

APR1400용 모델 예측 제어 로직에서의 주요 제어변수 변동에 따른 성능 평가

양승옥*¹, 최유선*¹, 나만균*²
 한국전력공사 전력연구원*¹, 조선대학교*²

Performance Evaluation of the Model Predictive Control Logic Key Parameters for APR1400

Seung Ok Yang*¹, Yu Sun Choi*¹, Man Gyun Na*²
 Korea Electric Power Research Institute*¹, Chosun University*²

Abstract

본 논문에서는 차세대원자로인 APR1400(Advanced Power Reactor 1400)의 출력제어방법으로 모델예측제어 알고리즘을 적용하고, 일일부하추종 운전을 하였을 때 최적의 제어기 구현을 위해 제어 로직의 주요 변수인 예측 구간, 제어구간, 모델 차수의 변화에 따른 제어 성능을 평가하였다. 성능 평가는 원자로 출력제어 성능 검증시 사용하는 방법으로 제어대상인 차세대 원자로(APR1400)를 3차원 노심해석 전산코드인 MASTER(Multipurpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactor)로 시뮬레이션하여 제어 성능을 평가하였다.

1. 서 론

동적모델 기반 예측제어방법론(MPC; Model Predictive Control, 이하 "MPC"라 칭함)은, 1970년대경 공정제어분야에서 MAC(Model Algorithmic Control), DMC(Dynamic Matrix Control) 등의 이름으로 시작되어 발전되어 온 예측제어 방법 중의 하나이며, 지난 몇 년 사이 제어 학문 분야 및 산업에서 상당히 발전하였고, 산업공정계통의 제어를 위한 강력한 도구로써 주목을 받고 있다. 이러한 MPC 방법의 가장 큰 장점은, 시간영역에서 공정 제어 문제를 다룰 때 가장 일반적인 방법인 최적제어, Stochastic 제어, 시간지연을 갖는 공정제어 및 다변수 제어 등을 통합하여 적용할 수 있다는 것이다. MPC의 또 다른 장점은 유한한 제어 구간(Finite Control Horizon)을 사용하므로 인하여 산업현장에서 흔히 존재하는 제한조건이나 비선형 공정 등에 적용할 수 있다는 것이다.

원자력발전소 원자로 출력은 비선형적 특성을 갖고 시간에 따라 가변적이며 특히 부하에 따른 시스템의 동적 특성이 상당히 다르다. 즉, 운전 출력량, 관련 계통의 운전 시간 경과에 따른 열화 정도, 장전된 핵연료의 연소도에 따른 핵 반응도의 변화 등에 따라서 원자로 출력 계통의 동적 특성은 변화된다. 또한, 원자로 출력을 제어하는 원자로 출력 제어 계통에는 제어봉 구동 속도와 구동 순서, 삽입한계 등의 제한조건이 존재한다.

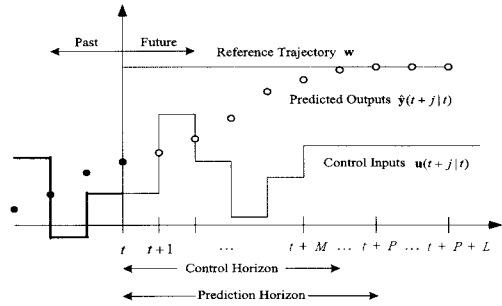
이러한 원자로 출력계통의 비선형성 및 제한조건과, 모델기반 예측제어(MPC) 방법의 장점 등을 감안할 때, 원자력발전소 자동부하추종운전시 원자로 출력준위 및 출력분포 제어 방법으로써, 동적모델기반 예측제어(MPC) 방법을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단되어, 차세대원자로인 APR1400(Advanced Power Reactor 1400)의 출력제어방법으로 모델예측제어 알고리즘을 적용하고, 일일부하추종 운전 성능을 평가하였다. 본 논문에서는 MPC 제어기 적용시 최적의 제어기 구현을 위해 제어 로직의 주요 변수인 예측 구간, 제어구간, 모델 차수의 변화에 따른 제어 성능을 평가하였다. 성능 평가는 원자로 출력제어 성능 검증시 사용하는 방법으로 제어대상인 차세대 원자로(APR1400)를 3차원 노심해석 전산코드인 MASTER(Multipurpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactor)로 시뮬레이션하여 제어 성능을 평가하였다.

2. 본 론

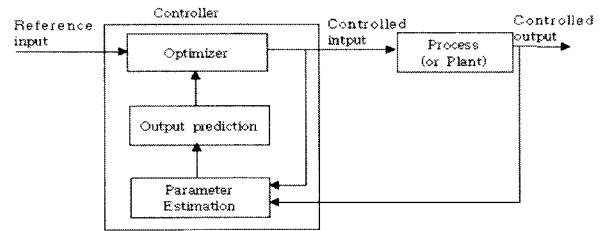
2.1 모델예측제어(MPC) 방법론 개요

MPC 제어방법은 동특성 계통의 제어를 위해 사용되는 기술로써, 현재 시점에서 미래의 일정한 구간에 대한 최적화 문제를 풀어, 현시점 이후의 일정 구간에 대한 제어입력을 계산하고, 계산된 제어 입력중 현재 스텝의 제어입력으로써 단지 첫 번째 제어입력만을 구현하는 것이다. 그 다음 시간 스텝에서 똑같은 절차를 반복적으로 수행한다. <그림 1>은 MPC의 기본 개념을 나타내고 있다. 즉, 현재와 미래의 제어입력의 어떤 가정된 시퀀스 하에서 프로세스 출력의 미래 거동이 구간 P상에서 예측되어 M(M≤P)개의 현재와 미래의 제어입력이 이차 목표함수를 최소화하도록 계산된다. 비록 M개의 제어입력이 계산된다할지라도 단지 첫 번째 제어입력만 구현한다. 다음 시간 스텝에서는 측정된 새로운 출력 값이 얻어지며 제어구간이 한 스텝 앞으로 이동하여 똑같은 계산을 계속 반복된다.

동적 모델기반 모델 예측 제어 방법을 이용한 MPC 제어기의 기본 구조는 <그림 2>와 같다.



<그림 1> MPC(Model Predictive Control) 기본 개념



<그림 2> MPC 제어기 기본 구조

2.2 원자로 출력제어를 위한 모델예측제어(MPC) 방법

본 절에서는 MPC의 기본 개념을, 원전 자동부하추종을 위한 원자로 제어에 적용하기 위한 기본 이론을 수식으로 정리하였다.

원전 부하추종을 위한 원자로 시스템은 원자로 출력(Power Level)과 축방향 출력분포(ASI; Axial Shape Index)를 동시에 제어하는 MIMO(Multi Input Multi Output) 시스템으로 고려하여, MPC 방법을 위한 입력과 예측 출력과의 관계를 CARIMA(Auto-regressive and integrated moving average) Model의 Matrix Polynomials 식으로 나타내면 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\hat{y}(t+j|t) = F_j(q^{-1})y(t) + G_j(q^{-1})\Delta u(t+j-1) \quad (1)$$

식(1)에서, $\hat{y}(t+j|t)$ 는 t시점 기준에서 j-스텝후의 최적 예측 출력값(원자로 출력과 축방향출력분포로 구성되는 출력벡터)이고, Δu 는 두 시간 스텝 사이의 제어입력(두종류 제어봉 그룹의 위치로 구성되는 제어입력 벡터) 변화, F_j, G_j 는 프로세스 예측 모델의 특성 계수이다.

MPC 제어개념은 현재 시점에서 미래의 일정한 구간에 대한 최적화 문제를 풀어 현시점이후의 일정 구간에 대한 제어입력을 계산하는 것이고, 또한 실제 원자로 출력 및 출력분포를 제어하기 위한 제어봉 구동시스템은 그 삽입 한계와 구동속도에 대한 제한 조건을 가지고 있다. 따라서 최적화 문제를 풀기 위한 성능지수는 다음과 같이 2차함수로 주어진다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^P (\hat{y}(t+j|t) - w(t+j))^T Q (\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^P \Delta u(t+j-1)^T R \Delta u(t+j-1) \quad (2)$$

여기서, $\begin{cases} \hat{y}(t+P+i) = w(t+P+i), & i = 1, \dots, L \\ \Delta u(t+j-1) = 0, & j > M (M < P) \end{cases}$

w는 목표 출력 벡터, Q와 R은 각각 $(\hat{y} - w)$ 와 Δu 의 가중치 벡터, M은 제어구간을, P는 예측구간을 의미한다. 첫 번째 제한조건 $\hat{y}(t+P+i) = w(t+P+i)$, $i = 1, \dots, L$ 은 예측구간 이후에는 제어된 값이 목표값과 동

일한 것으로 본다는 의미이며, 두 번째 제한조건인 $\Delta u(t+j-1) = 0, j > M$ 은 제어구간(control horizon)을 초과한 구간에 대해서는 더 이상 제어입력신호의 변화가 없다는 것을 의미한다.

본 논문에서 검토된 MPC 방법에서는 상기의 성능지수의 최적화 문제를 풀기 위해 제한 조건이 존재하는 경우에 가장 유용한 도구인 Hamilton 함수와 Lagrange-multiplier 기법을 적용하여 최종 제어 입력값을 구하였다.

2.3 원자로 출력 제어용 MPC 제어기 최적화 및 성능 검증

MPC 제어기의 주요 튜닝 변수로는 출력 예측 구간 P, 제어구간 M, 입력 가중치 매트릭스 R, 출력 가중치 매트릭스 Q 등 4가지가 있다. 본 논문에서는 우선, 제어기 튜닝 변수중 출력 예측 구간 P와 제어 입력 예측구간 M, 그리고 플랜트 모델의 차수의 변화에 따른 제어 성능을 평가하였다.

본 논문에서 비교, 검토한 출력 예측 구간 P, 제어구간 M, 모델 차수의 변화와 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- (1) 공통 조건
 - 샘플링 간격 2초
 - 부하중 폐턴 : 출력 변화 100-50-100%, 2-6(50%)-2-14(100%)시간
- (2) 변화 조건
 - 출력 예측 구간 P : 10, 20(단, 모델차수=5)
 - 제어 입력 예측구간 M : 10, 15, 20(단, 모델차수=5)
 - 모델 차수 : 3, 5, 8(단, P=M=10)

3차원 노심 해석코드 프로그램인 MASTER 코드를 이용하여 제어기 주요 변수에 따른 제어 출력 성능을 시뮬레이션한 결과는 <그림 3>와 <그림 4>와 같다.

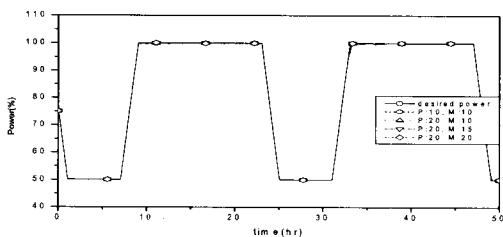
3. 결 론

본 논문에서는 차세대원자로인 APRI400(Advanced Power Reactor 1400)의 자동일부하중 운전시 출력제어방법으로 모델예측제어 알고리즘을 적용하고, MPC 제어기 적용시 최적의 제어기 구현을 위해 제어 로직의 주요 변수인 예측구간, 제어구간, 모델 차수의 변화에 따른 제어 성능을 평가하였다. 성능 평가는 원자로 출력제어 성능 검증시 사용하는 방법으로 제어 대상인 차세대원자로(APRI400)를 3차원 노심해석 전산코드인 MASTER (Multipurpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactor)로 시뮬레이션하여 제어 성능을 평가하였다.

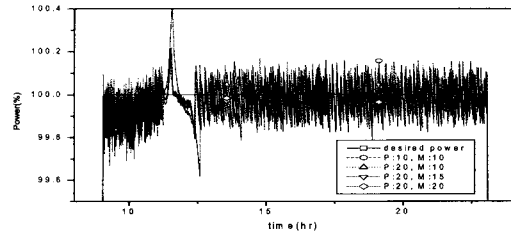
출력준위 제어 및 축방향출력분포(ASI) 제어를 종합적으로 평가한 결과, 제안된 제어기의 경우, 샘플링 간격이 2초이고 모델 차수가 5차인 조건에서는 출력 예측 구간 P는 20이고, 제어 입력 예측구간 M이 15인 경우가 가장 좋은 성능을 나타내는 것으로 평가되었다. 또한, 샘플링 간격이 2초이고, 출력 예측 구간 P와 제어구간 M이 10인 경우의 모델 차수는 5차인 경우가 가장 좋은 성능을 나타내는 것으로 나타났다.

[참 고 문 헌]

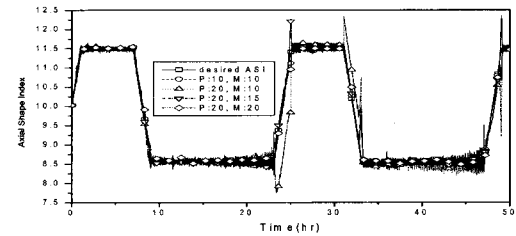
- [1] W. H. Kwon and A. E. Pearson, "A Modified Quadratic Cost Problem and Feedback Stabilization of a Linear System," IEEE Trans. Automatic Control, vol. 22, no. 5, pp. 838-842, 1977
- [2] T. R. Fortescue et al., "Implementation of self-tuning regulators with variable forgetting factors," Automatica, vol. 17, no. 6, pp. 831-835, 1981.
- [3] C. E. Garcia, D. M. Prett, and M. Morari, "Model Predictive Control: Theory and Practice - A Survey," Automatica, vol. 25, no. 3, pp. 335-348, 1989.
- [4] V. Kecman, "Learning and Soft Computing", Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2001.
- [5] B. O. Cho, H. G. Joo, J. Y. Cho and S. Q. Zee, "MASTER: Reactor Core Design and Analysis Code," Proc. 2002 Int. Conf. New Frontiers of Nuclear Technology: Reactor Physics (PHYSOR 2002), Seoul, Korea, 2002.
- [6] M. G. Na, D. W. Jung, S. H. Shin, J. W. Jang, K. B. Lee and Y. J. Lee, "A Model Predictive Controller for Load-Following Operation of PWR Reactors", IEEE Trans. Nuclear Science, vol. 52, No. 4. pp. 1009-1020, 2005.



(a) 원자로 출력 제어 결과(전체)

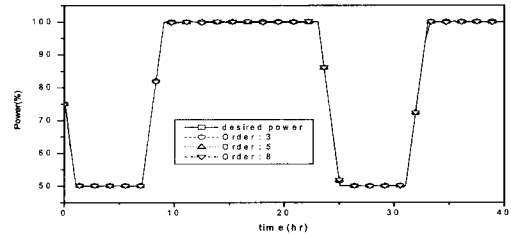


(b) 원자로 출력 제어 결과(일부구간 확대)

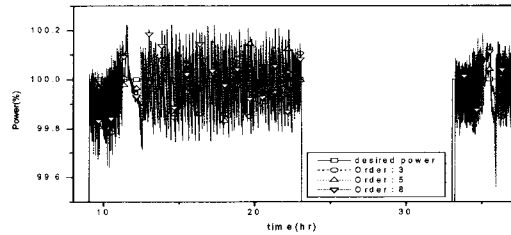


(c) 원자로 축방향 출력분포(ASI) 제어 결과

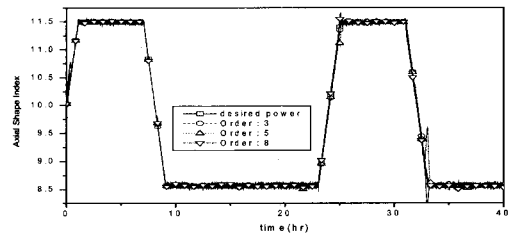
<그림 3> 출력 예측 구간/제어 입력 예측구간 튜닝 시뮬레이션 결과



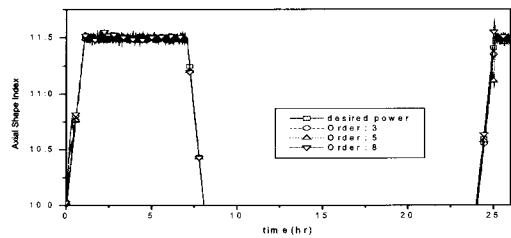
(a) 원자로 출력 제어 결과(전체)



(b) 원자로 출력 제어 결과(일부구간 확대)



(c) 원자로 축방향 출력분포(ASI) 제어 결과(전체)



(d) 원자로 축방향 출력분포(ASI) 제어 결과(일부구간 확대)

<그림 4> 모델 차수 변화에 대한 시뮬레이션 결과