한 폐루프 계통응답을 보여주고 있다. 초기치가 정상 상태보다 큰 경우 (a)와 작은 경우 (b)에 대하여 약 50 초 정도에서 편차를 제거함을 알수 있고 SOC의 반복회수가 5 회때의 응답 그림 7. 을 보면 과도상태의 특성이 개선되었음을 알수 있다. 각 그림에서 표시된 제어입력값은 정상 동작점에 대한 비로 표시하였다.

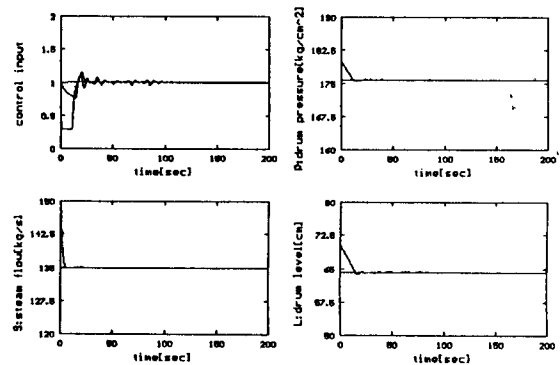


(a) 초기상태 $P=180, S=160, L=70$. 일 경우

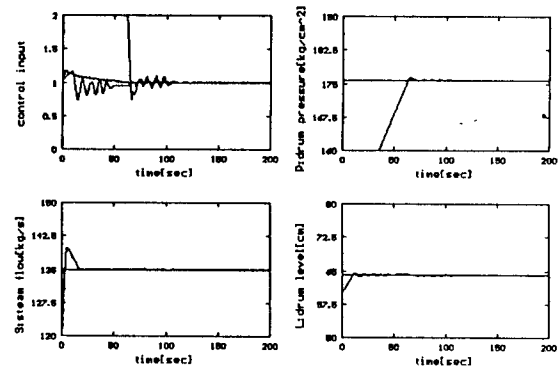


(b) 초기상태 $P=140, S=120, L=60$. 일 경우

그림 6. 초기 상태 섭동에 따른 응답특성(1'st run)



(a) 초기상태 $P=180, S=160, L=70$. 일 경우



(b) 초기상태 $P=140, S=120, L=60$. 일 경우

그림 7. 초기 상태 섭동에 따른 응답특성(5'th run)

2) 파라미터 T_B 에 대한 응답

급수온도 T_B 는 실제 계통에서는 예측할 수 없는 값이지만 288 °C를 정상값으로 가정하였다. 그림 8. 에서와 같이 구간별로 288 °C와 500 °C 사이를 변화하는 T_B 에 대한 응답에 대하여 좋은 응답 특성을 보이고 있다.

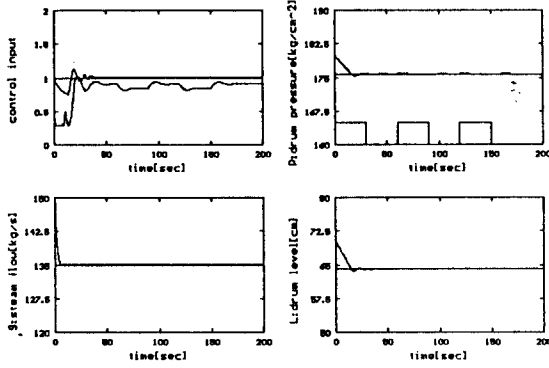


그림 8. T_B 구간스텝변화에 따른 응답특성

3) 설정치 변화에 대한 응답

사용된 보일러의 제반 계수들이 60% MCR에서 구해진 모델이나 드럼 압력 165.8 kg/cm², 터빈으로 공급되는 증기량 130 kg/s, 드럼 수위 60 cm와 같이 동작점을 변화시킨 경우에도 그림 9.과 같이 정상상태 응답 특성이 좋음을 알 수 있다.

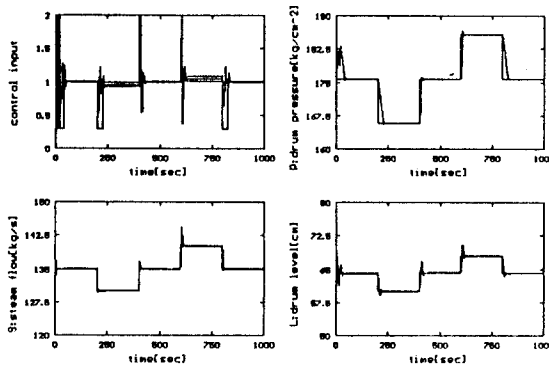


그림 9. 설정치 변화에 따른 응답특성

4) 계통 파라미터 변화에 대한 응답

계통 파라미터는 모델링 때부터 항상 어느정도 불확실성을 내포하고 있다. 계통 파라미터들을 약 20% 정도 변화된 경우의 응답 개선 특성을 그림 10.에 보여주고 있다.

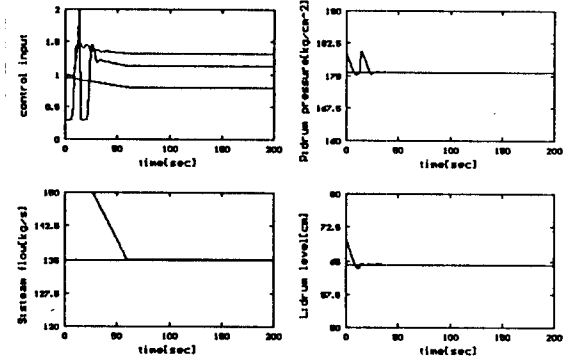


그림 10. 계통 파라미터 변화에 따른 응답특성

5. 결 론

본 연구에서는 비선형 다변수 계통의 하나인 200MW 증기 발생 장치의 제어를 위하여 자기구성제어기를 설계하였다. 여러 연구에서 지적한 바와 같이 비선형, 다변수 계통을 제어하기는 어려움이 있으나 본 연구에서와 같이 계통의 동특성을 잘 알고 있는 경우나 상호 결합성에 대한 정보가 있는 경우에는 상호 결합에 의한 성능 저하에 대한 보상을 자기 구성 제어기에 의하여 실현하고 전체적인 성능 평가를 이용하여 미세한 성능향상을 도모하였다. 그러나 제어의 일반성을 얻기 위하여 상태간의 결합성을 고려한 새로운 규칙 형성이나 보상방법을 좀 더 연구해야만 한다.

참고문헌

- [1] K.J. Astrom and K. Eklund, "A simplified nonlinear model of a drum boiler-turbine unit", Int. J. Contr., Vol.10, No.1, pp.145-169, 1972
- [2] K.S. Ray and D.D. Majumder, "Fuzzy logic control of a nonlinear multivariable steam generating unit using decoupling theory", IEEE Trans. SMC, Vol.15, No.4, pp.539-558, 1985
- [3] H.K. Nam, Modeling and control system design of a coal fired power plant, Ph.D dissertation, The Univ. of Texas at Austin, 1986
- [4] 權旭鉉, 金相禹, 朴符堅, 金恩基, "개선된 LQG/LTR 방법에 의한 보일러-터빈 제어 시스템의 설계", 대한 전기 학회 논문집, Vol.39, No.2, 1990
- [5] W.J.M. Kickert and E.H. Mamdani, "Analysis of a fuzzy logic controller", Fuzzy Sets and Systems, Vol.1, pp.29-44, 1978
- [6] T.J.Procyk and E.H.Mamdani, "A linguistic self-organizing process controller", Automatica 15, pp.15-30, 1979
- [7] Wu Zhi Qiao, Wang Pei Zhuang and Teh Hoon Heng, "A rule self-regulating fuzzy controller", Fuzzy Sets and Systems, Vol.47, pp.13-21, 1992