

## 계단응답의 내삽기법을 이용한 DMC의 보일러-터빈 시스템 적용

최형욱, 문운철, 이승철  
중앙대학교 전자전기공학부

## Boiler-Turbine System Control Using Interpolative Step Response Model Based DMC

Hyung-Wook Choi, Un-Chul Moon, Seung Chul Lee  
School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang Univ.

**Abstract** - 본 연구에서는 화력발전의 보일러-터빈 시스템에 DMC(Dynamic Matrix Control) 기법을 적용한다. 고정된 동작점 모델들 간의 내삽(Interpolation)을 이용하여 실시간으로 계단응답모델을 계산 및 개선하고 이를 기반으로 제어를 실행한다. 제시된 제어 기법은 화력발전의 보일러-터빈 시스템을 대상으로 한 모의실험을 통하여 그 효용성을 나타낸다.

## 1. 서 론

보일러 터빈 시스템 제어의 목표는 드럼 내부의 압력과 수위를 유지하면서 시시각각 변하는 부하의 수요를 충족시키는 데 있다. 이러한 보일러 터빈 시스템은 일반적으로 비선형 특성을 갖는 다중입출력(Multi-Input Multi-Output, MIMO) 시스템으로 묘사되고 있다 [1].

모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC)는 일정한 미래 구간 내에서 예측된 출력을 바탕으로 하여, 순차적으로 제어 입력을 계산하는 제어 알고리즘을 통칭한다 [2]. MPC는 입력과 출력 변수들의 제한 조건을 고려할 수 있는 이점을 가지고 있으며, 최근에는 공정제어의 표준 기법으로 인식되고 있다 [2]. 이 중, 동역학행렬제어(Dynamic Matrix Control, DMC) 알고리즘은 가장 널리 알려져 있는 MPC 알고리즘 중에 한 종류로서, 제어하고자 하는 시스템의 계단 응답 모델을 이용한다. DMC는 매 이산 시간마다 매우 많은 계산량을 필요로 하기 때문에 주로 거동이 느린 화학 플랜트 시스템을 대상으로 수많은 적용사례가 보고되었으며, DMC+, SMC, RMPCT, HIECON, PFC, OPC 등, 많은 종류의 상업적인 소프트웨어가 개발되었다 [3]. 최근에는, 상태 공간 모델을 바탕으로 한 MPC가 연구되고 있지만 [4],[5], 아직까지 상태공간 MPC의 실제적인 적용 사례는 찾아보기 힘든 실정이다.

DMC의 성공적인 적용에 의해 전력 시스템 분야에서는 Rovnak과 Corlis가 초임계압 보일러(Super-critical B oiler)에 대한 DMC의 모의 실험 결과를 제시하였다 [6]. Sanchez 등은 화력발전의 스텁 온도 제어 문제에 DMC를 적용하고, PID 제어기보다 우월한 성능을 나타냄을 확인하였다 [7].

일반적으로 DMC에서는 대상시스템의 계단응답모델(Step Response Model)을 이용하여 미래의 출력을 예측한다. 그러나 보일러-터빈 시스템과 같이 비선형성이 심한 시스템에서는 고정된 동작점에서 구한 계단응답 모델을 모든 동작점에서 적용하기에는 무리가 있다. 본 연구에서는, 먼저, 다양한 동작점에서 구한 계단응답 모델을 구한다. 그 후, 미리 알고 있는 동작점에서의 SRM들의 내삽(Interpolation)을 이용하여, 현재의 동작점에 따라 실시간으로 SRM을 구하는 기법을 제시한다. 제시된 알고리듬은 보일러-터빈 시스템의 비선형 모의 실험을 통하여 그 효용성을 입증하였다.

## 2. 본 론

## 2.1 보일러 터빈 시스템 모델

보일러 터빈 시스템을 위한 다양한 비선형 모델 중에서 벨과 옹스트롬이 제안한 모델 [1]을 실제 플랜트로 이용하였다 [1]

$$\dot{x}_1 = -0.0018u_2x_1^{0.8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = [(0.73u_2 - 0.16)x_1^{0.8} - x_2]/10 \quad (2)$$

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

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

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

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

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

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

3가지의 상태변수  $x_1$ ,  $x_2$  그리고  $x_3$ 는 각각 드럼 내의 증기 압력( $P$  [kg/cm<sup>2</sup>]), 전기적 출력( $E$  [MW]) 그리고 드럼 내부의 유체 증기 밀도( $f$  [kg/m<sup>2</sup>])를 상대적으로 나타낸다. 3가지 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 상대적으로 나타낸다.

또, 각각의 입력  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ 는 제어 벨브의 위치로서, 연료의 양, 터빈에 공급하는 증기의 양 그리고 드럼 내의 물의 공급량을 상대적으로 나타낸다. 이 벨브들의 위치는 [0, 1]사이 값으로 규정되며 각 입력의 변화량은 다음과 같은 제약조건을 따른다.

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

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

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

## 2.2 보일러-터빈 시스템의 DMC

단일 입출력 (Single Input Single Output, SISO) 시스템에서, 예측 방정식은 다음과 같은 형태이다 [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=k인 순간에서 예측구간  $p$ 를 갖

는 미래 출력의 궤적  $[y_{k+1}, \dots, y_{k+p}]$ 을 나타낸다.  $Y_{k+1|k-1}$ 는 이전  $u_{k-1}$ 에서의 입력  $u$ 가 대입되었을 때의 오픈 루프 (open loop) 출력의 궤적  $[y_{k+1}, \dots, y_{k+p}]$ 이다.  $\Delta U_k$ 는 입력 벡터  $[\Delta u_k, \dots, \Delta u_{k+m-1}]$ 이고,  $m$ 은 제어구간이다.

$S$ 는 계단 응답 계수를 포함하고 있는 동역학 행렬이고,

$Y_{k+1|k}^d$ 는 미래의 출력에서의 외란값이다.

제어입력을 계산하기 위하여 매 이산시간마다 다음과 같은 최적화가 실행된다.

$$\min_{\Delta u_k} \|E_{k+1|k}\|_A + \|\Delta U_k\|_V \quad (13)$$

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 벡터로  $[r_{k+1}, \dots, r_{k+p}]$ 로 표현된다. 또,  $\|x\|_A$ 는 가중치가 고려된 유클리디언 노음(Weighted Euclidean norm)인  $x^T A x$ 이다.

그리고, (13)의 목적함수에 다음과 같은 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.

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

본 연구에서의 보일러 터빈 시스템은 3개의 입력과 3개의 출력을 가진 다중입력 다중출력 (Multi-Input Multi-output, MIMO) 시스템이다.

그러므로, (12)-(16)의  $Y$ 의 원소인  $y$ ,  $\Delta U$ 의 원소  $\Delta u$ ,  $E$ 의 원소  $e$  그리고  $R$ 의 원소  $r$ 은 각각 세 개의 원소를 가진 벡터로 표현된다. 또한, 동역학행렬  $S$ 는 세 개의 입력과 출력의 관계를 나타내는 9개의 계단응답을 모두 포함하게 된다.

본 연구에서 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 (34)에서 각각의  $e$ 와  $\Delta u$ 의 3개의 입출력을 고려하여 가중치를 설정하였다.

$Y_{k+1|k}^d$ 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 조건은 (15)의 형태로, 입력 크기의 제약조건  $[0,1]$ 은 (16)과 같이 표현하여 제어기에서 고려하도록 하였다.

### 2.3 다양한 동작점에서의 계단응답모델 설정

본 연구에서는 먼저 9개의 동작점을 선정하여 각 동작점에서의 계단응답 모델을 설정하였다. 기존의 연구에서 보일러-터빈 시스템의 DMC 적용을 위해서는 비선형모

델의 선형화를 통한 선형모델보다는 대상 플랜트의 입출력 데이터를 통한 계단응답 모델이 유용함이 밝혀졌다 [9]. 따라서 본 연구에서는 표 1과 같은 9개의 동작점을 사용하여 각각의 동작점에서의 계단입력을 인가하고 이에 따른 출력의 데이터를 이용하여 계단응답 모델들을 설정하였다. 그럼 1은 설정된 계단응답모델의 한 예로서 동작점 1에서 선정된 계단 응답 모델이다.

표 1. 선정된 9개의 동작점

동작점 1	$(y_1, y_2, y_3) = (100, 50, 0)$
동작점 2	$(y_1, y_2, y_3) = (100, 85, 0)$
동작점 3	$(y_1, y_2, y_3) = (100, 120, 0)$
동작점 4	$(y_1, y_2, y_3) = (115, 50, 0)$
동작점 5	$(y_1, y_2, y_3) = (115, 85, 0)$
동작점 6	$(y_1, y_2, y_3) = (115, 120, 0)$
동작점 7	$(y_1, y_2, y_3) = (130, 50, 0)$
동작점 8	$(y_1, y_2, y_3) = (130, 85, 0)$
동작점 9	$(y_1, y_2, y_3) = (130, 120, 0)$

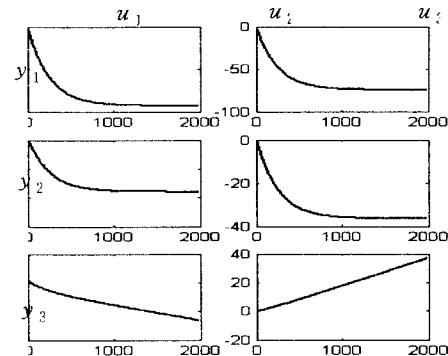


그림 1.동작점에서의 계단 응답 모델.

### 2.4 내삽기법을 이용한 계단응답모델의 선정

본 연구에서는 위와 같이 설정된 9개의 계단응답모델을 이용하여, 실시간으로 DMC에서 사용되는 계단응답 모델을 개선시키게 된다. 매 k-번 째 이산시간의 출력,  $y_1(k)$ ,  $y_2(k)$ 와 선정된 9개의 동작점간의 기하학적인 거리를 다음과 같이 설정한다.

$$d_i = \sqrt{(y_{1i} - y_1(k))^2 + (y_{2i} - y_2(k))^2} \quad i=1, \dots, 9 \quad (17)$$

그 후, 9개의 거리 중, 가까운 3개의 동작점을 선정하여,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ 를 선정하였다. 그 후, 거리  $d$ 의 역수를 가중치로 설정하여 (18)와 같이 내삽(Interpolation)을 시행하고, 이 결과를 현재상태에 적합한 계단응답모델을 선정하였다.

$$STR(k) = \frac{1}{(1/d_1 + 1/d_2 + 1/d_3)} \left( \frac{STR1}{d_1} + \frac{STR2}{d_2} + \frac{STR3}{d_3} \right) \quad (18)$$

이 때  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ 는 (17)에서 선정된 가까운 동작점 3개의 거리를 나타내며, STR1, STR2, STR3는 각각 그 때의 동작점에서의 계단응답모델이며, STR(k)는 k-번 째 이산시간에서 새롭게 계산된 계단응답 모델이다.

(18)는 매 이산시간마다 반복적으로 계산되어, 현재상태에 가장 적합한 계단응답모델을 결정하게 된다. 따라서 DMC에서는 항상 현재 상황에 적합한 모델을 사용하여 미래의 출력값을 예측하기 때문에, 고정된 동작점의 계단응답 모델의 사용보다 효율적인 제어가 가능하게 된다. 그림 2는 제시된 제어 시스템의 전체 구성도이다.

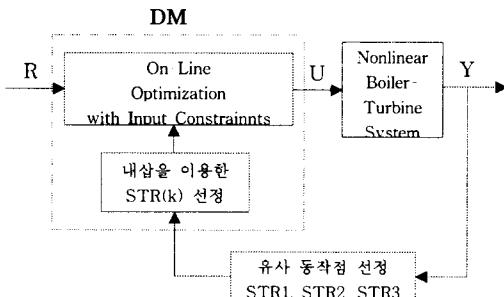


그림 2. 제시된 제어 시스템의 전체 구성도.

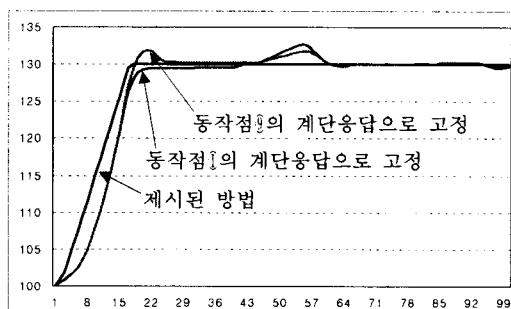


그림 3. 고정된 동작점을 이용한 DMC의  $y_1$  비교.

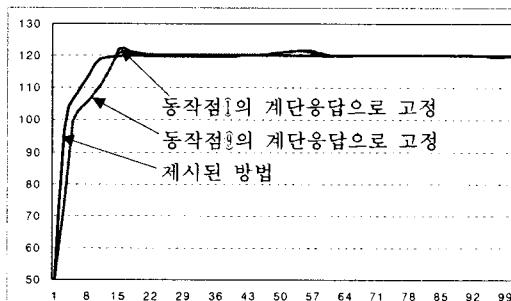


그림 4. 고정된 동작점을 이용한 DMC의  $y_2$  비교.

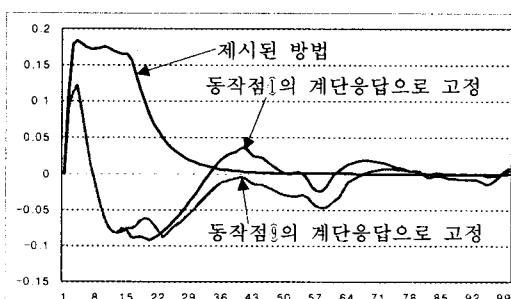


그림 5. 고정된 동작점을 이용한 DMC의  $y_3$  비교.

### 3. 모의 실험

본 연구에서는 개인용 컴퓨터 환경에서 Matlab을 사용하여 제어 시스템과 비선형모델의 모의 실험을 수행하였다. 그림 3, 4, 5는 각각  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ 의 그림을 나타내며, 제시된 DMC 알고리듬과의 비교를 위해서, 동작점 1과 동작점 2의 고정된 계단응답 모델을 이용한 결과를 동시에 나타내었다. 세 가지의 출력의 경우 모두 제시된 방법이 우월한 결과를 나타냄을 확인 할 수 있다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 고정된 동작점 모델들 간의 내삽(Interpolation)을 이용하여 실시간으로 계단응답 모델을 계산 및 개선하고 이를 기반으로한 DMC (Dynamic Matrix Control) 기법을 제시하였다. 제시된 제어 기법은 화력발전의 보일러-터빈 시스템을 대상으로 한 모의실험을 통하여 고정된 계단응답 모델을 사용한 DMC 기법보다 우월한 제어 성능을 확인하였다.

### 알 름

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-B-203) 주관으로 수행되었음.

### [참 고 문 헌]

- [1] R. D. Bell and K. J. strm, *Dynamic models for boiler-turbine-alternator units: Data logs and parameter estimation for a 160 MW unit*, Report: TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987.
- [2] 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.
- [3] C. R. Culter and B. L. Ramaker, "Dynamic Matrix Control - A Computer Control Algorithm.", *Proceedings of Joint Automatic Control Conference*, San Francisco, CA, 1980.
- [4] J. H. Lee and N. L. Ricker, "Extended Kalman Filter based Model Predictive Control", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 37, pp. 4003-4016, 1998.
- [5] Yaohui Lu and Yaman Arkun, "Quasi-Min-Max MPC algorithm for LPV systems", *Automatica*, Vol. 36, pp. 527-540, 2000.
- [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] G. F. Franklin, J. D. Powell and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic System*, Prentice-Hall, 2002.
- [9] 김우근, 문운철, 이승철 "화력발전 보일러-터빈 시스템에 대한 DMC의 적용", 대한 전기학회 논문제출 심사증.