

# 증기발생기 수위 제어를 위한 견실 $H^\infty$ 제어기 설계

서성환, 조희수, 박홍배  
 경북대학교 전자전기공학부  
 대구광역시 북구 산격동 1370번지, 702-701  
 sshmk@palgong.kyungpook.ac.kr

## Design of Robust $H^\infty$ Controller for Water Level Control of Steam Generator

Sung Hwan Seo, Hee Soo Cho, and Hong Bae Park  
 School of Electronic and Electrical Eng., Kyungpook Nat'l Univ.  
 1370 Sankyuk-dong, Buk-ku, Taegu, 702-701  
 sshmk@palgong.kyungpook.ac.kr

**Abstract** The control objective of steam generator water level in the secondary circuit of a nuclear power plant is to regulate the water level at the desired set point. The dynamics of steam generators is non-linear in nature. The task of modelling such plant is very difficult and especially so when plant operating conditions change frequently. In these reasons, conventional PI gains over all power range will not work efficiently and a manual control is generally used in low power operation. Therefore the robust  $H^\infty$  controller design method should be required.

In this paper, we design the robust  $H^\infty$  controller for water level control of steam generator using a mixed  $H^\infty$  optimization with model-matching method. Firstly we choose the desired model that has good disturbance rejection performance. Secondly we design a stabilizing controller to keep the model-matching error small and also provide sufficiently large stability margin against additive perturbations of the nominal plant.

### I. 서론

원자력 발전설비중 증기발생기(steam generator)는 일차계통에서 원자로 노심을 거친 고온의 냉각재와 이차계통의 주급수사이의 열교환을 통해 터빈으로 보내질 증기를 만들어내는 수직 U-튜브형 열교환기이다. 증기발생기 수위 제어계통은 증기발생기에 적절한 양의 주급수를 공급하여 증기발생기의 수위를 설정치에 유지시킴으로써 일차계통에서 생성된 열을 효과적으로 제거하고 터빈-발전기에 필요한 증기량을 공급할 수 있도록 하는 중요한 역할을 수행한다. 수위가 너무 낮

을 경우 일차계통의 냉각효과 감소로 인한 연료손실을 막기위해 원자로가 정지되며, 수위가 너무 높을 경우 터빈 날개의 마모를 막기위해 터빈이 정지된다. 따라서 증기발생기의 안정된 수위 제어는 원자력 발전 설비의 안전과 이용률을 크게 좌우한다. 그러나 저출력 운전시에 증기발생기내의 기포 체적이 크게 변화하여 응축, 팽창현상으로 인한 수위변동이 크고 증기유량의 측정오차가 커서 이를 제어 입력신호로 이용할 수 없다. 그리고 원자력 발전소의 플랜트들은 정상상태, 과도상태 및 기동상태에 따라 다이내믹스의 변화가 심하고 비선형성 등이 강해 특정 동작점 근처에서 설계한 고정된 PI 제어기로는 부하출력이 변할 경우 원하는 안정성 여유(stability margin)내에 수위를 조절하기가 쉽지 않다.

본 논문에서는 불확실성이 존재하더라도 안정성을 보장하고 원하는 성능을 가지는 증기발생기 수위 제어를 위한 견실  $H^\infty$  제어기 설계를 위해 모델정합을 포함한 혼합  $H^\infty$  최적화기법(mixed  $H^\infty$  optimization with model-matching)[4]을 제안한다. 먼저 증기유량, 1차측 냉각재 온도, 그리고 급수온도의 변화들로 인한 수위변화를 출력에 미치는 외란으로 고려하여 좋은 외란제거의 성능을 가지는 페루프 전달함수를 이상모델(desired model)로 선택한다. 다음으로 부하출력이 변할 경우 플랜트모델과 공칭플랜트사이의 모델오차에 대한 충분히 큰 안정성 여유도와 이상모델과의 모델정합 오차의 최소화를 유지시킬수 있도록 견실  $H^\infty$  제어기를 설계한다.

### II. 증기발생기 모델의 수학적 표현

Irving 등[5]은 급수유량과 증기유량의 계단변화에 따른 증기발생기 수위변화의 계단응답에 기초하여 수위변화, 급수유량의 변화, 그리고 증기유량의 변화의

항으로 4차의 증기발생기 전달함수를 이끌어 내었다. 이 모델은 급수유량의 변화에 따른 역동적 특성의 영향이 증기유량의 변화에 따른 동특성과 같다고 가정하였다. 그러나 실제상태에서는 서로 상당한 차이를 나타내며 1차측 냉각재 온도와 급수온도의 변화들의 영향을 고려하지 않았다. 이런 이유로, 본 논문은 Lee 등 [6,7]이 적용한 857MWt Westinghouse F-type 증기발생기의 열수력학적 모델에 바탕을 둔 네 개의 입력, 한 개의 출력을 가지는 선형 전달함수를 채택하였다. 이 모델에서 증기발생기의 수위변화에 영향을 미치는 주요 인자는 급수유량의 변화, 증기유량의 변화, 1차측 냉각재의 온도변화, 그리고 급수의 온도변화이다. 증기발생기의 수위변화는 이들 상호작용이 없는 4개의 입력인자들과 그들 자신의 전달함수들의 곱으로 얻어진다. 이 모델의 수학적 표현은

$$\Delta L(s) = G_1(s)\Delta W_f(s) + G_2(s)\Delta W_s(s) + G_3(s)\Delta T_p(s) + G_4(s)\Delta T_f(s) \quad (1)$$

과 같다. 여기서  $L$ ,  $W_f$ ,  $W_s$ ,  $T_p$ ,  $T_f$ 는 각각 수위(%), 급수유량(Kg/sec), 증기유량(Kg/sec), 1차측 냉각재의 온도(K), 그리고 급수온도(K)를 나타낸다. 또 기호  $\Delta$ 는 현재값과 주어진 동작조건에서 정상상태값의 차이 를 의미한다. 식 (1)에서 네 개의 전달함수는

$$G_1(s) = \frac{k_1}{s} + \frac{k_2 w_m^2}{s^2 + 2\zeta_1 w_m s + w_m^2}$$

$$G_2(s) = -\frac{k_1}{s} + \frac{0.05 k_3}{s + 0.05}$$

$$G_3(s) = \left[ \frac{k_4 (a_3 - b_3) s}{(s + a_3)(s + b_3)} + \frac{c_3 k_5}{s + c_3} \right] \exp(-d_3 s)$$

$$G_4(s) = \frac{k_6 w_m^2}{s^2 + 2\zeta_4 w_m s + w_m^2} \quad (2)$$

이다. 각 전달함수의 계수들은 일정 부하출력에서 특정인자를 제외한 나머지 인자들을 고정시키고, 특정인자를 변화시켰을때 증기발생기의 수위응답과 비선형 모델[5]의 수위응답과의 차이를 최소화하는 계수를 얻는다. 이러한 과정을 여러 값의 부하출력 상태에 대해 반복하여 각 계수들의 부하출력(p)에 대한 함수를 다항식으로 표현하였다. 4개의 전달함수에 대한 계수추출법에 의해 얻어진 계수들은

$$k_1 = 1.11 \times 10^{-4}$$

$$k_2 = -0.012097 e^{-0.09067p} - 0.001$$

$$\zeta_1 = 0.1985 e^{0.03p}$$

$$t_{p1} = 196.37 e^{-0.1245p} + 30$$

$$w_{m1} = \frac{3.141592}{t_{p1} \sqrt{1 - \zeta_1^2}}$$

$$k_3 = 0.0196 e^{-0.0735p} + 0.007$$

$$k_4 = \begin{cases} 1.17 \times 10^{-5} p^3 - 6 \times 10^{-4} p^2 + 0.01 p + 0.0223, & p \leq 25 \\ 0.081 - 0.0004(p - 25), & p > 25 \end{cases}$$

$$k_5 = \begin{cases} -2 \times 10^{-7} p^3 + 1.1 \times 10^{-5} p^2 + 2.7 \times 10^{-4} p + 0.0014, & p \leq 50 \\ 2.58 \times 10^{-4} (p - 50) + 0.0201, & p > 50 \end{cases}$$

$$b_3 = \frac{a_3}{10}$$

$$a_3 = \begin{cases} 0.0195 p + 0.0846, & p \leq 10 \\ 0.0107 p + 0.1725, & 10 < p \leq 15 \\ 0.0082 p + 0.21, & 15 < p \leq 20 \\ 0.0125 p + 0.124, & p > 20 \end{cases}$$

$$c_3 = \begin{cases} 0.001 p, & p \leq 5 \\ 0.399 p - 1.99, & 5 < p \leq 10 \\ 2.0, & p > 10 \end{cases} \quad (3)$$

$$d_3 = 2$$

$$k_6 = 4.43 \times 10^{-4} e^{0.0348p}$$

$$t_{p4} = 195 e^{-0.16p} + 22$$

$$\zeta_4 = \begin{cases} 0.535 e^{-0.16p}, & p \leq 15 \\ 0.172, & p > 15 \end{cases}$$

$$w_{m4} = \frac{3.141592}{t_{p4} \sqrt{1 - \zeta_4^2}}$$

과 같다.

### III. 모델정합 문제와 건설 안정화 문제

이 장에서는 제어기 설계를 위한 기본 개념을 소개한다. 모델정합 문제는 페루프 레환시스템의 출력이 미리 설정된 이상모델의 출력을 따라가도록 하는 안정화 제어를 설계하는 것이다.

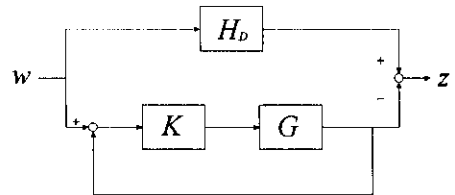


그림 1. 모델정합 구조  
Fig. 1. The structure of model-matching.

즉, 그림 1에서 아래 식 (4)와 같이 얻어지는 오차  $E(s)$ 를 최소화시키는 안정화 제어기  $K(s)$ 를 구해내는 것과 같다.

$$E(s) = \frac{z}{w} = H_D(s) - G(s)K(s)(I + G(s)K(s))^{-1} \quad (4)$$

여기서  $G(s)$ 는 주어진 플랜트이고  $H_D(s)$ 는 설계목적을 만족시키는 저차의 이상모델이다.

그림 2와 같이 가산섭동이 존재하는 레환 시스템에 대한 건설 안정화 문제는 아래 식 (5)로 표현되는 가산 안정성 여유도[1]

$$\delta_a = \frac{1}{\|K(I+GK)^{-1}\|_\infty} \quad (5)$$

를 크게 하기 위해  $T_{zw} = \frac{z}{w} = K(I+GK)^{-1}$ 의 H<sup>∞</sup>-노름을 최소화시키는 제어기 K(s)를 구해내는 것이다.

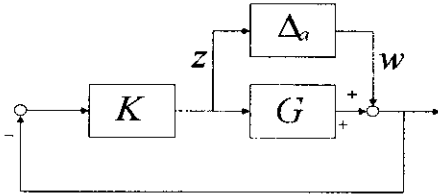


그림 2 가산성동이 존재하는 폐환 시스템  
Fig. 2. Feedback loop with additive model error.

### IV. 제어기 설계

#### 4.1 이상모델의 설정

증기유량, 1차측 냉각재 온도, 그리고 급수온도의 변화들로 인한 수위변화를 출력에 미치는 외란으로 간주하면 이 세 가지의 인자들이 계단형으로 변할 경우 수위변화는 램프형 감소로 근사화된다. 따라서 램프형 외란의 제거성능을 가지기 위해 정상상태 오차를 줄이는 폐환 시스템의 전달함수를 이상모델로 설정한다. 이때 페루프의 안정화와 목적하는 성능을 보장하기 위해 대역폭이 실제 플랜트의 우반면에 있는 제로점의 크기보다 작게 한다[9]. 설정한 이상모델은

$$H_D = \frac{8.405 \times 10^{-3}s + 5.043 \times 10^{-5}}{s^2 + 8.408 \times 10^{-3}s + 5.043 \times 10^{-5}} \quad (6)$$

과 같다.

#### 4.2 혼합 H<sup>∞</sup> 최적화 문제를 이용한 제어기 설계

모델정합만으로 설계된 페루프 폐환 시스템은 플랜트의 섭동에 너무 민감하다[3]. 따라서 본 논문은 모델정합과 동시에 부하출력이 변할 경우 플랜트 모델과 공칭플랜트 사이의 모델 오차에 대한 안정성 여유도 최적화를 동시에 고려한다.

견실 H<sup>∞</sup> 제어기 설계를 위한 모델정합을 포함한 안정성 여유도의 혼합 H<sup>∞</sup> 최적화 문제를 하중함수를 포함시켜 나타내면

$$\min_{K(s)} \left\| \begin{matrix} W_1(H_D - GK(1+GK)^{-1})W_3 \\ W_2K(1+GK)^{-1}W_3 \end{matrix} \right\|_\infty \quad (7)$$

와 같다. 식 (7)의 최소화 문제를 LLFT(lower linear fractional transformation)형식[8]으로 표현하면

$$\|F_i(P, K)\|_\infty = \left\| \begin{matrix} W_1(H_D - GK(1+GK)^{-1})W_3 \\ W_2K(1+GK)^{-1}W_3 \end{matrix} \right\|_\infty \quad (8)$$

과 같고 표준플랜트를 구하면

$$P = \left[ \begin{array}{c|c} W_1H_DW_3 & -W_1G \\ \hline 0 & W_2 \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} W_3 \\ -G \end{array} \right] \quad (9)$$

로 표시된다. 상태공간 표현으로 나타내기 위해

$$H_D = \begin{bmatrix} \hat{a} & \hat{b} \\ c & d \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad W_1 = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{bmatrix} \quad W_3 = \begin{bmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 & d_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

라 두면

$$P = \begin{bmatrix} a_1 & b_1\hat{c} & b_1\hat{d}c_3 & 0 & b_1c & b_1\hat{d}d_3 & -b_1d \\ 0 & \hat{a} & \hat{b}c_3 & 0 & 0 & \hat{b}d_3 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 & 0 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & -b \\ c_1 & d_1\hat{c} & d_1\hat{d}c_3 & 0 & d_1c & d_1\hat{d}d_3 & -d_1d \\ 0 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & c_3 & 0 & c & d_3 & -d \end{bmatrix} \quad (11)$$

과 같이 얻어진다. 여기서 G는 부하출력이 12%일 때 급수유량의 변화와 증기발생기 수위변화의 관계식 G<sub>1</sub>을 공칭플랜트로 결정하였다. 모델정합 목적과 안정성 여유도 목적의 상대적 중요성을 선택하는 최적화를 위한 하중함수 W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>, W<sub>3</sub>를 결정후 Glover-Doyle 알고리즘[2]을 이용해 식 (7)을 만족시키는 최종 제어기 K(s)를 설계한다. W<sub>1</sub>은 정상상태 추종성능과 좋은 외란제거의 성능을 위하여 높은 이득의 지연통과 필터 형태로 선택하고, W<sub>2</sub>는 페루프 시스템의 고주파 영역에서 가산 안정성 여유도의 향상을 위하여 고역통과 필터 형태로 선택하였다. 시행착오를 거쳐 선택한 하중함수는

$$W_1 = \frac{0.02s + 0.0005}{s}, \quad W_2 = \frac{s + 0.0714}{1000}, \quad W_3 = 0.002 \quad (12)$$

와 같고, 최종 제어기는

$$K(s) = \frac{0.8906s^2 + 0.0342s + 0.0021}{s^4 + 0.2697s^3 + 0.0243s^2 + 0.001s} \quad (13)$$

이다.

### V. 시뮬레이션 결과

그림 3과 그림 4는 출력을 초기 정상치 5%에서 30%로 5%/min의 비율로 올리는 경우 12%일때의 공칭플랜트에 대해 설계한 제어기를 이용한 결과를 나타낸다.

입력조건으로는 100초에서 과도 상태가 시작되는

것으로 하였으며 증기유량, 1차측 냉각재 온도, 그리고 급수온도의 변화들은 표 1에서 주어진 5%에 해당하는 값에서 30%에 해당하는 값까지 300초 동안 램프형으로 변화시켰다. 그리고 증기유량의 경우 2500초와 3500초에서 각각 20Kg/sec 제단형 증가, 감소로 외란을 가하였다.

수위에 영향을 미치는 네 가지 인자 중 증기유량, 급수유량의 변화가 주를 이룬다. 그러므로 그림 3에서 실선으로 표시된 급수유량의 변화는 제어기의 출력으로서 증기유량의 변화를 따라감을 알 수 있다. 그림 4에서 부하출력이 변하고 증기유량이 급격히 변할 때도 수위가 안정되게 제어됨을 알 수 있다.

표 1. 여러 동작조건에서 정상상태 값  
Table 1. The steady state values at various operating conditions.

Power (%)	$W_f=W_s$ (Kg/sec)	$T_b$ (K)	$T_f$ (K)
5	16.66	563.3	318.2
10	33.30	568.1	318.2
15	52.51	569.8	348.6
20	76.65	571.5	399.3
25	102.30	573.2	432.7
30	125.28	574.9	444.2

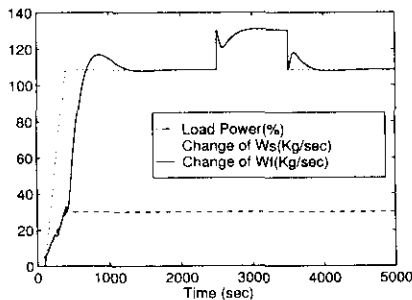


그림 3. 출력, 증기유량, 그리고 급수유량의 변화  
Fig. 3. Power variation and the corresponding behaviors of feedwater/steam flow rates.

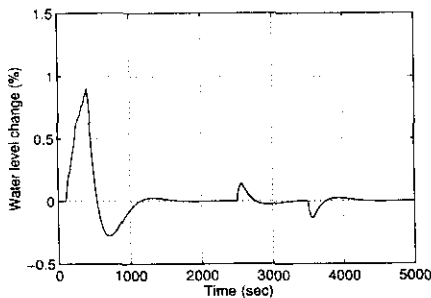


그림 4. 증기발생기 수위변화  
Fig. 4. The level variation of steam generator.

## VI. 결론

본 논문에서는 부하출력이 변할 경우 발생하는 실체플랜트와 공칭플랜트사이의 모델오차로 인한 불확실성과 증기유량, 1차측 냉각재의 온도 그리고 급수온도의 변화들로 인한 수위변화와 같은 외란이 존재하는 증기발생기의 수위를 제어하기 위해 모델정합과 가산 실용 플랜트의 안정성 여유도의 혼합  $H^\infty$  최적화기법을 이용하여 결실  $H^\infty$  제어기를 설계하였다. 시뮬레이션을 통해 특정 부하출력에 대해 설계한 제어기가 부하출력이 변할때도 외란제거의 성능을 가짐을 보였다.

## 참고 문헌

- [1] M. Green, D. J. N. Limebeer, *Linear Robust Control*, Prentice-Hall, 1995.
- [2] K. Glover and J. C. Doyle, "State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an  $H^\infty$ -norm bound and relations to risk sensitivity," *Systems & Control Letters*, vol. 11, pp. 167 -172, 1988.
- [3] D. W. C. Ho, J. Lam, and T. W. K. Chan, "An application of  $H^\infty$  design to model-following," *Int. J. Control*, Vol. 55, no. 2, pp. 483-509, 1992.
- [4] D. W. C. Ho, J. Lam, and T. W. K. Chan, "Mixed  $H^\infty$  optimization with model-matching," *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 141, no. 5, pp. 329-340, 1994.
- [5] E. Irving, et al., "Toward efficient full automation operation of the PWR steam generator with water level adaptive control," *Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Station*, pp. 309-329, 1980.
- [6] S. J. Lee, et al., "A study on the development of application techniques to nuclear power plant control systems using a hierarchical control structure," *1st Annual Report, KAERI*, 1994.
- [7] Y. J. Lee and U. C. Lee, "Digitalization of the nuclear steam generator level control system," *Journal of the Korean Nuclear Society*, vol. 25, no. 1, pp. 125-135, 1993.
- [8] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Grover, *Robust and optimal control*, Prentice-Hall, 1996.
- [9] K. Zhou and J. C. Doyle, *Essentials of robust control*, Prentice-Hall, 1998.
- [10] 이윤준, "원자력발전소 증기발생기의 저출력 수위 조절에 대한 연구," 서울대학교 박사학위 논문, 1991.