

슬라이딩 모드 제어를 이용한 원전 증기 발생기의 수위 제어

김광수, 김형진, 김윤철, 조동일
서울대학교 전기 및 컴퓨터 공학부

An Application of Sliding Mode Controller to Nuclear Steam Generator Water Level Control

Kwangsoo Kim, Hyungjin Kim, Yunchul Kim, Dong-il "Dan" Cho

School of Electrical Engineering and Computer Sciences, Seoul National University

Abstract - 원자력 발전소의 증기 발생기는 증기량과 급수량에 대한 비최소위상 특성과 비선형성, 그리고 입력 제한 특성을 가지고 있다. 이러한 특성들은 증기 발생기의 효과적인 수위 제어에 어려움을 주고 있다. 본 논문에서는 게인 스케줄링 기법과 변형된 슬라이딩 모드 제어 기법을 이용한 원전 증기 발생기 제어를 제안한다. 또한 앞먹임 구조를 가진 PI 제어를 설계하여 저 출력 영역에서 제안된 슬라이딩 모드 제어기와 성능을 비교한다. 모의 실험 결과 제안된 슬라이딩 모드 제어기가 최대 수위, 최소 수위, 그리고 안정화 시간 면에서 개선된 성능을 보였다.

모델 예측 제어기[1]가 발표되었다. 이들 연구 결과는 모두 특정 출력 구간에 대해 설계되며 전 출력 구간에서의 좋은 성능을 위해 게인 스케줄링 기법을 채택하고 있다.

본 논문에서는 원자력 발전의 증기 발생기의 수위 제어를 위해 관측자를 포함한 변형된 슬라이딩 모드 제어를 제안한다. 제어 입력이 부호 함수를 이용한 보정항을 포함하지 않고 있다는 점에서 일반적인 슬라이딩 모드 제어기와 다르며 이것은 제어입력의 양에 값으로의 제한에 의해 일반적 슬라이딩 모드 제어기의 적용이 불가능하기 때문이다. 전체 시스템의 안정성은 페루프 전 달함수 극점을 복소좌평면(left-half plane: LHP)에 위치하도록 제어기 게인을 조정함으로써 보장된다. 측정 가능한 상태변수는 수위뿐이라는 가정을 하였고, 상태변수의 추정을 위해 관측자가 추가되었다.

본 논문은 먼저 원자로 증기발생기의 간단한 구조와 플랜트의 특징을 설명하고 제어기 설계를 위한 모델을 소개한다. 다음으로 플랜트에 슬라이딩 모드 제어 기법을 도입하여 제어기를 설계하고 마지막으로 몇 가지 기준 사건 하에서의 모의 실험을 통해 설계된 제어기의 성능을 검증하고 결론을 맺는다.

1. 서 론

원자력 발전소 원자로의 빈번한 운전 중지는 경제적 손실을 일으키며 안전성 면에서도 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 원자로 운전 중지의 가장 큰 원인 중 하나는 미약한 급수 시스템의 증기 발생기 수위 조절능력이다. 원자로 증기 발생기 내의 수위가 너무 높아지면 증기의 과잉 공급으로 인해 터빈에 무리를 주게 되는 반면 낮은 수위는 U자형 튜브를 물 밖으로 노출시켜 열에 의한 손상을 야기한다. 두 경우 모두 원자로 운전 중지를 일으키며 원자력 발전소 안전을 위협하게 된다.

증기 발생기의 몇 가지 특징은 수위 조절 제어기 설계를 난해하게 한다. 첫째, 증기 발생기는 강한 비선형성을 가져 선형 모델로 근사화시키더라도 모델의 인자들이 출력 전력의 함수가 된다. 따라서 전영역에서 잘 동작하는 단일 제어를 설계하기 힘들다. 둘째, 증기 발생기는 비최소위상 특성을 나타낸다. 이것은 증기 발생기내의 팽창과 수축(swell and shrink) 현상에서 비롯되며 이러한 현상은 기상과 액상을 동시에 포함하는 열역학적 분석을 통해 설명된다[1]. 플랜트의 비최소위상 특성은 제어기의 주파수 대역폭을 제한하며 결국 플랜트 응답을 느리게 만든다[2]. 셋째로, 제어 입력은 항상 양의 값을 갖는다. 여기서의 제어 입력이란 급수량을 의미하며 제어 입력이 음의 값을 갖는다는 의미는 물을 밖으로 빼내는 것을 말하는데 이는 물리적으로 불가능하다. 제어입력의 양에 값으로의 제한은 여러 가지 다양한 제어 기법을 적용하는데 있어 어려움을 주고 있다.

PID 제어를 포함하여, 여러 가지 다른 제어기법들이 증기발생기 수위 조절에 적용되어 왔다. 그 중에서도 특히 퍼지 기법을 적용한 사례는 여러 문헌에서 찾아볼 수 있다. Alkin은 증기발생기 운전자의 경험에서 취득된 50개가 넘는 문법을 채택하여 전통적인 퍼지 논리 기반 제어를 설계하였다[3]. Na는 유전자 알고리즘을 첨가한 퍼지 제어를 설계하였다[4]. Cho와 No는 퍼지 상평면에서 리아푸노프의 시스템 안정성 판정법을 이용한 안정성 보장 퍼지 논리 제어 법칙을 유도하는 과정에 대해 제안하였다[5]. 퍼지논리 제어기 외에도 LQG/LTR 제어기[6], 적응 관측자 기반 제어기[7],

2. 본 론

2.1 증기 발생기의 모델 소개 및 특징

원자력 발전기는 크게 원자로, 증기발생기, 터빈, 압축기 그리고 터빈 제어 밸브로 구성되어 있다. 증기 발생기는 원자로에서 핵분열을 통해 발생하는 열에너지를 이용하여 물을 증기로 기화시키는 작용을 하고 터빈 제어 밸브는 터빈으로 유입되는 증기량을 조절하여 발전량을 결정한다. 이 외에 급수 장치는 증기량으로 빠져나가는 물을 보충해 주는 역할을 담당한다. 그림 1은 원자로의 전체 시스템 요약도와 증기 발생기의 요약도이다.

증기량과 급수량은 증기발생기 수위를 결정하는 주요 요인으로 최종 수위는 이들 두 영향에 의한 수위의 중첩으로 나타난다. 하지만 팽창과 수축현상 때문에 증기 발생기를 수학적으로 모델링 하기란 쉽지 않으며 원활한 운전 운용에 있어 또 하나의 큰 연구 과제가 되고 있다. 참고문헌[8]은 비교적 간단하면서도 이러한 현상을 잘 표현하고 있는 모델을 제시하였으며, 본 논문에서는 참고문헌 [8]에서 제시한 모델을 이용한다.

증기량과 수위 그리고 급수와 수위 사이의 관계를 나타내는 전달함수를 각각 $H_s(s)$ 와 $H_f(s)$ 라 하면 식 (1)과 식 (2)와 같이 나타내진다.

$$H_s(s) = -\frac{K_1}{s} + V_{sl}(s) \frac{0.05}{s+0.05} \quad (1)$$

$$H_f(s) = \frac{K_1}{s} - V_{sl}(s) \frac{\omega_n(s)^2}{s^2 + 2a(s)s + \omega_n(s)^2} \quad (2)$$

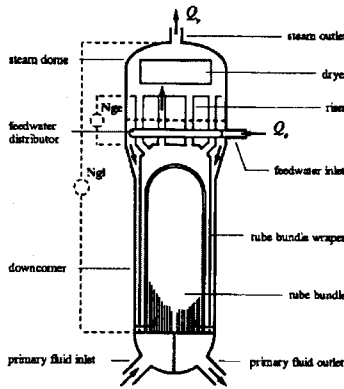
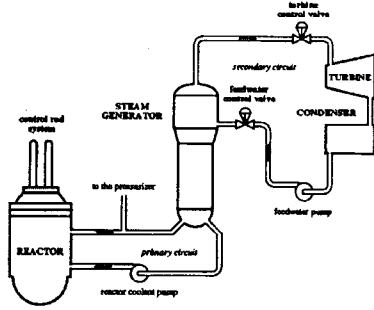


그림 1. 원자력 발전기와 증기 발생기의 요약도(1)

여기서 K_1 은 상수이며 V_{s1} , V_{s2} , a 와 w_n 은 모두 출력 전력의 함수이다. 식(1)의 첫번째 항은 적분기 형태를 띠고 있고 음의 부호는 증기량에 의해 수위가 감소함을 의미하고, 두번째 항은 팽창과 수축 현상을 나타내고 있다. 식(2)도 식(1)과 마찬가지로 해석될 수 있다. 그림 2는 전체 시스템의 블록 다이어그램을 나타낸다.

2.2 제어기 설계

급수량과 수위 사이의 관계를 나타내는 전달함수는 식(3)과 같이 간단한 형태로 표현된다.

$$y(s) = \frac{K_1(s-z_1)(s-z_2)}{s(s-p_1)(s-p_2)} u(s) = T(s)u(s) \quad (3)$$

여기서 극점과 영점은 출력의 함수이다. 식(3)에 증기량 v 에 의한 수위 변화를 포함하고, 제어기 설계를 위해 다음과 같이 제어가능 표준형(controllable canonical form)으로 변형한다.

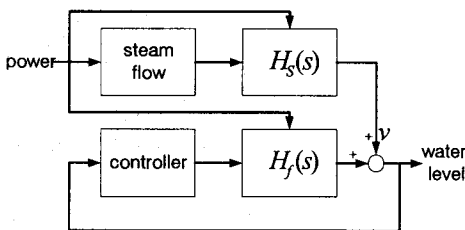


그림 2. 시스템 블록 다이어그램

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -p_1 p_2 & (p_1 + p_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_1 \end{bmatrix} u \quad (4)$$

$$y = [z_1 z_2 \quad -(z_1 + z_2) \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + v$$

식(4)에서 상태 변수들은 다음과 같다.

$$x_1 = \frac{v-v}{N(s)}, \quad x_2 = s \frac{v-v}{N(s)}, \quad x_3 = s^2 \frac{v-v}{N(s)} \quad (5)$$

여기서 $N(s) = s^2 - (z_1 + z_2)s + z_1 z_2$ 이고 v 는 증기량을 나타내는데, 급수를 제어 입력으로 보고 수위를 시스템의 출력으로 보면 증기량은 일종의 외란으로 볼 수 있다. 따라서 제어의 목적은 출력 파워에 따라 임의로 변하는 증기량에 관계없이 급수량을 조절하여 수위를 일정하게 유지시키는 것이다.

이제 습동 평면을 다음과 같이 선정한다.

$$S = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_4 \int y dt + c_5 \int \int y dt \quad (6)$$

식(6)에서 c_3 를 1로 임의로 설정하고 양변을 미분한 다음 식(4)를 이용하여 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$\dot{S} = (c_1 - p_1 p_2) x_2 + (c_2 + p_1 + p_2) x_3 + K_1 u + c_4 y + c_5 \int y dt \quad (7)$$

식(7)의 양변이 0이 되도록 하는 제어입력을 u_{eq} 라 하면, u_{eq} 는 식(7)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_1 u_{eq} = g_2 x_2 + g_3 x_3 + g_4 y + g_5 \int y dt \quad (8)$$

여기서 $g_i (i=2, \dots, 5)$ 는 식 전개를 간단히 하기 위해 치환된 계수들이다. 계수 $g_i (i=2, \dots, 5)$ 의 값을 설정하기 위해 식(8)로 주어지는 입력을 인가하고 식(3)과 식(5)를 이용하여 증기량과 수위사이의 전달함수를 구하면 식(9)와 같다.

$$y(s) = \frac{N_c(s)}{D_c(s)} u(s) \quad (9)$$

여기서, N_c 과 D_c 은 다음과 같다.

$$N_c(s) = s^4 - (p_1 + p_2 + g_3)s^3 + (p_1 + p_2 - g_2)s^2 \quad (10)$$

$$D_c(s) = s^4 - (p_1 + p_2 + g_4 + g_3)s^3 + (p_1 p_2 + g_4(z_1 + z_2) - g_5 - g_2)s^2 + (-g_4 z_1 z_2 + g_5(z_1 + z_2))s - g_5 z_1 z_2 \quad (11)$$

식(9)와 같이 주어지는 전달 함수에서 특성방정식은 4차식이므로 네 개의 극점을 갖게 되고 원하는 위치에 극점을 배치시키도록 계수 $g_i (i=2, \dots, 5)$ 의 값을 설정할 수 있다. 원하는 위치의 극점들을 p_{c1} , p_{c2} , p_{c3} , p_{c4} 라고 하면 $D_c(s) = (s-p_{c1})(s-p_{c2})(s-p_{c3})(s-p_{c4})$ 와 식(11)을 등식으로 놓고 $g_i (i=2, \dots, 5)$ 의 값을 찾을 수 있다. 이 과정에서 원하는 극점들의 위치를 모두 LHP에 위치시킴으로써 안정성을 보장할 수 있다. 또한 모든 출력 범위에서 좋은 성능을 얻기 위해서 계수 $g_i (i=2, \dots, 5)$ 의 값들은 출력의 파워를 몇 개의 구간으로 나누고, 튜닝을 통하여 각 구간에서 각각 다른 값들을 설정하는 게인 스케줄링 기법을 이용한다.

2.3 관측자 설계

본 논문에서는 증기 발생기의 수위정보만을 얻을 수 있다고 가정하였다. 따라서 제어입력을 위한 상태 변수 x_1 , x_2 , x_3 에 대한 정보는 직접적으로 얻을 수 없으므로 이 값들을 추정하는 관측자가 필요하다. 다음과 같이 표현되는 전차수 상태 관측자 (full-order state

observer)를 이용한다.

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}} &= A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{x} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서 L 은 관측자 3×1 의 게인 행렬로서 관측자에서 계산된 수위와 실제 플랜트 상에서의 수위 사이에 존재하는 오차를 줄여주도록 설정되어야 하는 변수이다. 게인 행렬 L 의 값을 결정하기 위해 전환 행렬(transform matrix)을 이용하여 식(12)를 관측가능 표준형 (observable canonical form)으로 고친다.

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}} &= A_o\hat{x} + Bu + L_o(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C_o\hat{x} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서

$$A_o = T^{-1}AT, L_o = T^{-1}L, C_o = CT$$

그리고

$$T = (WN)^{-1}, W = \begin{bmatrix} p_1 p_2 & -(p_1 + p_2) & 1 \\ -(p_1 + p_2) & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix}$$

이다. 식(4)와 식(13)을 이용하면 오차를 $e = y - \hat{y}$ 라 정의할 때, 다음과 같은 오차 동역학식을 얻을 수 있다.

$$\dot{e} = (A_o - L_o C_o)e \quad (14)$$

여기서 오차 e 를 점근적으로 0으로 수렴하도록 L_o 의 값을 설정하고 전환 행렬 T 를 이용하여 다시 L 의 값을 결정한다.

그림 3은 Matlab/Simulink로 구현된 전체 시스템을 보여준다. 전체 시스템에는 플랜트와 제어기, 관측자가 포함되어 있으며 제어기 게인과 관측자 게인은 각 출력 구간에서 달라지므로 S-function을 써서 구현하였다. 그림 4는 제어기의 상세한 블록 다이어그램을 나타낸다.

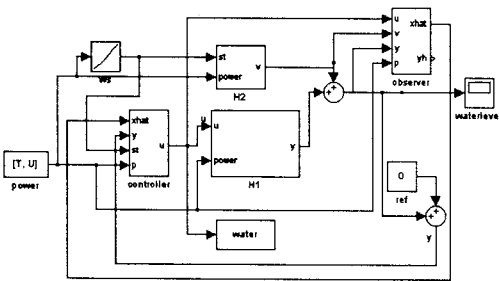


그림 3. 전체 시스템 블록 다이어그램

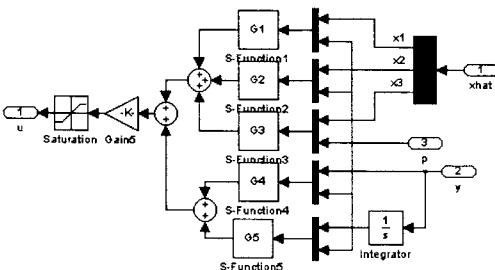
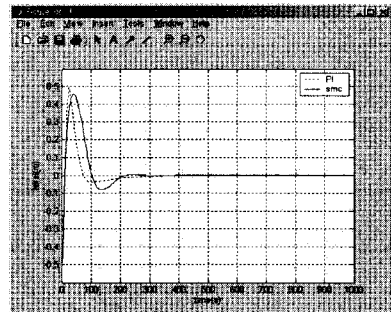


그림 4. 제어기 블록 다이어그램

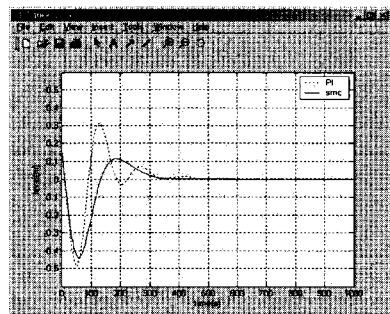
2.4 모의 실험 결과

구현된 제어기의 성능을 검증하기 위해 앞먹임 구조를 가진 PI 제어기를 비교 대상으로 선택하였다. 앞먹임 구조를 가진 PI 제어기는 수위 정보외에 증기량까지 측정 가능하다고 가정하고, 고전적인 PI 제어 기법에 증기량을 고려한 입력이 추가되어 있다. 앞먹임 구조를 가진 PI 제어기도 게인 스케줄링 기법을 채택하였다.

일반적으로 증기발생기 수위 제어는 고출력보다는 저출력에서 어렵다고 알려져 있기 때문에 구현된 두 제어기를 5%에서 25% 사이의 저출력 구간에서 성능을 비교하였다. 모의 실험을 위한 첫 번째 기준 사건은 출력이 5%에서 25%로 계단증가 할 경우와 25%에서 5%로 계단감소 할 경우이고, 두 번째 기준사건은 5%로 6%로 계단증가 및 6%에서 5%로 계단 감소하는 경우이다. 그림 5과 그림 6은 각각 첫 번째 기준사건과 두 번째 기준 사건에 대한 모의 실험 결과를 나타내고 있다. 그림 5와 그림 6에서 점선은 앞먹임 구조를 가진 PI 제어기의 결과를 나타내며 실선은 본 논문에서 제안된 변형된 슬라이딩 모드 제어기의 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 제안된 변형된 슬라이딩 모드 제어기가 수위 정보만을 가지고서도 최대값, 최소값, 안정화 시간면에서 앞먹임 구조를 가진 PI 제어기보다 개선된 결과를 보여주었다. 모의실험의 수치적 결과들을 표 1에 정리하였다.

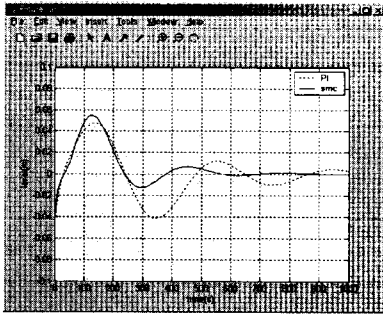


(a) 15%에서 25%로 계단 증가

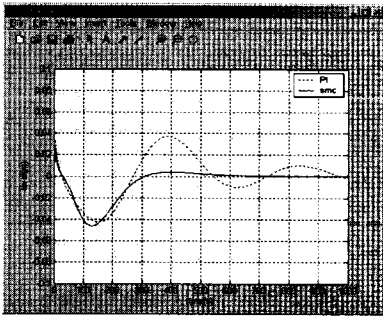


(b) 25%에서 15%로 계단 감소

그림 5. 출력이 15%에서 25% 사이일 때의 수위 응답



(a) 5%에서 6%로 계단 증가



(b) 6%에서 5%로 계단 감소

그림 6. 출력이 5%에서 6% 사이일 때의 수위 응답

표 1. 모의 실험 결과 비교

기준사건	비교 항목	PI+앞먹임	슬라이딩 모드 제어
15%에서 25%로 계단 증가	최대 수위	0.48	0.45
	최소 수위	-0.57	-0.57
25%에서 15%로 계단 감소	최대 수위	0.31	0.17
	최소 수위	-0.49	-0.44
5%에서 6%로 계단 증가	최대 수위	0.048	0.055
	최소 수위	-0.042	-0.041
6%에서 5%로 계단 감소	최대 수위	0.037	0.026
	최소 수위	-0.043	-0.046
	안정화 시간		
15%에서 25%로 계단 증가		244	202
25%에서 15%로 계단 감소		445	330
5%에서 6%로 계단 증가		750	328
6%에서 5%로 계단 감소		845	255

3. 결 론

본 논문에서는 원전 증기발생기 수위 제어를 위해 슬라이딩 모드 기법을 응용한 변형된 슬라이딩 모드 제어를 제안하였다. 전 출력 구간에서 향상된 성능을 나타내기 위하여 계인 스케줄링 기법을 이용하였다. 수위 정보를 이용하여 제어를 설계하였으며, 제어 입력에 필요한 상태 변수들의 값은 관측자를 이용하여 추정하였다. 일반적인 앞먹임 구조를 가진 PI 제어를 또한 설계하여 네 가지 기준 사건하에서 성능을 비교함으로써 제안된 제어기의 성능을 검증하였다. 모의 실험결과 본

논문에서 제안된 변형된 슬라이딩 모드 제어기가 최대 수위, 최소 수위, 안정화 시간면에서 향상된 성능을 나타내었다.

(참 고 문 헌)

- [1] M. V. Kothare, B. Mettler, M. Morari, P. Bendotti, and C.-M. Falinower, Level control in the steam generator of a nuclear power plant, *IEEE Trans. On Control Systems Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 55-69, 2000
- [2] S. Skogestad and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 1996
- [3] H. L. Akin and V. Altin, Rule-based fuzzy logic controller for a PWR-type nuclear power plant, *IEEE Trans. On Nuclear Science*, vol. 38, no. 2, pp. 883-890, 1991
- [4] M. G. Na, Design of a genetic fuzzy controller for the nuclear steam generator water level control, *IEEE Trans. On Nuclear Science*, vol. 45, no. 4, pp. 2261-2271, 1998
- [5] B. K. Cho and H. C. No, Design of stability-guaranteed fuzzy logic controller for nuclear steam generators, *IEEE Trans. On Nuclear Science*, vol. 43, no. 2, pp. 716-730, 1996
- [6] S. K. Menon and A. G. Parlos, Gain-scheduled nonlinear control of U-tube steam generator water level, *Nuclear Science Engineering*, vol. 111, pp. 294-308, 1992
- [7] M. G. Na and H. C. No, Design of an adaptive observer-based controller for the water level of steam generators, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 135, pp. 379-394, 1992
- [8] Y. Lee, *Study on the Water Level Control of Nuclear Power Plant Steam Generator at Low Power*, Ph. D. dissertation, Department of Nuclear Engineering, Seoul National University, 1991