

발전기 드럼의 수위 지능 제어기 설계

(Water Level Intelligent Controller Design of Power Plant Drum)

홍현문* · 전병석** · 김종근** · 강금부** · 이봉섭***

(Hyun-Mun Hong, B · S Jeon, J · G Kim, G · B Kang, B · S Lee)

* 동해대학교 전기전자공학과, ** 충북대학교 전기공학과, *** 삼척대학교 컴퓨터제어계측공학과

Abstract

In this paper, we propose a intelligent controller design method for the water level control of the power plant drum in the form of nonminimum phase system. The proposed method is based on T. Takagi and M. Sugeno's fuzzy model. And we illustrate the improved characteristics as the simulation results, comparing with the conventional the PID and LQ controller design method

1. 서론

발전소에서 드럼, 상승관 및 하강관의 역할은 절단기로부터 공급받은 물을 수증기로 변환하여 다음 공정인 과열기로 보내주는 것이며, 상승관에서 노내의 연소열을 받아 포화증기와 포화수가 섞인 상태가 되어 드럼으로 유입된다. 드럼에서는 물과 증기가 분리되고 분리된 증기는 과열기에서 더욱 가열되어 과열증기가 되는 과정을 거친다. 발전소의 보일러 제어시스템에서 드럼 수위제어는 매우 중요한 부분을 차지한다. 만일 급수량이 많아 수위가 과도하게 높아지면 물이 과열기로 유입되고 터빈에 손상을 주게된다. 반대로 급수량이 부족할 경우 과열기의 판을 과열시킬 우려가 있다. 결국 드럼 수위의 불안정은 발전소 전체에 대하여 영향을 미치게 되고, 안정한 제어를 위해서는 정확한 동특성 해석이 필요하다[1-4].

드럼 시스템 자체에 대한 모델링 그리고 제어기법은 많은 연구자들에 의하여 제안되었으나[1-3], 모델의 복잡성 및 비 최소 위상특성 때문에 제어하기가 쉽지 않았다. 실제 운전의 경우, 수동운전은 운전조건의 변화에 대하여 운전자의 경험과 개인적 능력에 의하여 제어성이 결정된다. 따라서 이러한 전문가의 지식을 이용한 지능제어기법이 드럼의 수위를 제어하는데 적절하며, 본 논문에서는 이와 같은 필요성에 근거하여 지능제어 제어기법을 제안하였다. 제안된 방법으로 제어기를 설계하고 모의실험을 통하여 제어기가 우수함을 보였다.

2. 발전기 드럼 모델링 및 지능제어기

2.1. 발전기 드럼 모델링

드럼 내에서의 유체의 상태변환은 열과 질량의 전달 과정이 빠르게 수반하기 때문에 일반적으로 열적 평형 상태로 가정하며, 그림 1은 발전기 드럼의 구성도를 나타낸다[1-3].

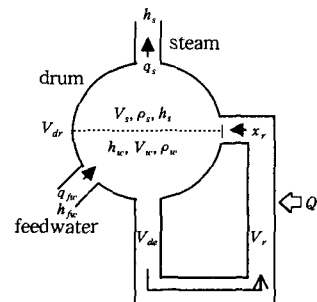


그림 1. 화력발전소 드럼 구성도
Fig. 1. Power plant drum diagram

보일러 드럼 전체에 대한 에너지 평형식과 질량 평형식을 나타내면 다음과 같다[4].

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_s h_s + \rho_w V_w h_w) = Q_{mf} + q_{fw} h_{fw} - q_s h_s \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_s + \rho_w V_w) = q_{fw} - q_s \quad (2)$$

여기서, ρ [KJ/m³]는 밀도, V [m³]는 부피, h [KJ/Kg]는 엔탈피, q [Kg/s]는 질량 흐름률, Q_{mf} [KJ/s]는 상승관에서 내부 유체로의 열량 흐름률이며, 아래첨자 s , w , fw 는 증기, 물, 급수를 각각 나타낸다.

그리고 드럼의 부피 V_{dr} [m³], 드럼 내부의 물부피 V_w [m³],

상승관의 부피 V_w [m³], 하강관의 부피 V_d [m³] 그리고 상승관 내부의 증기 부피비 a_m 을 이용하여 전체 증기 부피와 물 부피를 나타내면 다음과 같고,

$$V_{st} = V_{dr} - V_w + a_m V_r \quad (3)$$

$$V_{wt} = V_w + V_{dc} + (1 - a_m) V_r \quad (4)$$

전체 물과 증기, 드럼 내부의 물, 상승관 전체, 그리고 상승관 내부의 증기에 대한 각각의 질량 평형식을 구한 후, 이상의 결과를 이용하면 다음과 같은 드럼 모델에 대한 비선형 상태방정식을 구성할 수 있다[4].

$$a_{11} \frac{dP}{dt} = h_c \rho_s q_{fw} - h_c \rho_w q_s + (\rho_w - \rho_s) [Q_{mf} - (h_w - h_{fw}) q_{fw}] \quad (5)$$

$$a_{21} \frac{dP}{dt} + a_{22} \frac{dV_w}{dt} + a_{23} \frac{dX_r}{dt} = q_{fw} - X_r q_r \quad (6)$$

$$a_{31} \frac{dP}{dt} + a_{33} \frac{dX_r}{dt} = Q_{mf} - (h_w - h_{fw}) q_{fw} - h_c X_r q_r \quad (7)$$

$$a_{44} \frac{dq_s}{dt} = Q_{gm} - Q_{mf} \quad (8)$$

여기서,

$$a_{11} = V_{wt}(\rho_w^2 - \rho_w \rho_s) \frac{dh_w}{dP} + V_{st} \left[h_c \rho_w \frac{d\rho_s}{dP} + (\rho_w^2 - \rho_s^2) \frac{dh_s}{dP} \right],$$

$$a_{21} = V_w a_m \frac{d\rho_s}{dP} - V_r (\rho_w - \rho_s) \frac{\partial a_m}{\partial P},$$

$$a_{22} = \rho_w,$$

$$a_{23} = V_r (\rho_w - \rho_s) \frac{\partial a_m}{\partial X_r},$$

$$a_{31} = V_w h_c \left(a_m \frac{d\rho_s}{dP} + \rho_s \frac{\partial a_m}{\partial P} \right) + V_{wt} \rho_w \frac{dh_w}{dP} + V_{st} \rho_s \frac{dh_s}{dP},$$

$$a_{33} = V_w h_c \rho_s \frac{\partial a_m}{\partial X_r},$$

$$a_{44} = MC.$$

위 모델에서 상태변수는 $x^T = [P \ V_w \ X_r \ q_s]$ 로서 P [MPa]는 드럼의 압력, V_w [m³]는 드럼 내부의 물부피 즉 수위를 나타내고, X_r 는 증기질로서 단위체적에서의 수량에 대한 증기량의 비율을 뜻한다. q_s [Kg/s]는 드럼에서 빠져나가는 증기의 질량 흐름률을 나타낸다. 입력변수는 $u^T = [Q \ P_{cv} \ q_{fw}]$ 이며, Q [KJ/s]는 열량, P_{cv} [%]는 주증기 제어밸브의 위치, q_{fw} [Kg/s]는 급수량이다. 그리고 M [kg]는 상승관의 질량, C [kJ/kg°C]는 상승관의 비열이고, h_c [KJ/Kg]는 증발에 필요한 엔탈피량이다. 이상의 비선형 방정식을 동작점에서의 상태변수와 입력변수에 대하여 선형화 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta \dot{x} = A \delta x + B \delta u \quad (9)$$

$$\delta y = C \delta x \quad (10)$$

여기서, $\delta x = x - x^*$, $\delta u = u - u^*$, $\delta y = y - y^*$ 이고, x^* , u^*

는 동작점을 나타내며, $A = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{x=x^*, u=u^*}$,

$B = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right|_{x=x^*, u=u^*}$, $C = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$ 이다.

2.2. 지능제어기 설계

비 최소 위상 시스템에 대하여 기존의 제어기법을 적용할 경우 적절한 성능을 얻기가 용이하지 않다. PID 제어기의 경우 또한 초기 변동상황에 부합되도록 진-지상기법을 추가하는 등 별도의 고려를 해 주어야하며, 현장에서는 수동운전의 경우 운전자의 경험과 지식에 의존한 형태로 이루어지고 있다. 따라서 이를 고려한 지능제어기를 설계하는 것이 바람직하다. 시스템이 비 최소 위상 시스템을 감안하여 시스템에 영향을 미치는 앞먹임 제어를 추가하는 것이 요구된다. 드럼 수위에 영향을 미치는 선행신호로는 주증기 제어밸브위치 P_{cv} [%]가 있다. P_{cv} 의 값의 변동에 대하여 드럼 수위는 지연시간이 흐른 후 영향을 받게되며, P_{cv} 의 변화율은 수위를 결정하는 정보량이 된다.

본 논문에서는 Takagi 와 Sugeno의 결과를 이용하여 두 개의 입력과 하나의 출력을 갖는 시스템의 제어기를 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

If V_w is $M_{V_w}^1$ and P_{cv} is $M_{P_{cv}}^1$ then q_{fw} is K_1

If V_w is $M_{V_w}^2$ and P_{cv} is $M_{P_{cv}}^2$ then q_{fw} is K_2

.....

If V_w is $M_{V_w}^{49}$ and P_{cv} is $M_{P_{cv}}^{49}$ then q_{fw} is K_{49}

본 논문에서는 위의 결과로부터 표 1과 같은 제어규칙을 구성하였다. 주어진 V_w 와 P_{cv} 의 값으로부터 제어기의 출력은 표 1로부터 추론될 수 있다. 여기서, 조건부 $M_{V_w}^i$ 와 $M_{P_{cv}}^i$ 는 다음의 집합 {NL, NM, NS, ZE, PS, PM, PL}에 속하고, 제어이득 K_i 도 이 집합의 원소를 나타낸다. 그리고 제어입력은 다음과 같이 주어진다 [6].

$$q_{fw}(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^{49} \mu_i(\theta) K_i \theta}{\sum_{i=1}^{49} \mu_i(\theta)} \quad (11)$$

여기서, $\theta^T = [V_w \ P_{cv}] = [\theta_1 \ \theta_2]$, $\mu_i(\theta) = \prod_{j=1}^2 M_j^i(\theta_j)$, $M_j^i(\theta_j)$

는 θ_j 에 대한 소속함수의 적합도를 나타내고,

$\sum_{i=1}^{49} \mu_i(\theta) > 0$, $\mu_i(\theta) \geq 0$ 이다.

표 1. 퍼지규칙
Table 1. Fuzzy rule

P_{cv} \ V_w	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NM	NM	NS	NS	ZE
NM	NM	NM	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	ZE	PS
ZE	NS	NS	NS	ZE	ZE	PS	PS
PS	NS	NS	ZE	ZE	PS	PS	PM
PM	ZE	ZE	ZE	PS	PS	PM	PM
PL	ZE	PS	PS	PM	PM	PL	PL

3. 모의실험

PID 조정계수는 반복시행에 의해서 각각 $K_p=10$, $K_i=1$, $K_d=1$ 로 설정하였다. 설계된 PID 제어를 적용한 경우의 드럼수위 응답은 그림 2 나타내었다. 그림 2 나타난 것과 같이 PID 제어기의 경우 출력 값인 수위에 대한 정보만 이용하게 되므로 초기의 환경변화에 대하여 적절한 제어성능을 나타내지 못하였다. 그리고 상태변수량을 모두 측정가능 하다고 가정하여 LQ 제어를 설계할 경우[7], 상태변수와 입력변수에 대한 가중치는 다음과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

LQ 제어를 적용할 경우의 드럼 수위응답은 그림 3 과 같다. LQ 제어기의 경우에서도 현재의 상태 값을 고려한 상태 궤환 구조이므로 P_{cv} 의 초기변화에 대하여 적절한 제어성능을 나타내지 못함을 확인할 수 있다. 마지막으로 제안된 퍼지 제어를 적용한 결과를 그림 4에 나타내었다. 퍼지 제어기의 경우 시스템 검증을 통하여 비 최소 위상특성을 고려하여 선행신호인 P_{cv} 의 변화량을 정보로 활용하여 제어를 설계하므로 초기의 환경변화에 적절히 대응함을 그림 9로부터 확인할 수 있다.

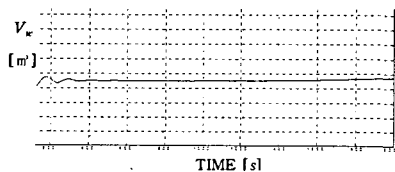


그림 3. PID를 이용한 드럼 수위제어
Fig. 3. Drum water level(PID)

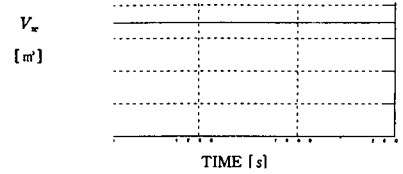


그림 3. LQ를 이용한 드럼 수위제어
Fig. 3. Drum water level(LQ)

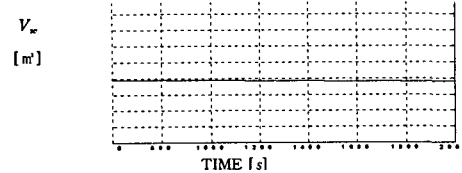


그림 4. 퍼지 규칙을 이용한 드럼수위제어
Fig. 4. Drum water level(Fuzzy control)

4. 결론

본 논문에서는 발전소 드럼의 수위제어를 위한 지능 제어기 설계를 제안하였다. 제안된 방법은 드럼 수위에 영향을 미치는 밸브 위치 P_{cv} 의 정보를 미리 감안하여 퍼지규칙에 추가하였다. 이상의 결과는 비교한 기존 제어기의 성능보다 향상된 결과를 시뮬레이션 결과로부터 확인하였다.

참고 문헌

- [1] K. L. Chien, E. I. Ergin, C. Ling, and A. Lee, "Dynamic Analysis of a Boiler", Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs. 80, pp. 1809-1819, 1958.
- [2] R. Dolezal and L. Varcop, Process Dynamics, Elsevier Publishing Co. Ltd., 1970.
- [3] K. J. Astrom and Eklund, "A simplified Non-linear Model of a Drum Boiler-turbine", Int. J. Contr., vol. 16, no. 1, 1972.
- [4] 한국전력공사, 보일러 계수 추정에 의한 최적 보일러 제어기 개발, 한국전력공사 기술연구원, 1993.
- [5] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [6] J. S. R. Jang, C. T. Sun, and E. Mizutani, Neuro-Fuzzy and Soft computing, Prentice-Hall, 1997.
- [7] F. L. Lewis, Optimal control, John Wiley & Sons, 1986.