

MPC를 이용한 원전 증기발생기의 수위제어에 관한 기초연구

나 만 균
조선대학교 원자력공학과

A Preliminary Study on the Nuclear Steam Generator Water Level Control Using MPC

Man Gyun Na
Nuclear Eng. Dept., Chosun University

Abstract

MPC 제어가 고정된 출력준위에서 선형 증기발생기 모델을 위해 설계되었다. 고정된 출력준위에서 설계된 제어기는 단지 입력가중치만을 변경하므로써 어떤 다른 출력준위에서 좋은 성능을 보여주었다. 또한 증기발생기는 비선형 특성을 갖고 있기 때문에 제안된 제어 알고리즘이 실질적인 성능 및 안전성을 검증하기 위하여 증기발생기의 비선형 모델에 적용되었으며, 좋은 성능을 보여주었다.

1. 서 론

가동율에 상당한 영향을 미치는 증기발생기 수위제어를 위한 현대 고등제어이론의 적용 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었으며 지금도 활발히 진행되고 있다. 1970년대까지는 고전적 비례-적분 제어기에 집중되었다. 1980년대 이래로 국내외에서 적응제어[1,2]와 최적제어[3,4] 그리고 뒤이어 퍼지 및 인공신경망[5-7] 등의 고등제어 방식을 적용한 연구가 시작되었다. 그러나 이들 방법들은 거의 대부분 Irving[1]이 개발한 선형 모델에 기초한 증기발생기 모델에 바탕을 두어 개발되었다. 따라서 실질적으로 비선형 특성이 강한 증기발생기에 효과적으로 적용될지는 의문의 여지가 있다.

MPC (Model Predictive Control)는 예측제어 방법 중의 하나이며, 지난 몇 년 사이 제어 학문 분야 및 산업에서 상당히 발전하였고, 산업공정계통의 제어를 위해 강력한 도구로써 주목을 받았다[8-12]. MPC의 장점은 일정 제어범위 (Finite Control Horizon)가 이용되므로 인하여 산업현장에서 흔히 존재하는 제한조건이나 비선형 공정 등에 적용될 수 있다. 이런 MPC의 특성으로 인하여 원자력발전소 증기발생기의 수위제어에 적절히 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

이전에 개발된 증기발생기 수위제어기는 주로 선형 모델에 적용을 통하여 성능이 검증되곤 하였다. 개발된 MPC를 Irving[1]이 개발한 선형 증기발생기 모델에 적용을 통하여 성능을 분석함은 물론, 비선형 특성을 살피기 위하여 비선형

모델[13]에 적용을 통하여 검증을 수행하는 것이 필요하다.

2. 본 론

2.1 MPC 제어기 설계

MPC제어 방법은 현재 시간에 미래의 일정 구간에 대한 최적화 문제를 풀어 현재의 제어입력으로써 단지 첫번째 제어입력만을 구현하는 것이다. 그 다음 시간 스텝에서는 똑 같은 절차가 반복적으로 수행된다. 그림 1은 이러한 기본 개념을 보여주며[9], 현재와 미래의 제어입력의 어떤 가정된 집합 하에서 프로세스 출력의 미래의 거동이 구간 N 상에서 예측되어 M ($M \leq N$)개의 현재와 미래의 제어 입력이 이차 목표 함수를 최소화하도록 계산된다. 비록 M 개의 제어 입력이 계산된다 할지라도 단지 첫번째 제어입력만 구현된다.

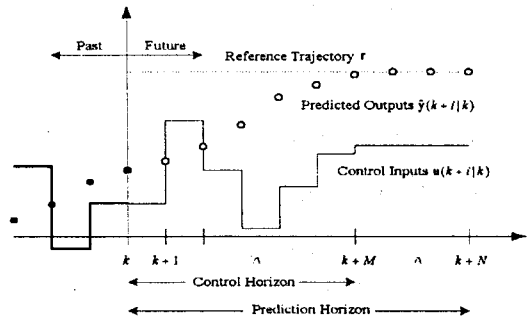


그림 1 MPC 제어 방법의 기본 개념.

다음의 시불변 이산계통을 고려하자:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}(k) + \mathbf{E}\mathbf{v}(k),$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k),$$

(1)

여기서 $\mathbf{x}(k) \in R^n$, $\Delta\mathbf{u} \in R^m$, $\mathbf{v}(k) \in R^l$, 그리고

$y(k) \in R^p$ 는 각각 상태벡터, 제어입력, 측정가능한 외란, 프로세스 출력을 나타낸다.

관련 성능지수는 다음의 이차 함수로 주어진다:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^M \left\{ y(k+j) - r(k+j) \right\}^T Q_r \left\{ y(k+j) - r(k+j) \right\} + \Delta u(k+j)^T R \Delta u(k+j) \right\} + \frac{1}{2} \sum_{j=M+1}^N \left\{ y(k+j) - r(k+j) \right\}^T Q_p \left\{ y(k+j) - r(k+j) \right\}. \quad (2)$$

일반적인 최적 추적제어에서는 문제 (2)를 풀어 얻어진, $u(k+j)$, $j \in [0, N]$ 가 시간 $[k, k+N]$ 구간동안 시스템을 제어 하는데 사용되고, 시간 $k+N$ 에서는 위의 과정이 구간 $[k+N, k+N+N]$ 에 대하여 반복된다. 그러나 MPC제어의 개념은 $\Delta u(M+1) = \Delta u(N) = 0$ 을 가정하여 시간 k 에서 비용지수 (2)를 최소화하는 최적화 문제를 풀어 얻어진 제어입력 $\Delta u(k)$, $\Delta u(k+1)$, $\Delta u(k+2)$, ..., $\Delta u(M)$ 을 구하며, 단지 첫 번째 제어입력만을 구현하고, 다음 스텝에서 똑 같은 일을 반복하게 된다.

제약조건이 존재하는 경우에 적용되는 강력한 도구인 Lagrange-multiplier(λ) 기법을 이용하여 식 (2)의 최적화 문제를 풀어 제어입력을 구하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다:

$$\Delta u(k+j) = -K(j)x(k+j) - K_v(j)v(k+j) + K_g(j)g(k+j+1), \quad (3)$$

$$j = 0, 1, \dots, M$$

여기서

$$K(j) = (R + B^T F(j+1)B)^{-1} B^T F(j+1)A,$$

$$K_v(j) = (R + B^T F(j+1)B)^{-1} B^T F(j)E,$$

$$K_g(j) = (R + B^T F(j+1)B)^{-1} B^T,$$

$$F(j) = A^T F(j+1)A - A^T F(j+1)B(R + B^T F(j+1)B)^{-1} B^T F(j+1)A + C^T Q_r C,$$

$$F(M) = \sum_{i=0}^{N-M-1} (A^T)^i C^T Q_p C^T A^i,$$

$$g(k+j) = \begin{cases} [A - BK(j)]^T g(k+j+1) - [A - BK(j)]^T F(j)Ev(k+j) + C^T Q_r r(k+j) & \text{for } j \leq M \\ A^T g(k+j+1) - A^T F(j)Ev(k+j+1) + C^T Q_r r(k+j) & \text{for } M+1 \leq j \leq N-1 \end{cases}$$

$$g(k+N) = C^T Q_p r(k+N).$$

$K(j)$ 와 $K_v(j)$ 는 기준입력에 의존하지 않기 때문에 위와 같이 산술적 차분 방정식을 통하여 Off-Line으로 쉽게 구해진다. 즉 제어할 시스템과 성능지수에 포함된 설계변수들 (R , Q , Q_r) 그리고 예측구간

N 이 결정되면 이들 이득 값은 완전히 결정된다. 그러나 식 (3)에서 마지막 항과 관련된 이득 $K_g(j)$ 는 현재 시간 k 에서 $[k, k+N]$ 사이에서 알 수 있다고 가정한 미래의 기준입력 및 측정 가능한 외란, 그리고 $K(j)$ 를 이용하여 매시간마다 On-Line으로 계산해야 한다. 그리고 식 (3)에서 단지 첫번째 제어 입력이 구현되기 때문에, MPC 제어기의 제어 입력은 다음과 같다:

$$\Delta u(k) = -K(0)x(k) - K_v(0)v(k) + K_g(0)g(k+1) \quad (4)$$

제안된 제어기의 페루프의 안정성을 보장하기 위하여 다음과 같은 조건의 행렬 부등식이 최종 가중치 행렬 Q_r 에 주어져야 한다[15]:

$$C^T Q_r C \geq A^T C^T Q_r C (I + BR^{-1}B^T C^T Q_r C)^{-1} A + C^T Q_r C. \quad (5)$$

2.2 시뮬레이션 결과

제어기를 설계하기 위하여 이용된 모델은 30 퍼센트 출력의 선형 모델이 이용되었으며, 샘플링 주기는 5초가 적용되었다. 그림 2와 3은 각 출력준위에 따른 선형 모델에 적용된 경우에 본 제어기의 우수한 성능을 보여준다. 시뮬레이션에서 기준 수위가 100초에서 0에서 20cm로 변화하였고, 2000초에서 증기유량의 변화량은 정격 증기유량의 5%에 해당한다. 출력에 대한 가중치 행렬은 1로 선정되었으며, 입력가중치 행렬은 좋은 성능을 달성하기 위하여 출력준위에 따라 다르게 선정되었다 (그림 4 참조).

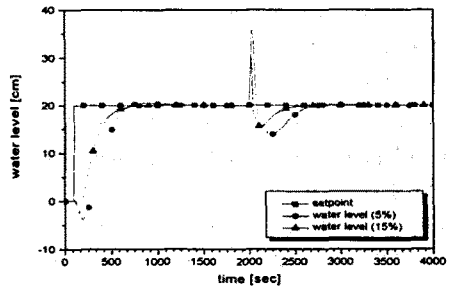


그림 2. 저출력에서 MPC 제어기의 성능.

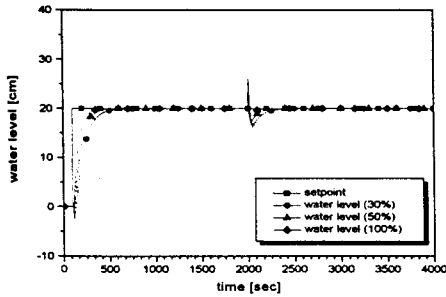


그림 3. 고출력에서 MPC 제어기의 성능.

비선형 모델은 제어기를 설계하는데 부적절하기 때문에 앞에서 나온 선형 모델(100% 출력에서 선형 모델)을 이용하여 제어기가 설계되었다. 그림 5는 각각 10%와 100% 출력준위에서 비선형 모델에 대한 본 제어기의 우수한 성능을 보여준다.

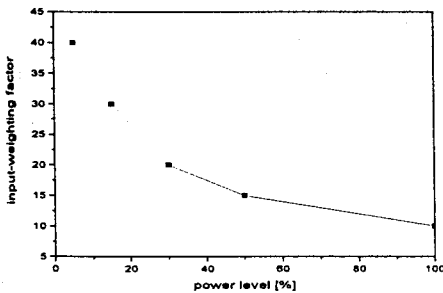


그림 4. 출력준위에 따른 최적 입력가중치.

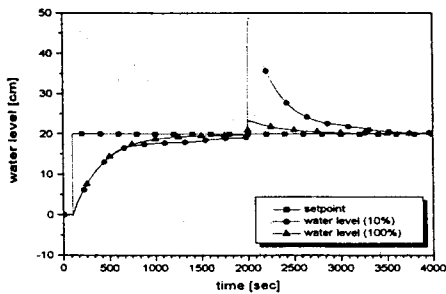


그림 5. MPC 제어기의 성능 (비선형 모델).

3. 결론

본 연구에서 MPC 제어방법이 원자력발전소 증기발생기 수위를 제어하기 위하여 개발되었다. MPC 제어기가 고정된 출력준위 (30% 출력)에서 선형 모델을 이용하여 설계되었다.

제안된 제어기는 단지 입력가중치만을 변경시키므로써, 여러 출력준위에 대하여 좋은 성능을 보여주었다. 출력준위가 증가함에 따라 입력가중치는 지수 함수적으로 감소하며, 출력준위의 변화에 대비하여 입력가중치는 쉽게 선택될 수 있었다.

또한 증기발생기는 비선형 특성을 가지고 있기 때문에 비선형 모델에서 성능이 검증되어야 한다. 기준입력 (수위)과 측정 가능한 외란 (증기유량)이 변하는 상황에서 MPC 제어기는 원하는 수위 및 증기유량 변화에 대하여 잘 추적하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 참고문헌

1. E. Irving, C. Miossec, and J. Tassart, "Toward Efficient Full Automatic Operation of the PWR Steam Generator with Water Level Adaptive Control," BNES, London, *Boiler Dynamic and Control in Nuclear Power Stations*, pp. 309-329 (1980).
2. M. G. Na and H. C. No, "Design of an Adaptive Observer-Based Controller for the Water Level of Steam Generators," *Nucl. Eng. and Des.*, 135, 379-394 (1992).
3. J. J. Feely, "Optimal Digital Estimation and Control of a Natural Circulation Steam Generator," EG&G Idaho Falls, ID (1981).
4. Y. J. Lee, 1994. "Optimal Design of the Nuclear S/G Digital Water Level Control System," *J. of KNS*, 26, 32-40 (1994).
5. C. C. Kuan, C. Lin, and C. C. Hsu, "Fuzzy Logic Control of Steam Generator Water Level in Pressurized Water Reactors," *Nuclear Technology*, 100, 125-134 (1992).
6. B. H. Cho and H. C. No, "Design of Stability-Guaranteed Fuzzy Logic Controller for Nuclear Steam Generators," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 43, 716-730 (1996).
7. M. G. Na, "Design of a Genetic-Fuzzy Controller for the Nuclear Steam Generator Water Level Control," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 45, 2261-2271 (1998).
8. W. H. Kwon and A. E. Pearson, "A Modified Quadratic Cost Problem and Feedback Stabilization of a Linear System," *IEEE Trans. Automatic Control*, 22, 838-842 (1977).