

원전 증기발생기 저출력 수위제어를 위한 강인제어기법에 관한 연구

안 국 훈
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문에서는 Westinghouse(WH)사에서 공급한 고리 3, 4호기의 증기발생기 모델에 강인제어 기법의 하나인 QFT(Quantitative Feedback Theory)를 적용하여 플랜트에 존재하는 불확실성이나 외란에 대해 강인성을 보장하는 제어기를 설계하였다. 증기발생기의 주파수응답 한계조건은 MATLAB QFT Toolbox를 이용하였으며, loop shaping에 의한 전달함수 식별을 위해서 근사화 기법을 적용하였다. 그리고 5~20[%]의 저출력구간에서 모의실험을 하여 본 논문의 유용성을 보였다.

1. 서 론

원자력발전소 증기발생기는 1차 냉각재의 열에너지를 2차 냉각재로 전달하여 터빈-발전기를 구동하기 적절한 압력하의 포화수증기를 발생시키는 일종의 관류형 열교환기이다. 증기발생기의 수위제어계통은 전출력 운전범위에서 자동으로 제어되는데, 안정되고 신뢰성이 있는 제어를 위해 3개의 보조계통이 있다. 즉, 주급수 조절계통은 출력 15~100[%]에서 주급수밸브를 자동으로 조절하며, 주급수 우회조절계통은 저출력 0~20[%]에서 주급수 우회밸브를 자동으로 제어한다. 세 번째로 주급수펌프 속도제어계통은 출력 15[%] 이상에서 자동으로 속도를 제어하는데, 이 제어계통은 특별한 프로그램으로 설계된 주증기 공통관과 주급수 공통관의 차압을 유지하는 것이다. 이상에서 설명한 각 계통은 언제라도 수동 운전이 가능하도록 설계되어 있다.[1],[2],[3]

이러한 증기발생기의 수위제어계통에서는 저출력단계에서는 수위를 설정치로 유지시켜 주지 못할 수 있기 때문에 숙련된 운전원의 수동운전에 의존하여 왔다. 따라서 증기발생기 수위제어계통은 평형상태에서 크게 벗어나지 않도록 급수량을 조절하고, 정상운전 뿐만 아니라 저출력 과도상태 운전시에도 안정된 제어효과를 얻을 수 있는 강인제어기법을 필요로 한다.

QFT는 플랜트에 불확실성 또는 외란이 존재할 때 시스템의 오차허용도를 보장할 수 있는 설계방법으로 Horowitz에 의해 제안되었다.[4] 이 QFT를 이용하는 제어기법은 모든 설계절차가 주파수영역에서 수행되며, 설계과정에서 loop shaping은 기준시간응답에 대응하는 주파수응답의 한계조건을 Nichols 선도에 표현하고, 이러한 조건에 맞는 개루프 전달함수를 식별하는 과정이다. 본 논문은 [5]의 근사화기법을 QFT에 이용하고, 원전 증기발생기 수위제어계통에 적용하여 저출

력시 수위를 일정하게 유지하는 강인제어기를 설계하는데 그 목적이 있다.

본 논문에서는 MATLAB QFT Toolbox를 이용하여 증기발생기의 주파수응답 한계조건을 결정하였으며, [5]의 근사화기법을 적용하여 강인제어기를 설계하였다. 그리고 저출력구간 즉 5%, 10%, 15%, 20%의 저출력 운전모드에서 모의실험하였다.

2. 증기발생기 모델

Westinghouse 증기발생기 모델을 전달함수 관계로 표현하면 다음과 같다.

$$L(s)=[P_1(s) P_2(s) P_3(s) P_4(s)] \cdot [W(s) W_s(s) T_p(s) T_\lambda(s)]^T \quad (1)$$

여기서, $L(s)$, $W(s)$, $W_s(s)$, $T_p(s)$, $T_\lambda(s)$ 는 각각 증기발생기의 수위, 급수량, 증기량, 1차측 냉매 온도와 급수온도를 나타낸다.

수축현상을 고려한 급수량에 대한 수위변화의 관계를 전달함수로 표현하면 다음과 같다.

$$P_1(s) = \frac{k_1}{s} + \frac{k_2 \cdot \omega_{n1}^2}{s^2 + 2\zeta_1 \cdot \omega_{n1} \cdot s + \omega_{n1}^2} \quad (2)$$

$$k_1 = 1.1 \times 10^{-4} \quad (3)$$

$$k_2 = -0.012097 \exp(-0.09067p) - 0.001 \quad (4)$$

$$t_{p1} = 196.37 \exp(-0.1245p) + 30 \quad (5)$$

$$\zeta_1 = 0.1985 \exp(0.03p) \quad (6)$$

$$\omega_{n1} = \frac{\pi}{t_{p1} \sqrt{1 - \zeta_1^2}} \quad (7)$$

여기서, p 는 power[%]를 나타낸다.

팽창현상을 고려한 증기량에 대한 수위변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_2(s) = -\frac{k_1}{s} + \frac{0.05k_3}{s+0.05} \quad (8)$$

$$k_3 = 0.0196 \exp(-0.0735p) + 0.007 \quad (9)$$

또한, 1차측 냉매온도에 대한 수위변화의 관계는 다음과 같다.

$$P_3(s) = \left[\frac{k_4 \cdot (a_3 - b_3) \cdot s}{(s + a_3) \cdot (s + b_3)} - \frac{c_3 \cdot k_5}{s + c_3} \right] \exp(-d_3 \cdot s) \quad (10)$$

$$k_4 = \begin{cases} 1.17 \times 10^{-5} p^3 - 6 \times 10^{-4} p^2 + 0.01p + 0.0223 & , p \leq 25 \\ 0.0801 - 0.0004(p-25) & , p > 25 \end{cases} \quad (11)$$

$$k_5 = \begin{cases} -2 \times 10^{-7} p^3 + 1.1 \times 10^{-5} p^2 + 2.7 \times 10^{-4} p + 0.0041 & , p \leq 50 \\ 2.58 \times 10^{-4} (p-50) + 0.0201 & , p > 50 \end{cases} \quad (12)$$

$$a_3 = \begin{cases} 0.0195p + 0.0846 & , p \leq 10 \\ 0.0107p + 0.1725 & , 10 < p \leq 15 \\ 0.0082p + 0.21 & , 15 < p \leq 20 \\ 0.0125p + 0.124 & , 20 < p \end{cases} \quad (13)$$

$$b_3 = \frac{a_3}{10} \quad (14)$$

$$c_3 = \begin{cases} 0.001p & , p \leq 5 \\ 0.399p - 1.99 & , 5 < p \leq 10 \\ 2.0 & , 10 < p \end{cases} \quad (15)$$

$$d_3 = 2 \quad (16)$$

마지막으로 급수온도에 대한 수위변화는 다음과 같다.

$$P_4(s) = \frac{k_6 \cdot \omega_{nd}^2}{s^2 + 2\zeta_4 \cdot \omega_{nd} \cdot s + \omega_{nd}^2} \quad (17)$$

$$k_6 = 4.43 \times 10^{-4} \exp(0.0348p) \quad (18)$$

$$t_{pd} = 195 \exp(-0.16p) + 22 \quad (19)$$

$$\zeta_4 = \begin{cases} 0.535 \exp(-0.16p) & , p \leq 15 \\ 0.172 & , p > 15 \end{cases} \quad (20)$$

$$\omega_{nd} = \frac{\pi}{t_{pd} \sqrt{1 - \zeta_4^2}} \quad (21)$$

그림 1은 나머지 입력변수를 고정시키고, 각각의 입력변수에 단위계단입력을 가한 경우의 응답 특성을 보여준다.

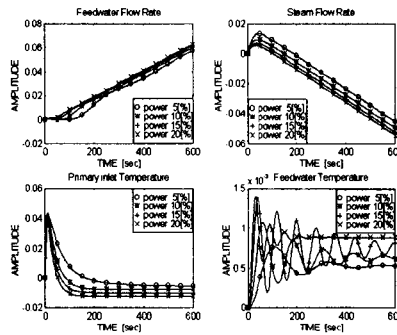


Fig. 1. Responses of PWR steam generator for unit step increase

3. QFT에 의한 증기발생기 수위제어계통의 설계

QFT의 적용을 위해 재구성한 원전 증기발생기의 수위제어계통은 그림 2와 같다.

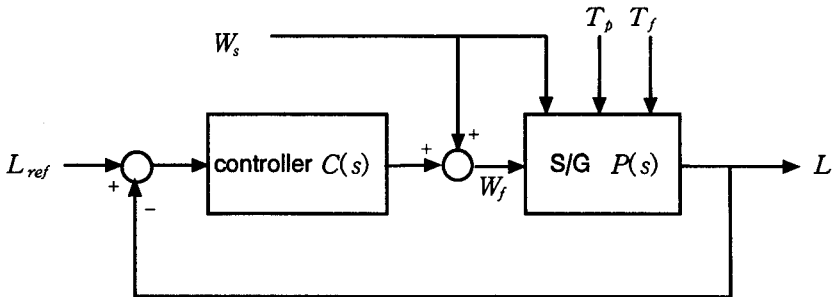


Fig. 2. Overall control systems including steam generator

그림 2의 확장모델로부터 W_s , T_p , T_f 를 입력으로 하는 $P_2(s)$, $P_3(s)$, $P_4(s)$ 의 출력을 외란의 형태로 간주하면, 제어기의 설계를 위한 플랜트의 불확실성은 $P_1(s)$ 에서만 고려할 수 있게 된다. 그리고 $P_1(s)$ 는 출력 5~20[%]의 범위에서 구간 플랜트이므로 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$P_1(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s(s^2 + a_1 s + a_0)} \quad (22)$$

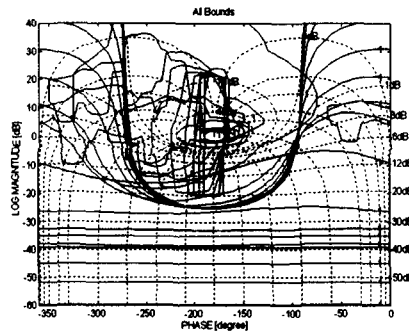
$$\begin{aligned}
a_0 &\in [5.6882 \times 10^{-4}, 5.3013 \times 10^{-3}] \\
a_1 &\in [1.1001 \times 10^{-2}, 5.2670 \times 10^{-2}] \\
b_0 &\in [6.2570 \times 10^{-8}, 5.8315 \times 10^{-7}] \\
b_1 &\in [-9.9672 \times 10^{-6}, -3.7316 \times 10^{-6}] \\
b_2 &= 1.1 \times 10^{-4}
\end{aligned} \tag{23}$$

식 (23)으로부터 $P_1(s)$ 는 비최소위상 영점을 포함하고 있음을 알 수 있다. QFT의 적용을 위한 공칭모델을 선정함에 있어서 이 모델은 차수가 변하지 않으므로 출력 5[%]의 모델을 공칭값으로 결정할 수 있다. MATLAB QFT Toolbox를 이용하여 선정된 주파수응답 한계조건은 그림 3과 같다. 그림 3의 (a)는 강인안정조건을 6[dB]로 가정하고, 식 (24)의 상한유계를 기준 주파수응답 조건으로 설정하여 선정 한계조건을 나타낸다.

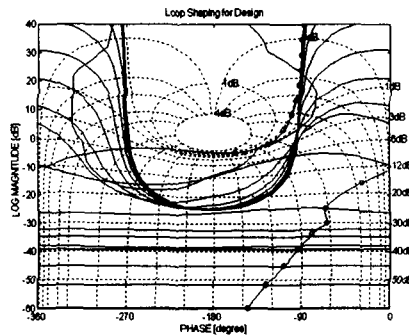
$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| = \left| \frac{C(j\omega)P_1(j\omega)}{1+C(j\omega)P_1(j\omega)} \right| \leq W_s \tag{24}$$

$$W_s(j\omega) = \frac{1.1 \times 10^{-2}(j\omega)^2 - 3.7316 \times 10^{-4}(j\omega) + 6.2570 \times 10^{-6}}{(j\omega)^4 + 2.0176(j\omega)^3 + 4.4643 \times 10^{-2}(j\omega)^2 + 3.9508 \times 10^{-4}(j\omega) + 1.2514 \times 10^{-5}} \tag{25}$$

그림 3의 (b)는 (a)의 조건에 맞는 loop shaping 결과를 나타낸다. 이 데이터를 이용하여 공칭 개루프 전달함수 $L_0(s)$ 를 식별한다.



(a) bounds for loop shaping



(b) loop shaping for design

Fig. 3. Design procedure using the QFT

그림 4는 [5]의 근사화기법을 적용하여 추정된 개루프 전달함수의 주파수응답을 나타낸다. 그리

고 설계된 제어기의 전달함수 $C(s)$ 는 다음과 같다.

$$C(s) = \frac{100s^2 + 7.4583s + 1.0770}{s^3 + 2.1145s^2 + 0.22772s + 0.022505} \quad (26)$$

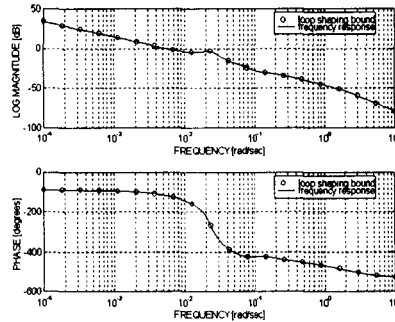


Fig. 4. Results of loop shaping approximation technique

4. 설계된 제어기에 의한 모의실험 결과

그림 5, 6, 7은 설정된 모의실험환경 하에서의 급수량과 수위변화를 나타낸다. 그림 5에서의 모의실험환경은 1,500~2500[sec]에서 증기량이 10[%] 계단 상승한 경우이고, 그림 6과 7은 전구간에서 정현파의란과 50[%]의 랜덤 노이즈가 첨가된 경우이다.

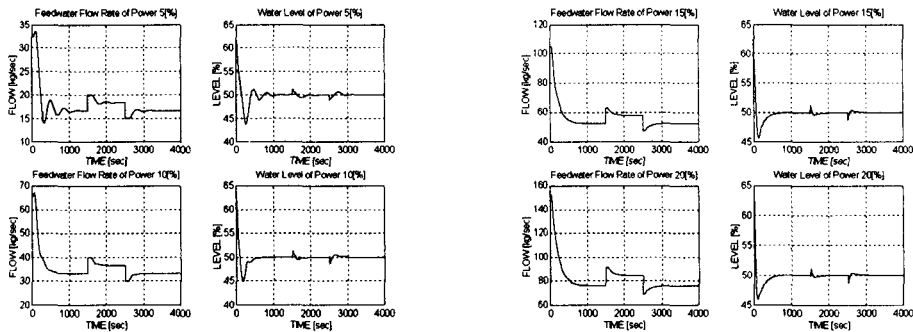


Fig. 5. Variation of feedwater flow rate and water level for 10[%] step disturbances

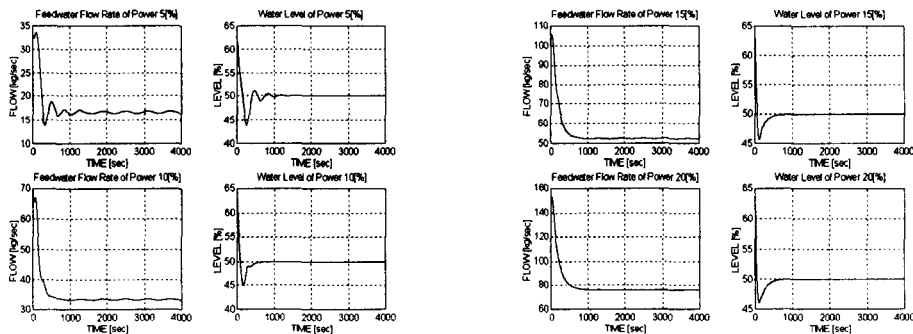


Fig. 6. Variation of feedwater flow rate and water level for sinusoidal disturbances

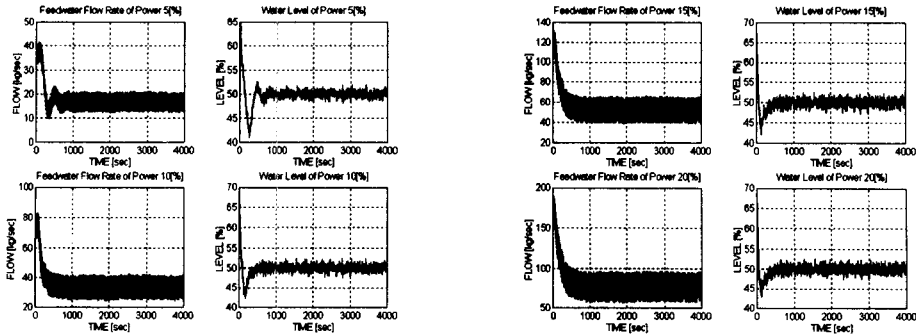


Fig. 7. Variation of feedwater flow rate and water level for random noise

5. 결론

본 논문에서는 원전 증기발생기의 수위제어를 위해 QFT를 적용하여 제어기의 게인값의 별도 조정 없이 저출력 구간에서 강인성을 보장하는 강인제어기를 설계하였다. 적용을 위한 증기발생기는 Westinghouse 모델을 선정하였으며, 이 모델이 구간에 따라 계수값이 변하는 구간 플랜트의 형태로 표현되기 때문에 QFT를 적용하는데 용이하였다. 설계과정에서 loop shaping 근사화기법을 이용하였으며, 이때 증기발생기는 비최소위상 영점을 포함하고 있다. 본 논문에서는 공칭모델에 비최소위상영점을 포함시킨 출력 5[%] 모델을 사용하였으나 이에 대한 보다 적절한 고려가 필요하다. 또한 증기량, 1차측 냉매온도, 급수온도에 확실성을 별도로 고려한 보다 일반적인 연구가 선행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. L.E. Engelhardt et al., "Setpoint study for Korea nuclear units 5 & 6", Westinghouse Electric Corp., Pittsburgh, 1983.
2. "Precautions, Limitations and setpoint of Korea nuclear units 7 & 8", Westinghouse Electric Corp., Pittsburgh, 1984.
3. 이윤준, "원자력발전소 증기발생기의 저출력 수위조절에 대한 연구", 서울대학교 공학박사학위논문, 1991.
4. I. Horowitz, "Synthesis of Feedback Systems", Academic Press, New York, 1963.
5. J.S. Kim and J.W. Ryu et al., "The Recursive Approximation Algorithm for Loop Shaping of QFT", ICEE'96, Vol.2, pp.1219~1222, 1996.
6. I. Horowitz, "Quantitative Feedback Theory", IEE Proc., Vol.129, No.6, pp.215~226, 1982.
7. I. Horowitz, "Survey of QFT", Int. J. Cont., Vol.3, No.2, pp.255~291, 1991.
8. J.S. Kim and J.W. Ryu, "A design of turbine speed control systems by using QFT", J. of Ind. Sci. and Tech. Ins., Vol.9, No.2, pp.181~192, 1995.
9. J.S. Kim and J.W. Ryu et al., "A design of the hydro turbine speed controller using the quantitative feedback theory", ICEE'96, Vol.2, pp.1219~1222, 1996.