

계단 응답 모델의 보간을 이용한 화력발전 보일러-터빈 시스템의 동역학 행렬제어(DMC)에 관한 연구

(A Study on Interpolated Step Response Model of Dynamic Matrix Control(DMC) for a Boiler-Turbine System of Fossil Power Plant)

오석호 · 문운철*

(Seok-Ho Oh · Un-Chul Moon)

요 약

동역학 행렬제어(Dynamic Matrix Control) 기법은 각종 산업 현장에서 가장 활발하게 적용되고 있는 고급 제어 기법으로, 최근에는 공정제어의 표준 기법으로 인식되고 있다. 동역학 행렬제어에서는 대상 플랜트의 거동을 묘사하기 위하여 계단 응답 모델(Step Response Model)을 이용한다. 한편 화력발전의 보일러-터빈시스템은 심한 비선형성과 넓은 운전영역으로 인하여 기존의 선형제어기법으로 제어하기에는 그 성능의 한계가 있게 된다. 본 논문에서는 미리 선정된 동작점에서 계단 응답 모델을 개발한 후, 이를 통한 실시간 보간(Interpolation)을 통하여 계단응답 모델을 실시간으로 개선하는 동역학 행렬제어 기법을 제시한다. 제시된 제어 기법은 화력발전의 보일러-터빈 시스템에 적용하여 만족할 만한 제어 성능을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes an adaptive Dynamic Matrix Control (DMC) and its application to boiler-turbine system. In a conventional DMC, object system is described as a Step Response Model (SRM). However, a nonlinear system is not effectively described as a single SRM. In this paper, nine SRMs at various operating points are prepared. On-line interpolation is performed at every sampling step to find the suitable SRM. Therefore, the proposed adaptive DMC can consider the nonlinearity of boiler-turbine system. The simulation results show satisfactory results with a wide range operation of the boiler-turbine system.

Key Words : Dynamic Matrix Control(DMC), Boiler-Turbine System, Step Response Model

1. 서 론

모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC)는 일정한 미래 구간 내에서 예측된 출력을 바탕으로 하여, 순차적으로 제어 입력을 계산하는 제어 알고리즘을 통칭한다[1-2]. MPC는 실제 공정에서 혼

* 주저자 : 중앙대학교 전자전기공학부 부교수
Tel : 02-820-5286, Fax : 02-825-1584
E-mail : ucmoon@cau.ac.kr
접수일자 : 2007년 4월 7일
1차심사 : 2007년 4월 15일
심사완료 : 2007년 5월 2일

히 대두되는 입출력 변수들의 제약 조건을 고려할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 현재 공정제어의 표준 기법으로 인식되고 있다. 이 중 동역학 행렬제어(Dynamic Matrix Control, DMC) 알고리즘은 가장 널리 알려져 있는 MPC 알고리즘 중에 한 종류로서, 제어하고자 하는 시스템의 계단 응답 모델(Step Response Model, SRM)을 이용한다. 이러한 DMC 제어기는 여러 공정 제어 분야에서 성공적으로 실 적용되었으며, DMC+, SMC, RMPCT, HIECON, PFC, OPC 등, 다양한 종류의 소프트웨어가 개발되어 상업적으로도 많은 성공을 거두고 있다[2-4].

보일러-터빈 시스템은 발전기의 터빈을 회전시키기 위해 고압의 증기를 공급하는 역할을 한다. 보일러-터빈 시스템 제어의 목표는 드럼 내부의 압력과 수위를 유지하면서 시시각각 변하는 부하의 수요를 충족시키는데 있다. 이러한 보일러-터빈 시스템은 일반적으로 비선형 특성을 갖는 다중입출력(Multi-Input Multi-Output, MIMO) 시스템으로 묘사되고 있다[5].

보일러-터빈 시스템의 강한 비선형성과 넓은 동작 범위로 인해 많은 제어 공학자들의 다양한 연구가 행해져 왔다. Rovnak와 Corlis는 초임계압 보일러에 대한 DMC 모의 실험 결과를 제시하였다[6]. Sanchez 등은 화력발전의 증기 온도 제어 문제에 DMC를 적용하고, PID 제어기보다 우월한 성능을 나타냄을 확인하였다[7]. 문운철은 실험적인 데이터로부터 구한 계단 응답 모델이, 수학적 비선형 모델을 선형화한 계단 응답 모델보다 우수한 제어 성능을 나타낸 모의 실험 결과를 제시하였다[8].

보일러-터빈 시스템의 비선형성을 극복하기 위하여 많은 종류의 적응제어(Adaptive Control) 기법 및 인공 지능 기법이 연구되어 왔다. Hogg와 Ei-Rabaie는 보일러 시스템에 자기 조정 GPC (Self Tuning Generalized Predictive Control, STGPC) 적응제어를 적용하였다[9]. Prasad, Swidenbank와 Hogg는 신경망 모델을 기반으로 한 예측 제어를 제안하였고[10], Dimeo와 Lee는 PI 제어기와 Linear Quadratic Regulator(LQR)의 성능 향상을 위하여 유전자 알고리즘을 적용하였다[11]. Alturki와 Abdennour는 보일러-터빈 시스템의 각 동작점에

서 설계된 5개의 LQR로부터 나온 데이터로 뉴로-퍼지(Neuro-Fuzzy) 제어기를 학습하였다[12]. 한편 국내에서는 보일러-터빈 시스템을 위한 모델 추종형 퍼지 제어기[13]와 진화 전략을 이용한 퍼지 제어기에 관한 연구가 발표되었다[14].

본 논문에서는 계단응답모델의 보간(Interpolation)을 이용한 적응 DMC(Adaptive Dynamic Matrix Control, ADMC)를 제안하고, 이를 드럼 타입의 화력 발전 보일러-터빈 시스템에 적용한 결과를 제시한다. 기존의 DMC에서는 하나의 계단 응답 모델이 모든 동작 범위의 동특성 묘사에 사용된다. 따라서 특정한 동작점에서 생성된 계단 응답 모델은, 넓은 동작 범위에서의 동역학(Dynamics)을 표현하는데 제약이 있게 된다. 본 연구에서는 넓은 영역에서 9개의 동작점을 선정하고, 계단 응답 모델을 구하였다. 이를 기반으로 하여 매 이산 시간마다 현재의 플랜트 상황에 적합한 계단 응답 모델을 구하여 사용한다. 따라서 제안된 적응 동역학 행렬 제어는 보일러 터빈 시스템의 비선형성을 고려할 수 있게 된다. 모의 실험 결과 넓은 동작 범위에서 만족할 만한 제어 결과를 확인하였다.

2. 보간을 이용한 적응 DMC

2.1 비선형 보일러 터빈 시스템 모델

본 논문에서는 드럼 타입 보일러-터빈 시스템을 위한 비선형 모델 중에서 Bell 과 Åström이 제안한 모델[5]을 실제 플랜트로 가정하였다. 이는 160 [MW] 보일러-터빈 발전기 모델로서, 다음과 같은 3차 MIMO 비선형 상태 방정식으로 표현된다[5].

$$\dot{x}_1 = -0.0018u_2x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = [(0.73u_2 - 0.16)x_1^{9/8} - x_2]/10 \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = [141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1]/85 \quad (3)$$

$$y_1 = x_1 \quad (4)$$

$$y_2 = x_2 \quad (5)$$

$$y_3 = 0.05(0.13073x_3 + 100a_{cs} + q_e / 9 - 67.975) \quad (6)$$

$$a_{cs} = \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)} \quad (7)$$

$$q_e = (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \quad (8)$$

3개의 상태변수 x_1 , x_2 그리고 x_3 는 각각 드럼 내의 증기 압력($P[kg/cm^2]$), 전기적 출력($E[MW]$) 그리고 드럼 내부의 유체 증기 밀도($f[kg/m^3]$)를 나타낸다. 3개의 출력 y_1 , y_2 그리고 y_3 는 각각 드럼 내의 증기 압력(x_1), 전기적 출력(x_2) 그리고 드럼 내부의 수위($L[m]$)를 나타낸다. 드럼 내의 수위를 나타내는 y_3 는 증기의 질량비(a_{cs})와 증발율(q_e)을 통하여 구할 수 있다.

세 개의 입력 u_1 , u_2 , u_3 는 제어 밸브의 개폐 정도를 나타내는 값으로서, 각각 연료의 양, 터빈에 공급하는 증기의 양, 그리고 드럼 내의 물의 공급량을 나타낸다. 이 밸브들의 위치는 $[0, 1]$ 사이 값으로 정규화 되었으며, 각 입력의 변화량은 물리적인 특성에 의하여 다음과 같은 제약조건이 존재한다.

$$-0.007 \leq du_1/dt \leq 0.007 \quad (9)$$

$$-2.0 \leq du_2/dt \leq 0.02 \quad (10)$$

$$-0.05 \leq du_3/dt \leq 0.05 \quad (11)$$

2.2 DMC 알고리즘

단일 입출력(Single Input Single Output, SISO) 시스템에서, DMC의 예측 방정식은 다음과 같은 형태이다[1-2].

$$Y_{k+1|k} = Y_{k+1|k-1} + S\Delta U_k + Y_{k+1|k}^d \quad (12)$$

(12)에서, $Y_{k+1|k}$ 는 $t=k$ 인 순간에서 구한 미래 출력 궤적 $[y_{k+1}, \dots, y_{k+p}]$ 을 나타낸다. 이때 p 는 예측구간으로써, 제어에 사용되는 미래 시간 구간이다. $Y_{k+1|k-1}$ 은 이전 u_{k-1} 의 입력이 계속 인가되었을 때의 오픈루프(open loop) 출력 궤적 $[y_{k+1}, \dots, y_{k+p}]$ 이다. ΔU_k 는 입력 벡터 $[\Delta u_{k+1}, \dots, \Delta u_{k+m-1}]$ 이고, m 은 예측에 사용되

는 제어구간이다. S 는 계단 응답 계수를 포함하고 있는 $p \times m$ 동역학 행렬(Dynamic matrix)이고, $Y_{k+1|k}^d$ 는 미래의 출력에서의 외란값이다.

제어입력을 계산하기 위하여 매 이산시간마다 다음과 같은 최적화가 실행된다.

$$\min_{\Delta u_k} \|E_{k+1|k}\|_{\Lambda} + \|\Delta U_k\|_{\Gamma} \quad (13)$$

이 때, $E_{k+1|k}$ 는 $(Y_{k+1|k} - R_{k+1|k})$ 으로, 매 이산시간의 오차 $[e_{k+1}, \dots, e_{k+p}]$ 를 나타내며, $R_{k+1|k}$ 은 미래의 출력이 요구되는 목표값을 나타내는 벡터로서 $[r_{k+1}, \dots, r_{k+p}]$ 로 표현된다. $\|x\|$ 는 가중치가 고려된 유클리디언 노름(Weighted Euclidean norm)인 $x^T A x$ 이다.

그리고 (13)의 목적함수에 다음과 같은 입출력 제약조건들이 고려된다.

$$Y_{\min} \leq Y_{k+1|k} \leq Y_{\max} \quad (14)$$

$$\Delta U_{\min} \leq \Delta U_k \leq \Delta U_{\max} \quad (15)$$

$$U_{\min} \leq U_k \leq U_{\max} \quad (16)$$

이 때 U_k 는 $[u_k, \dots, u_{k+m-1}]$ 이다.

이러한 입출력의 제약조건 (14)~(16)을 갖는 최적화 문제를 해결하기 위해서는 QP(Quadratic Programming)을 사용한다.

매 이산시간에서, 최적화된 입력 ΔU_k 가 계산되면, 첫 번째 입력 Δu_k 는 실제 입력으로 사용되게 되고, 그 나머지 값들은 버려진다. 이러한 절차는 다음 이산시간에도 반복적으로 되풀이된다.

본 연구에서의 보일러-터빈시스템은 3개의 입력과 3개의 출력을 가진 다중입력 다중출력(Multi-Input Multi-Output, MIMO) 시스템이다. 그러므로 (12)~(16)의 $Y_{k+1|k}$, $Y_{k+1|k-1}$, $Y_{k+1|k}^d$, $R_{k+1|k}$, $E_{k+1|k}$ 는 $3p \times 1$ 벡터로, 그리고 U_k 는 $3m \times 1$ 벡터로, S 는 9개의 계단 응답을 포함하는 $3p \times 3m$ 크기의 동역학 행렬로 확장된다. 또한 (13)의 최적화에서 (14)의 제약조건은 $3p \times 1$ 으로, (15)와 (16)의 제약조건은 $3m \times 1$ 으로 확장되어 고려된다.

2.3 9개의 계단 응답 모델 설정

계단 응답 모델은 DMC에서 대상 시스템의 동특성을 묘사하기 때문에, 전체 제어 성능에 중요한 역할을 하게 된다. 그러나 보일러-터빈 시스템 (1)~(8)은 강한 비선형성을 나타내기 때문에, 하나의 계단 응답 모델을 이용한 DMC의 제어 성능은 한계를 갖게 된다.

본 논문에서는 계단 응답 모델들의 보간(Interpolation)을 시도하였다. 계단 응답 모델이 현재 플랜트의 상태를 고려하여 실시간으로 업데이트 된다면, 계단 응답 모델은 보일러-터빈 시스템의 비선형적인 동특성을 효과적으로 묘사할 수 있게 된다. 먼저 일반성을 잃지 않으면서 몇 개의 대표적인 동작점을 선택하였다. 드럼내 수위(y_3)를 0[m]으로 유지한 상태에서, 최대발전량인 160[MW]를 초과하지 않고, 자주 사용될 만한 전기적 출력(y_2)으로 50, 85, 120[MW]을 선정하였다. 드럼내 증기압(y_1)은 전기적 출력에 비례하여 높아져야 하므로 전기적 출력을 감안하여 100, 115, 130[kg/cm²]으로 설정하였다. 결과적으로 y_1 과 y_2 의 대표 값들을 바탕으로, 9개의 동작점을 선정하였다. 이 때, 입력 변수와 상태 변수의 정상상태 값은 (1)~(8)에서 미분항을 제거한 후, 주어진 동작점 y_1, y_2, y_3 값을 대입하여 계산할 수 있다. 표 1은 선택된 9개의 동작점을 나타낸다.

[8]에서 실험적인 데이터를 바탕으로 구한 계단 응답 모델이 수학적 모델을 선형화 하여 얻은 계단 응답 모델보다 우월한 제어 성능을 보이는 모의실험 결과를 제시하였다. 이에 따라 본 논문에서는 실험적인 데이터를 바탕으로 계단 응답 모델을 개발하였다. 이를 위하여, (1)~(8)로 묘사되는 비선형 모델 플랜트에 계단 입력을 적용하는 방법으로 가상 실험을 수행하였으며, 표 1의 각 동작점에서 설정된 9개의 계단 응답 모델을 그림 1에 나타내었다.

그림 1에서 첫 행은 드럼내 증기압(y_1)[kg/cm²], 두 번째 행은 전기적 출력(y_2)[MW] 그리고 3번째 행은 드럼내 수위(y_3)[m]이며, 각 열은 u_1, u_2, u_3 에 독립적으로 계단입력을 인가하였을 경우의 출력 변화를 나타낸다. 응답 중 u_1 - y_1 의 관계에서는, y_2 가 작은 값을 가질 경우(동작점 1, 4, 7)에는 상대적으로 시정수가

길고 이득이 큰 반면에, y_2 가 큰 값을 가질 때(동작점 3, 6, 9)에는 시정수가 작고 이득이 작은 것으로 나타났다. 그림 1에서부터, 9개의 계단응답모델들은 시정수와 정상상태 이득 (Steady State Gain)이 다르지만, 전체적으로 유사한 형태를 나타냄을 확인할 수 있다.

표 1. 선정된 9개의 동작점에서의 출력, 입력, 상태변수값

Table 1. Outputs, Inputs and state variable values at selected nine operating points

동작점	[$y_{1o}, y_{2o}, y_{3o}, u_{1o}, u_{2o}, u_{3o}, x_{3o}$]
OP1	[100, 50, 0, 0.271, 0.604, 0.336, 449.5]
OP2	[100, 85, 0, 0.402, 0.874, 0.547, 417.5]
OP3	[100, 120, 0, 0.533, 1.144, 0.757, 383.7]
OP4	[115, 50, 0, 0.284, 0.548, 0.337, 437.9]
OP5	[115, 85, 0, 0.415, 0.779, 0.544, 402.8]
OP6	[115, 120, 0, 0.545, 1.009, 0.750, 363.8]
OP7	[130, 50, 0, 0.298, 0.506, 0.338, 423.2]
OP8	[130, 85, 0, 0.428, 0.707, 0.541, 382.5]
OP9	[130, 120, 0, 0.558, 0.907, 0.745, 331.6]

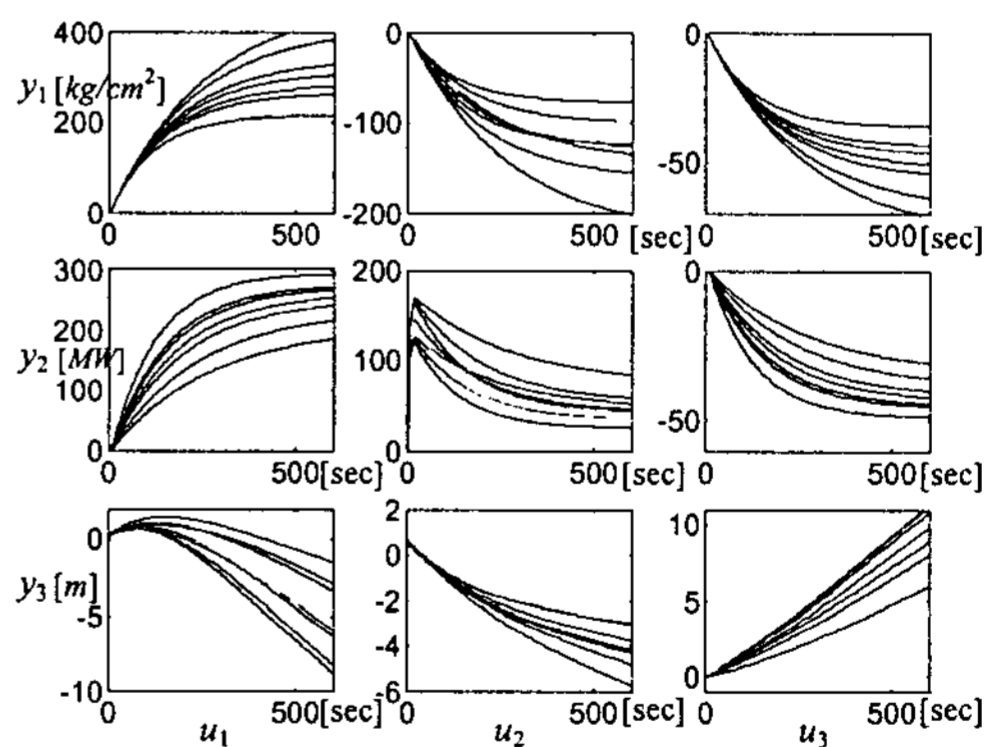


그림 1. 표 1의 동작점에서 설정된 9개의 계단 응답 모델
Fig. 1. Nine step-response models at operating points of Table 1

2.4 계단 응답 모델의 실시간 보간

그림 1에서부터, 9개의 계단응답모델들은 시정수와 정상상태 이득 (Steady State Gain)이 다르지만, 전체적으로 유사한 형태를 나타냄을 확인할 수 있다.

따라서 계단 응답 모델들의 보간(Interpolation)을 적용할 수 있는 구조임을 확인 할 수 있다.

먼저 현재 k 번째의 출력 ($y_1(k), y_2(k)$)와 i 번째의 동작점과의 거리를 다음과 같이 정의한다.

$$d_i = \sqrt{\frac{(y_{1(k)} - y_{10(i)})^2}{15} + \frac{(y_{2(k)} - y_{20(i)})^2}{35}} \quad (17)$$

여기서 $y_{10(i)}$ 와 $y_{20(i)}$ 각각 i 번째 동작점의 y_1 과 y_2 이며, 상수 15와 35는 두 출력의 정규화(normalization)를 위하여 추가된 상수이다.

그 후 가까운 동작점 3개를 선정 한 후, 보간에 적용하였으며, 이 때 각 동작점의 가중치는 거리가 가까울수록 큰 값을 가질 수 있도록, 다음과 같이 d_i 의 역수로 정의하였다.

$$\omega_i = \frac{1}{d_i}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (18)$$

따라서 현재의 출력이 i 번째 동작점과 가까울 경우 그 가중치는 증가하게 된다. 최종적인 계단 응답 모델 $SRM_{(k)}$ 는 다음과 같이 9개의 계단응답모델중, 가까운 세 개의 가중 평균으로 계산하였다.

$$SRM_{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^3 \omega_i SRM_i}{\sum_{i=1}^3 \omega_i} \quad (19)$$

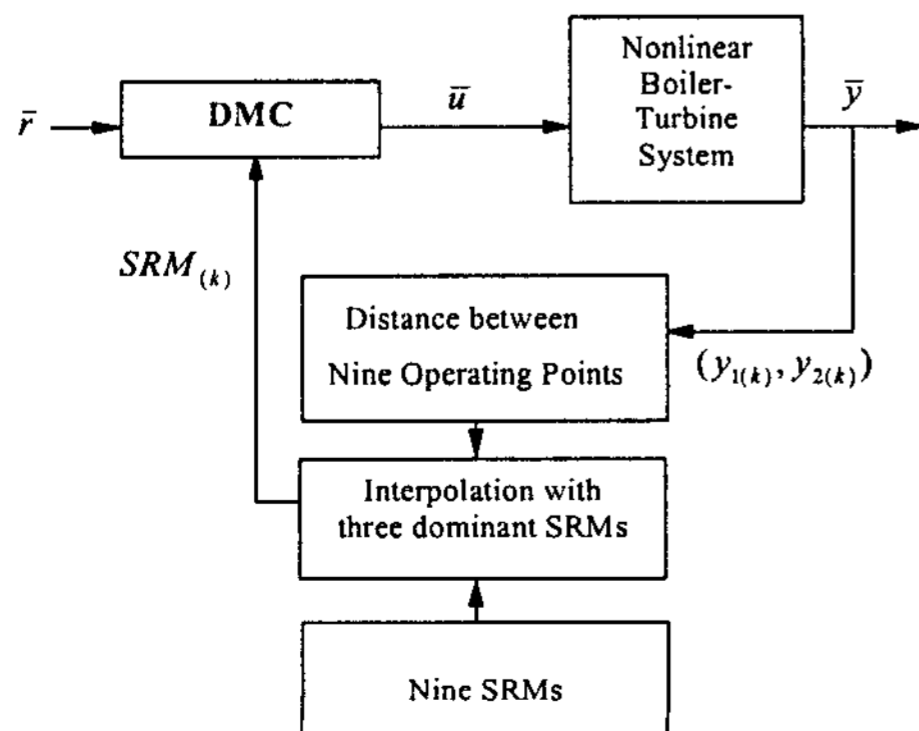


그림 2. 제시된 제어 구조의 전체 구성도
Fig. 2. System configuration of the adaptive DMC

여기서 SRM_i 는 i 번째 동작점에서 미리 구한 계단 응답모델이다.

따라서 이와 같이 계산된 계단 응답모델 $SRM_{(k)}$ 는 미리 구해진 9개의 계단응답 모델을 기반으로 하여 현재 상태에 적합한 계단응답모델을 매 이산시간마다 계산하게 된다.

그림 2는 제시된 제어구조의 전체 구성도이다.

3. 모의 실험

본 연구에서는 개인용 컴퓨터 환경에서 Matlab을 사용하여 (1)~(8)의 비선형 모델과 DMC 제어 시스템의 모의 실험을 수행하였다.

제어기의 설계는 전형적인 DMC 설계 방식을 따랐다. 먼저 DMC의 이산 시간의 간격은 5초, 예측 구간은 600초, 그리고 제어구간은 600초로 설정하였고, 추종값 $R_{k+1|k}$ 는 3개의 목표 출력값으로 고정하였다. 그리고 목적함수 (13)에서 e 와 Δu 의 3개의 입출력을 고려하여 다음과 같이 가중치를 설정하였다.

$$\|e_k\|_{\Lambda} = \begin{bmatrix} e_{k1} \\ e_{k2} \\ e_{k3} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{k1} \\ e_{k2} \\ e_{k3} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\|\Delta u_k\|_{\Gamma} = \begin{bmatrix} \Delta u_{k1} \\ \Delta u_{k2} \\ \Delta u_{k3} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{k1} \\ \Delta u_{k2} \\ \Delta u_{k3} \end{bmatrix} \quad (21)$$

이 때 e_{ki} 는 k -스텝 이산 시간에서 i 번째 출력과 추종값 사이의 오차를 의미한다. (20)에서 y_3 가 y_1, y_2 에 비해 약 100배 정도 작은 값을 나타내기 때문에, 그에 맞게 정규화하기 위해 가중치 e_{k1}, e_{k2} 는 1로 설정한 반면 e_{k3} 는 100으로 정하였다.

$Y_{k+1|k}$ 는 측정된 실제 출력값과 오픈 루프 모델의 출력의 차이를 이용하여 일정한 상수 값을 갖는 벡터로 설정하였다. 본 연구에서는 (14)에 나타난 출력의 제약 조건은 고려하지 않았으며, (9)~(11)에 나타난 입력 변화량의 제약 조건과 입력 크기의 제약 조건 $[0, 1]$ 은 (15)과 같은 형태로 표현하여 제어기에

서 고려하도록 하였다.

모의 실험을 위하여, 시스템이 초기에 표 1의 동작점1의 정상상태 $\bar{y}=(100, 50, 0)$, $\bar{u}=(0.271, 0.604, 0.336)$, $\bar{x}=(100, 50, 449.5)$ 에 있다고 가정하였다. 넓은 범위에서의 목표 값 추종 능력을 확인하기 위하여, 다음과 같은 목표 값을 설정하였다.

$$\bar{r} = \begin{cases} (130, 120, 0), & \text{for } 0 < t < 400 \\ (100, 50, 0), & \text{for } 400 \leq t < 800 \\ (115, 80, 0), & \text{for } 800 \leq t \leq 1200 \end{cases} \quad (22)$$

즉 드럼내 수위를 0으로 유지하면서, 드럼내 증기압(y_1)과 전기적 출력(y_2)을 $t=0$ 일 때(130, 120)으로, $t=400$ 일 때 (100, 50)으로, 그리고 $t=800$ 일 때(115, 80)으로 단계적으로 변화시켰다. 첫번째 단계는 동작점1에서 동작점 9로의 갑작스런 출력의 증가를 나타내고, 두 번째 단계는 동작점 9에서 동작점 1로의 갑작스런 출력 감소, 그리고 세 번째는 동작점 5 근처로의 변화를 나타낸다.

그림 3에 3개를 출력을 나타내었다. 그림에서 수평축은 시간[초]을 나타내고, 수직 축은 y_1 의 드럼내 증기압[kg/cm^2], y_2 의 전기적 출력[MW], 그리고 y_3 의 드럼내 수위[cm]를 각각 나타낸다. 출력 y_1 과 y_2 는 목표 값의 변화에 따라 100초 이내에 목표를 추종하며, y_3 는 150초 이내에 목표인 0에 수렴함을 알 수 있다. 드럼내 수위(y_3)는 전기적 출력(y_2)이 갑자기 감소될 때 22까지 증가하나, 다른 변화에서는 15이내로 유지되었다. 그림 3를 통하여, 제안된 적응 DMC 알고리즘이 보일러-터빈 시스템의 넓은 동작 범위에서 성공적으로 적용 가능함을 알 수 있다. 그림 4는 모의실험의 입력값을 나타낸다. 수평축은 시간[초]을 나타내고, 수직 축은 각 입력 밸브의 위치를 0에서 1사이로 정규화한 것이다.

제안된 제어기의 내부 처리 과정을 그림 5에 나타내었다. 먼저 9개의 동작점 중에서 가장 가까운 혹은 최대의 가중치를 갖는 규칙을 다음과 같이 “주도적인 동작점”(Dominant Operating Point)으로 정의하여 나타내었다.

$$i = \arg \max_{i=1, \dots, 9} (\omega_i) \quad (23)$$

그림 5에서 수평축은 시간[초]이며, 수직 축은 각 9개의 동작점을 의미한다. 모의 실험이 동작점 1에서 시작하기 때문에 $t=0$ 에서 주도적인 동작점이 1이고, 출력이 증가됨에 따라 주도적인 동작점이 2, 3, 6, 9로 이동한다. $t=400$ 부터는 7, 4, 1로 이동하고, $t=800$ 부터는 2, 5로 이동함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 보간(Interpolation)을 이용한 적응 동역학 행렬 제어(DMC) 알고리즘과 이를 보일러-터빈시스템에 적용한 결과를 제시하였다.

일반성을 잃지 않으면서 9개의 계단 응답 모델을 설정하고, 각 동작점에서 시정수와 이득은 다르지만, 전체적으로 유사한 형태의 응답특성을 확인하였다. 이를 기반으로 보일러-터빈시스템의 동작 영역을 반영한 계단응답모델을 실시간으로 계산하였다. 모의 실험에서는 보일러-터빈 시스템의 넓은 동작 범위에서 만족할만한 제어 성능을 나타내었다.

본 연구에서 제안된 적응 DMC알고리즘은 유사한 비선형 플랜트 제어 문제에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

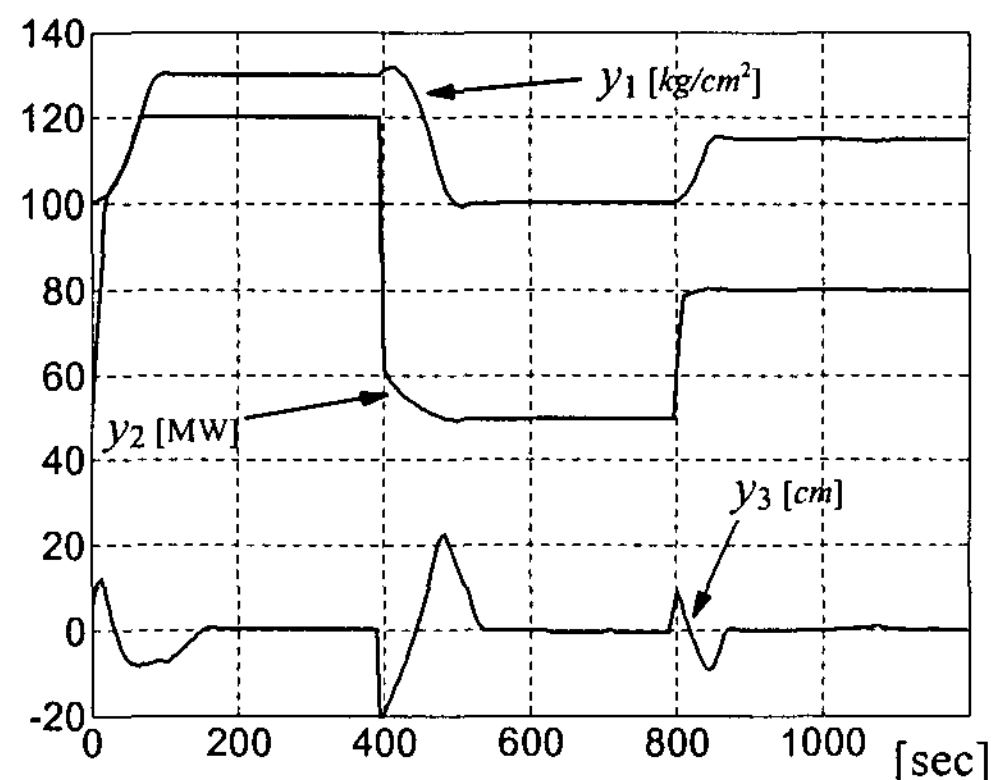


그림 3. 제시된 적응형 DMC의 출력
Fig. 3. Outputs of the adaptive DMC

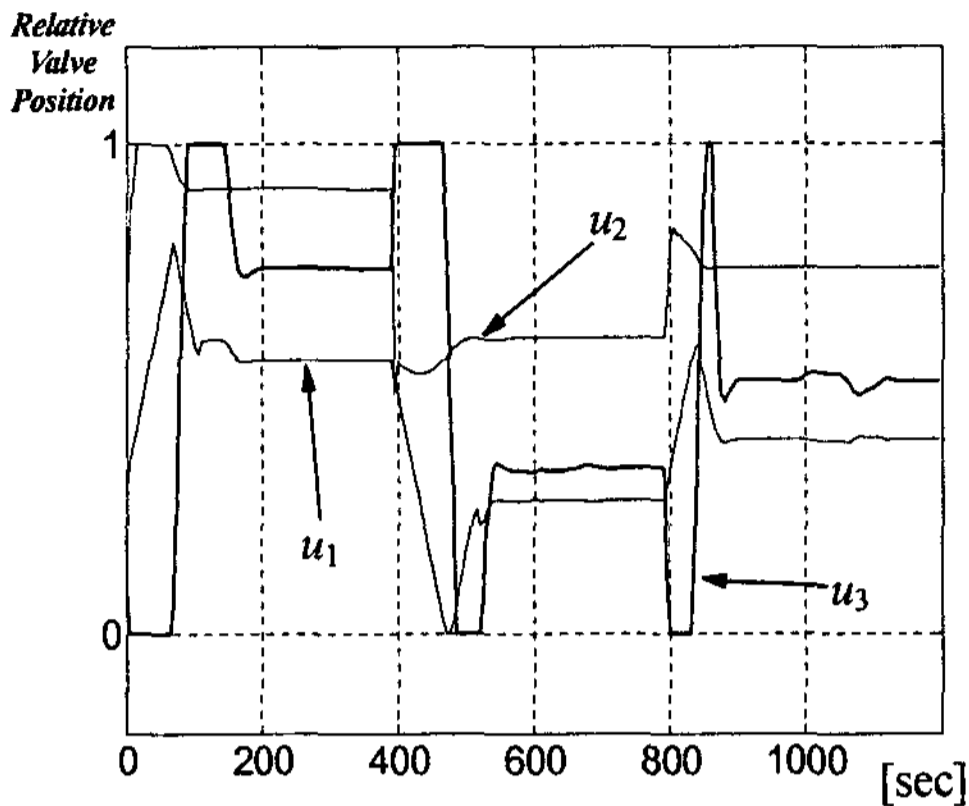


그림 4. 제시된 적응형 DMC의 입력
Fig. 4. Inputs of the adaptive DMC

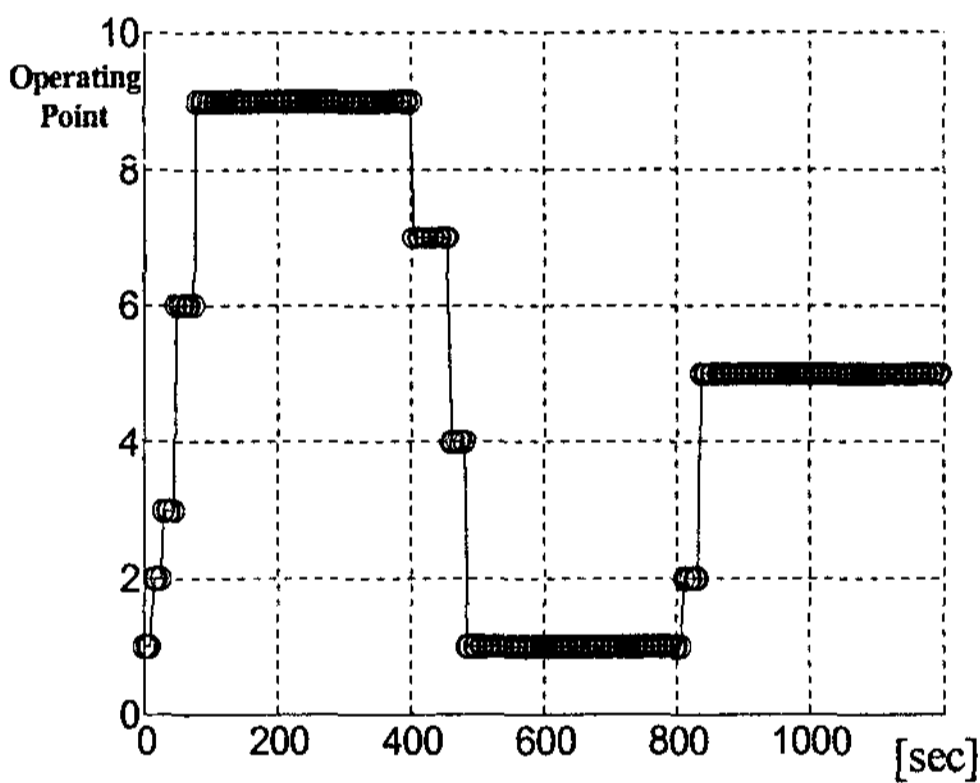


그림 5. 주도적인 동작점
Fig. 5. Dominant operating points

본 연구는 2007년도 중앙대학교 학술연구비(일반연구비) 지원에 의한 것임.

References

[1] J. H. Lee, "Model Predictive Control in the Process Industries: Review, Current Status and Future Outlook", Proceedings of the 2nd Asian Control Conference, Vol II, pp. 435-438, Seoul, July 22-25, 1997.
 [2] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud and J. Papon, "Model Predictive Heuristic Control: Application to Industrial Processes", Automatica, Vol. 14, No. 5, pp. 413-428, 1978.
 [3] C. E. Garcia, and A.M. Morshedi, "Quadratic Programming Solution of Dynamic Matrix Control(QDMC)," Chem. Eng.

Commun., Vol. 46, pp. 73-87, 1986.
 [4] Danielle Dougherty and Douglas J. Cooper, "Tuning Guidelines of a Dynamic Matrix Controller for Integrating (Non-Self-Regulating) Processes", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 42, pp. 1739-1752, 2003.
 [5] R. D. Bell and K. J. Åström, Dynamic models for boiler-turbine-alternator units: Data logs and parameter estimation for a 160 MW unit, Report: TRRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987.
 [6] J. A. Rovnak and R. Corlis, "Dynamic Matrix based Control of Fossil Power Plant", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 2, pp. 320-326, June 1991.
 [7] L. A. Sanchez, F. G. Arroyo and R. A. Villavicencio, "Dynamic Matrix Control of Steam Temperature in Fossil Power Plant", IFAC Control of Power Plants and Power Systems, Cancun, Mexico, 1995.
 [8] 문운철, "화력발전 보일러-터빈 시스템을 위한 Dynamic Matrix Control(DMC)의 계단응답모델 선정에 관한 연구, 한국조명설비학회 논문지, 제20호 7권, pp. 125-133, 2006, 6.
 [9] B. W. Hogg and N. M. El-Rabaie, "Multivariable Generalized Predictive Control of a Boiler System", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 2, pp. 282-288, June 1991.
 [10] G. Prasad, E. Swidenbank and B. W. Hogg, "A Neural Net Model-based Multivariable Long-range Predictive Control Strategy Applied in Thermal Power Plant Control", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 2, pp. 176-182, March 1991.
 [11] R. Dimeo and K. Y. Lee, "Boiler-Turbine Control System Design using a Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 4, pp. 752-759, December 1995.
 [12] F. A. Alturki and A. B. Abdenmour, "Neuro-Fuzzy Control of a Steam Boiler-Turbine Unit", in Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, pp. 958-962, Hawaii, U.S.A., 1999.
 [13] 조경완, 김상우, 김종욱, "보일러-터빈 시스템을 이용한 다변수 퍼지 제어기의 설계", 제어자동화시스템공학회 논문지, 제7권 4호, pp. 295-303, 2001. 4.
 [14] 정호성, 황현준, 황창선, "퍼지 제어를 이용한 다변수 모델 추종 보일러-터빈 제어시스템의 설계", 대한전기학회논문지, 제46권 7호, pp. 1074-1083, 1997. 7.

◇ 저자소개 ◇

오석호 (吳錫鎬)

1982년 9월 13일생. 2006년 중앙대 전자전기공학부 졸업. 현재 중앙대학교 전자전기공학부 대학원 석사과정. 관심분야 : 지능시스템과 자동제어.

문운철 (文雲哲)

1968년 10월 1일생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1993년 및 1996년 동 대학원 석사 및 박사. 1996~2000년 삼성SDS. 2000~2002년 우석대학교 전기공학과. 2002년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 부교수.