

MPC를 이용한 원전 증기발생기의 수위제어에 관한 기초연구

손 덕현* 이 창구 한 진욱 한 후석
전북대학교 제어계측공학과 전북대학교 전자·정보공학부

A Study on the Level Control in the Steam Generator of a Nuclear Power Plant by using Model Predictive Controller

Duk-Hyun Son* Chang-Goo Lee Jin-Wook Han Hu-Suk Han
Chon-Buk Univ. Control&Instrumentation Eng. Chon-Buk Univ. Electronic&Information Eng.

Abstract - Level control in the steam generator of a nuclear power plant is important process. But, the low power operation of nuclear power plant causes nonlinear characteristics and non minimum phase characteristics (swell and shrink), change of delay. So, we can't lead good results with conventional PID controller. Particularly, the design of controller with constraints is necessary. This paper introduces MPC(Model Predictive Control) with constraints and designs a good performance MPC controller in spite of the input constraints and nonlinear characteristics, non-minimum phase characteristics

- τ_1, τ_2 : 시정수
- T : 기계적 진동 시간
- G_1 : 물의 질량에 의한 영향
- G_2 : 급수유량비율과 증기유량 비율에 의한 swell과 shrink 현상의 크기
- G_3 : 기계적 진동 크기

첫 번째 항, $\frac{G_1}{s}[u(s)-v(s)]$ 은 증기발생기안의 실제적인 수위를 나타낸다.

두 번째 항, $\frac{G_2}{1+\tau_2s}[u(s)-v(s)]$ 은 swell 과 shrink 현상에 의한 증기발생기 수위의 영향을 나타낸다. swell 현상은 증기유량이 커지면 증기발생기안의 증기압력이 낮아져 순간적인 물의 팽창현상 때문에 증기발생기안의 수위가 높아지는 현상을 말한다. 또한 급수유량이 증가하면 상대적으로 증기발생기안의 물보다 낮은 온도의 물이 많이 유입되어 증기발생기안의 물은 순간적인 응축현상이 나타나는데 이 때문에 수위가 낮아지는 현상이 발생한다. 이를 shrink 현상이라 한다.

세 번째 항, $\frac{G_3}{\tau_1^{-2}+4\pi^2T^{-2}+2\tau_1^{-1}s+s^2}u(s)$ 은 기계적 진동에 의한 수위의 영향을 나타내는데, 터빈을 거쳐 재사용 되기 위해 들어오는 물은, 양은 많지만 유속이 느려 급수관을 통해 들어오는 물의 양이 갑자기 줄어들면 수위는 떨어지며 요동치게 된다. 표 1은 원자로의 power 변화에 따른 식(1)의 계수를 나타낸 것이다.

표. 1 power level 에 따른 증기발생기 모델 계수

power level (%)	G_1	G_2	G_3	τ_1	τ_2	T
5	0.058	9.63	0.181	41.9	48.4	119.6
15	0.058	4.46	0.226	26.3	21.5	60.5
30	0.058	1.83	0.310	43.4	4.5	17.7
50	0.058	1.05	0.215	34.8	3.6	14.2
100	0.058	0.47	0.105	28.6	3.4	11.7

1. 서 론

98년도 통계로 보면 우리 나라의 전력 생산에서 원자력 발전이 차지하는 비율이 35%를 넘어서고 있다. 이러한 추세로 볼 때 갈수록 우리 나라 전력생산에서 원자력발전이 차지하는 비율은 증가 할 것으로 보이며 이에 관한 연구가 더욱 많아 질 것으로 보인다. 원자력 발전소를 건립하는데는 천문학적인 비용이 들어가므로 무엇보다도 안정적인 운전이 중요하다. 그러나 원자력발전의 핵심 설비인 증기발생기는 저출력 운전시 발생하는 비최소위상(swell 과 shrink현상) 현상[1][4]과 급수유량의 물리적인 제한조건 때문에 안정적이고 효과적인 운전이 어려우며 실제 현장에서는 숙련된 기술자에 의해 수동으로 운전되는 실정이다. 본 논문에서는 저 출력에서 입력의 제한조건을 만족하면서 안정적인 증기발생기의 수위제어를 위해 제한조건이 있는 MPC 이론을 이용하여 증기발생기의 수위제어를 설계하였다. 또한 현장에 사용되는 PI 제어기[4]와 그 성능을 비교함으로써 모델예측제어의 우수성을 보여 주었다.

2. 본 론

2.1 증기발생기의 동 특성

증기발생기의 동 특성은 입력으로 급수유량비율 $u(s)$ 와 출력으로는 증기발생기의 수위 $y(s)$, 그리고 측정 가능한 외란(증기유량비율) $v(s)$ 로 나타낼 수 있다. 급수유량과 증기유량의 비율의 단위계단변화 입력에 의한 증기발생기의 수위응답에 의해 Irving 은 식(1)과 같이 원자력 발전소 증기발생기 모델을 4차의 라플라스 전달 함수로 나타내었다.

$$y(s) = \frac{G_1}{s}[u(s)-v(s)] - \frac{G_2}{1+\tau_2s}[u(s)-v(s)] + \frac{G_3}{\tau_1^{-2}+4\pi^2T^{-2}+2\tau_1^{-1}s+s^2}u(s) \quad (1)$$

s : 라플라스 변수

2.2 제한 조건이 있는 모델예측제어기

다음과 같은 이산시간 상태공간 모델을 고려하자.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Bd(k) + n_1 \quad (2)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + n_2$$

$d(k)$: 측정가능한 외란

n_1, n_2 : 측정 불가능한 외란

모델예측제어기는 개 루프 형태의 제어이론이며 일반적인 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에서 State estimate 는 이산시간 k 에서 i 번째의 예측된 $x(k+i|k)$,

$y(k+i|k)$ 를 구하는 것과 같으며 다음과 같이 나타낸다.
 $x(k+i+1|k) = Ax(k+i|k) + Bu(k+i|k)$
 $y(k+i|k) = Cx(k+i|k)$
 $i=1, 2, \dots, p$

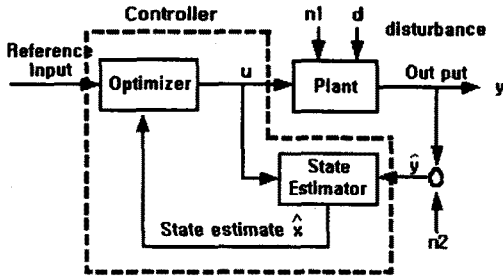


그림. 1 기본적인 MPC 구조도

Optimizer 는 Plant로 입력되는 제어입력을 구하는 것인데, 이는 외란과 잡음이 존재하는 시스템에 대해 식(3)과 같은 성능지표(Cost Function)가 최소가 되는 제어입력을 구하는 것이다.

$$\min_{u(k+i|k), i=0, 1, \dots, m-1} J_p(k) \quad (3)$$

$$J_p(k) = \sum_{i=1}^m (y_d - y(k+i|k))^T \Gamma_y (r - y(k+i|k)) + \sum_{i=0}^{m-1} u(k+i|k)^T \Gamma_u u(k+i|k) + \sum_{i=0}^{m-1} \Delta u(k+i|k)^T \Gamma_{\Delta u} \Delta u(k+i|k)$$

y_d 는 기준 값이며 $\Gamma_y, \Gamma_u, \Gamma_{\Delta u} \geq 0$ 가중치를 나타낸다. 식(3)과 같은 성능지표를 최소로 하는 값을 구하는데 있어서 다음과 같은 제한 조건을 만족하는 제어입력을 구하여야 한다.

제어 입력과 제어입력증분에 대한 제한조건:

$$u_{\min} \leq u(k+i|k) \leq u_{\max}$$

$$|\Delta u(k+i|k)| \leq \Delta u_{\max}, \quad i=0, 1, 2, \dots, m-1$$

출력과 상태 변수에 대한 제한조건:

$$y_{\min} \leq y(k+i|k) \leq y_{\max}$$

$$x_{\min} \leq x(k+i|k) \leq x_{\max}$$

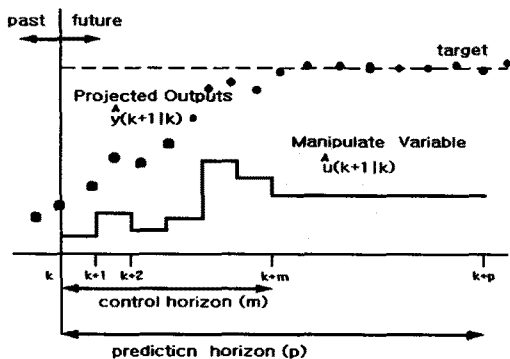


그림. 2 이산시간 k 에서의 최적화

그림 2는 이산시간 k 에서 제어입력의 최적화 과정을 나타낸 것이다. 여기에서 $p > m$ 인 구간에서는 제어입력

중분 $\Delta u(k)$ 이 변하지 않는다고 가정한다. 즉 $k+m-1$ 시간 후 에는 $u(k+i|k) = u(k+m-1|k), i \geq m$ 이다. 모델예측제어기의 성능은 미래 출력들의 범위로 정의되는 예측구간(prediction horizon)과 원하는 제어 목적을 성취하기 위한 미래 제어신호구간(control horizon)에 달려있으므로 예측구간과 제어구간 그리고 가중치 등의 변수를 잘 동조시키는 것이 중요하다. 그리고 여기에서 구해진 제어입력은 오직 첫 번째 제어입력 $u(k|k)$ 만 사용이 되고 다음 샘플링시간 $k+1$ 에서는 새로운 $\hat{y}(k+1), \hat{x}(k+1)$ 가 업데이트 된다. 때문에 모델예측제어를 RHC (Receding Horizon Control)나 MHC(Moving Horizon Control)이라고도 한다.

2.3 simulation

증기발생기의 수위제어를 하는데 있어 저 출력(20% 미만)에서 발생하는 비 최소수위상 특성 때문에 제어상의 어려움이 있다. 그러므로 출력이 5%와 15%의 두 가지 상황을 가정하여 simulation을 수행하였다. 그리고 모델예측제어기를 이용한 증기발생기의 수위제어의 실험 결과의 우수성을 보이기 위해 일반적으로 증기발생기 수위 제어에 많이 이용되는 PI 제어기와 비교하여 그 우수성을 증명하였다. 저 출력에서 PI제어기의 일반적인 구조는 그림 (3)과 같다.

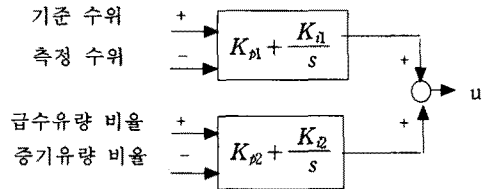


그림. 3 증기발생기의 PI 제어기 구조도

제어입력은, 측정 오차가 크기 때문에 유량측정 신호는 사용하지 않고 기준 값 과 출력 값의 오차를 이용하여 구한다. 때문에 제어입력은 식(4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(k) = u(k-1) + K_p [yD(k) - yD(k-1)] + \frac{h}{2K_i} [yD(k) + yD(k-1)] \quad (4)$$

$$yD(k) = y_d - y(k), \quad K_p = 0.05, \quad K_i = 18000$$

증기발생기의 모델예측 제어입력은 식(3)의 비용함수(Cost function)가 최소가 되는 제어입력을 찾는 것인데, 본 논문에서는 급수유량 비율(feed water flow rate)이 제어입력이 된다. 급수유량은 물리적으로 0보다 작을 수 없으므로 다음과 같은 제한조건을 가진다.

$$0(\%) \leq u(t) \leq 100(\%)$$

simulation 결과는 그림 (4)에서 그림 (9)와 같다. 기준 수위 level의 변화에도 적절한 수위제어가 됨을 보이기 위해 수위 level을 2000구간까지는 기준 수위 level을 40%, 2001구간부터 4000구간까지는 70%, 4001구간부터 6000구간까지는 40%의 기준 수위 level을 설정하였다. 그림(4)와 (5)는 제한조건이 없는 모델예측제어기와 제한조건이 없는 모델예측제어기를 증기발생기에 적용했을 시의 결과이다. 제한조건이 없을 시에는 기준 수위에 빨리 수렴은 하지만 제어입력은 물리적 한계를 넘어서기 때문에 실제 시스템에 적용할 수 없다. 그림(6)에서 그림(9)까지는 PI제어기와 모델예측제어기를 증기발생기에 적용시의 비교 결과인데 그림(6)과

(7)는 power level이 5%일 때 결과이다. 그림에서 모델예측제어기가 입력 제한조건을 만족하면서 오버슈트(overshoot)없이 기준 수위 값에 적절히 추종함을 알 수 있다. 그림(7)은 급수유량 비율과 증기유량비율의 결과 값이다. 모두 기준 값에 적절히 추종함을 알 수 있다. 그림(8) 과 (9)는 power level이 15%일 때의 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 모델예측제어기가 입력 제한조건을 만족하면서 PI제어기보다 훨씬 좋은 성능을 가짐을 알 수 있다. 그림 (9)는 급수유량비율과 증기유량 비율의 결과 값을 나타낸 것이다

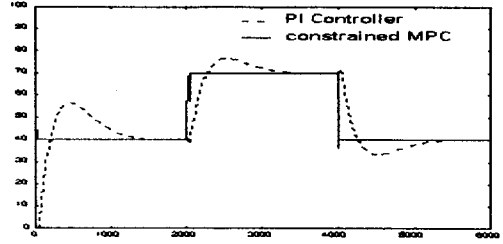


그림. 8 power level 이 15%일 때의 제한조건이 있는 모델예측제어기와 PI 제어기의 수위제어

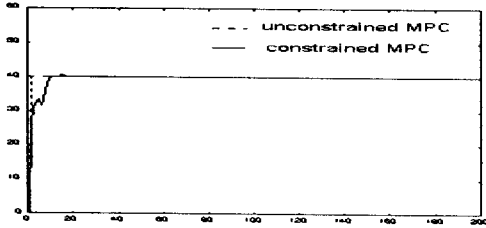


그림. 4 제한조건이 없을때와 제한조건이 있을 때 예측제어기 수위제어

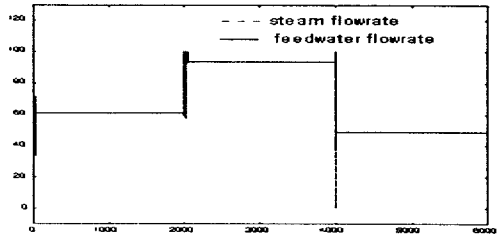


그림. 9 power level 이 15%일 때의 급수유량 비율과 증기유량 비율

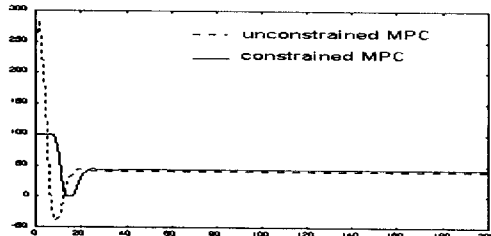


그림. 5 제한조건이 없을 때와 제한조건이 있을 때 모델 예측제어기 제어입력

3. 결 론

본 논문에서는 제한조건이 있는 모델예측제어기를 이용하여 원자력 발전소의 증기발전기의 수위 제어에 적용하는 문제를 다루었다. 결과에서 알 수 있듯이 제어입력은 제한 조건을 만족하면서 적절한 수위제어가 됨을 알았다. 또한 PI 제어기와 그 성능을 비교함으로써 제한조건이 있는 모델예측제어기의 성능이 우수함을 증명하였다. 앞으로는 제약조건을 가지는 모델예측제어의 안정성과 증기발전기에 어떠한 이상이 있을 시 이에 대하여도 건설한 제어를 하는 허용제어에 관한 연구가 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한진욱, 이창규 "증기발전기 수위제어를 위한 실시간 자기동조 퍼지-PID제어기 개발" 제 13차 한국자동제어 학술회 논문집 pp.1265-1265, 1998
- [2] 손원기, 권오규 "제약조건을 갖는 다변수 모델예측제어기의 보일러 시스템 적용" 제어, 자동화, 시스템공학회 논문지 제3권 6호 pp.582-587, 1997
- [3] Mayuresh V.Kothare, "Level Control in the Steam generator of a Nuclear Power Plant" IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol.8 pp.55-69 Jan.2000
- [4] Man Gyun Na "A Water Level Controller for Steam Generators Estimating the flow errors and the water level quantity due to the mass capacity" Nuclear technology, Vol.122 pp.83-92, Apr.1998

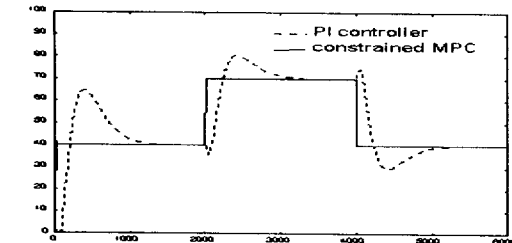


그림. 6 power level이 5%일 때의 제한조건이 있는 모델 예측제어기와 PI 제어기의 수위제어

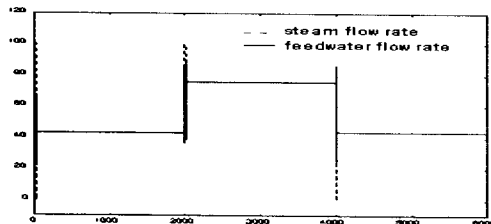


그림. 7 power level 이 5%일 때 의 급수유량 비율과 증기유량 비율

본 연구는 1999년도 기초전력공학공동연구소 단기과제 지원에 의해 수행되었음