

**보일러 터빈 시스템의 적응 동역학 행렬 제어에 관한 연구**

오석호, 문운철, 이승철  
 중앙대학교 전자전기공학부

**A study on Adaptive Dynamic Matirx Control of a Boiler-Turbine System**

Seok-Ho Oh, Un-Chul Moon, Seung-Chul Lee  
 Dept. of Electronical and Electronics Engineering, Chung-Ang Univ.

**Abstract** - This paper proposes an adaptive Dynamic Matrix Control (DMC) using Fuzzy Inference and its application to boiler-turbine system. Nine Step Response Models (SRM) at various operating points are represented as fuzzy inference rules. On-line fuzzy inference is performed at every sampling step to find the suitable SRM. Therefore, the proposed adaptive DMC can consider the nonlinearity of boiler-turbine system.

**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. 이 때, Dynamic Matrix Control(DMC)는 가장 잘 알려진 MPC의 한 종류로써, 각종 산업 현장의 고급 제어에 가장 널리 적용되었다[1].

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 충족시키는 데 있다. 보일러-터빈 시스템의 비선형성을 극복하기 위하여 많은 종류의 적응제어(Adaptive Control) 기법 및 인공 지능 기법이 연구되어 왔다. Hogg와Ei-Rabaie는 보일러 시스템에 자기 조정 (self tuning) GPC (Generalized Predictive Control) 적응제어를 적용하였다[2]. 보일러-터빈 시스템을 위한 모델 추종형 퍼지 제어기[3]와 진화 전략을 이용한 퍼지 제어기에 관한 연구가 발표되었다[4].

본 논문에서는 퍼지 추론을 이용한 적응(Adaptive) DMC를 제안하고, 이를 드럼 타입의 화력 발전 보일러-터빈 시스템에 적용한 결과를 제시한다. 기존의 DMC에서는 하나의 계단 응답 모델이 모든 동작 범위의 동특성 묘사에 사용된다. 본 연구에서는, 전형적인 9개의 동작점에서 계단 응답 모델을 각각 설정하고, 이들을 9개의 퍼지 규칙으로 표현하였다. 따라서, 제안된 적응 동역학 행렬 제어는 보일러 터빈 시스템의 비선형성을 고려할 수 있게 된다. 모의실험 결과, 넓은 동작 범위에서 만족할 만한 제어 결과를 확인하였다

**2. 퍼지 추론을 이용한 적응 DMC**

**2.1 보일러-터빈 시스템**

본 논문에서는 드럼 타입 보일러-터빈 시스템을 위한 비선형 모델 중에서 Bell 과 åström 이 제안한 모델을 실제 플랜트로 가정하였다[5].

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

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

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

$$y_1 = x_1 \tag{4}$$

$$y_2 = x_2 \tag{5}$$

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

여기서,

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

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

3개의 상태변수  $x_1, x_2, x_3$ 는 각각 드럼 내의 증기 압력 ( $P$  [ $kg/cm^2$ ]), 전기적 출력 ( $E$  [ $MW$ ]) 그리고 드럼 내부의 유체 증기 밀도 ( $\rho_f$  [ $kg/m^3$ ])를 나타낸다. 3개의 출력  $y_1, y_2, y_3$ 는 각각 드럼 내의 증기 압력 ( $x_1$ ), 전기적 출력 ( $x_2$ ) 그리고 드럼 내부의 수위 ( $L$  [ $m$ ])를 나타낸다. 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. 각 입력의 변화량은 다음과 같은 제약된다.

$$-0.007 \leq du_1/dt \leq 0.007 \tag{9}$$

$$-2.0 \leq du_2/dt \leq 0.02 \tag{10}$$

$$-0.05 \leq du_3/dt \leq 0.05 \tag{11}$$

**2.2 DMC 알고리즘**

본 연구에서의 보일러-터빈 시스템은 3개의 입력과 3개의 출력을 가진 다중입력 다중출력(Multi-Input Multi-Output, MIMO) 시스템이다. DMC에서는 다음과 같은 예측 방정식을 사용한다.

$$\bar{Y}_{k+1|k} = \bar{Y}_{k+1|k-1} + \bar{S}\Delta\bar{U}_k + \bar{Y}^d_{k+1|k} \tag{12}$$

여기서,  $\bar{S}$ 는 9개의 계단 응답을 포함하는 동역학 행렬이다. 이 때, 매 이산 시간마다 다음과 같은 최적화 문제를 계산한다.

$$\min_{\Delta\bar{U}_k} \|\bar{E}_{k+1|k}\|_A + \|\Delta\bar{U}_k\|_R \tag{13}$$

여기서,  $\bar{E}_{k+1|k}$ 는  $(\bar{Y}_{k+1|k} - \bar{R}_{k+1|k})$ 를 나타낸다.

**2.3 9개의 계단 응답 모델 설정**

본 논문에서는 계단 응답 모델들의 보간(Interpolation)을 시도하였다. 먼저, 일반성을 잃지 않으면서 표 1과 같이 9개의 대표적인 동작점을 선택하였다. 그 후, 각 동작점에서의 계단응답 실험을 통하여 9개의 계단 응답 모델을 각각 구하였다.

**표 1. 선정된 9개의 동작점**

동작점	[ $y_1, y_2, y_3, u_1, u_2, u_3, x_3$ ]
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]

**2.4. 실시간 계단 응답 모델의 퍼지 추론**

그림 1은  $y_1$ 의 언어적 값을 표현한 멤버십 함수  $A_1, A_2, A_3$ 와  $y_2$ 의 언어적 값을 표현한 멤버십 함수  $B_1, B_2, B_3$ 를 나타낸다. 이를 이용하여,

다음과 같은 퍼지 규칙을 형성하였다.

$$R_1: \text{If } y_1 \text{ is } A_1 \text{ and } y_2 \text{ is } B_1, \text{ Then SRM is } SRM_1. \quad (14)$$

$$R_2: \text{If } y_1 \text{ is } A_1 \text{ and } y_2 \text{ is } B_2, \text{ Then SRM is } SRM_2. \quad (15)$$

$$R_3: \text{If } y_1 \text{ is } A_1 \text{ and } y_2 \text{ is } B_3, \text{ Then SRM is } SRM_3. \quad (16)$$

$$R_4: \text{If } y_1 \text{ is } A_2 \text{ and } y_2 \text{ is } B_1, \text{ Then SRM is } SRM_4. \quad (17)$$

$$R_5: \text{If } y_1 \text{ is } A_2 \text{ and } y_2 \text{ is } B_2, \text{ Then SRM is } SRM_5. \quad (18)$$

$$R_6: \text{If } y_1 \text{ is } A_2 \text{ and } y_2 \text{ is } B_3, \text{ Then SRM is } SRM_6. \quad (19)$$

$$R_7: \text{If } y_1 \text{ is } A_3 \text{ and } y_2 \text{ is } B_1, \text{ Then SRM is } SRM_7. \quad (20)$$

$$R_8: \text{If } y_1 \text{ is } A_3 \text{ and } y_2 \text{ is } B_2, \text{ Then SRM is } SRM_8. \quad (21)$$

$$R_9: \text{If } y_1 \text{ is } A_3 \text{ and } y_2 \text{ is } B_3, \text{ Then SRM is } SRM_9. \quad (22)$$

여기서,  $SRM_i$  는  $i$ 번째 동작점에서 구한 계단 응답 모델이다.

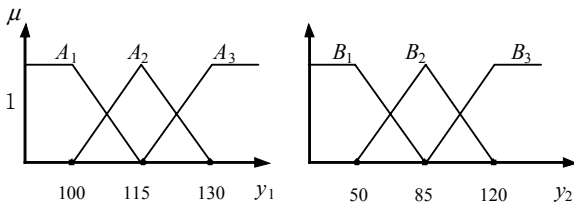


그림 1.  $y_1$ 과  $y_2$ 의 언어적 표현

$k$ 번째 이산 시간에서, 각 규칙의 적합도(Truth Value) 또는 활성화 강도(Firing Strength)가 다음과 같이 계산된다[6],[7].

$$\omega_i = \min[\mu_{A_i}(y_{1(k)}), \mu_{B_i}(y_{2(k)})], \text{ for } i\text{-th rule} \quad (23)$$

여기서,  $A_i$  와  $B_i$  는  $i$ 번째 규칙의 언어적인 퍼지 집합이다.

그 후, 퍼지 추론의 출력  $SRM_{(k)}$ 는 각 계단 응답 모델의 적합도를 이용한 가중치 평균으로 다음과 같이 계산하였다.

$$SRM_{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^9 \omega_i SRM_i}{\sum_{i=1}^9 \omega_i} \text{ at } k\text{-th step}, \quad (24)$$

따라서,  $SRM_{(k)}$ 는 주어진 9개의 계단 응답 모델을 바탕으로 플랜트의 비선형성에 효과적으로 대처할 수 있게 된다. 그림 2는 제안된 제어 시스템의 전체적인 구성을 보여준다.

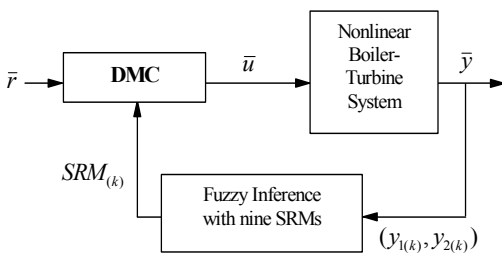


그림 2. 퍼지 추론을 이용한 적응 DMC 시스템의 구성

### 3. 모의 실험 결과

DMC의 이산 시간의 간격은 5초, 예측 구간은 600초, 그리고 제어 구간은 100초로 설정하였고, 추종값  $\bar{R}_{k+1|k}$ 는 3개의 목표 출력값으로 고정하였다. 넓은 범위에서의 목표 값 추종 능력을 확인하기 위하여, (25)와 같은 목표 값을 설정하였다.

그림 3에 제안된 제어 시스템의 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 3을 통하여, 제안된 적응 DMC 알고리즘이 보일러-터빈 시스템의 넓은 동작범위에서 성공적으로 적용 가능함을 알 수 있다.

$$\bar{r} = \begin{cases} (130, 120, 0), & \text{for } 0 < t < 400 \\ (100, 50, 0), & \text{for } 400 \leq t < 800 \\ (115, 80, 0), & \text{for } 800 \leq t \leq 1200 \end{cases} \quad (25)$$

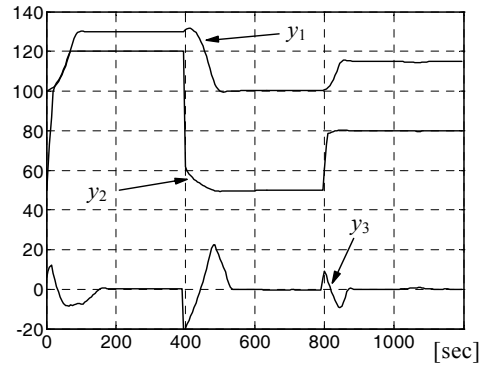


그림 3. 적응 DMC의 출력

### 4. 결론

본 논문에서는 퍼지 추론을 이용한 적응 동역학 행렬 제어(DMC) 알고리즘과 이를 보일러-터빈 시스템에 적용한 결과를 제시하였다. 일반성을 잃지 않고, 9개의 계단 응답 모델을 설정하고, 이를 기반으로 보일러-터빈 시스템의 동작 영역을 반영한 계단응답모델을 실시간으로 퍼지 추론하였다. 모의 실험에서 보일러 터빈 시스템의 넓은 범위에서의 동작이 만족할만한 성능을 나타내었다. 본 연구에서 제안된 적응 DMC 알고리즘은 유사한 비선형 플랜트 제어 문제에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자율부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-B-103) 주관으로 수행된 과제임.

#### [참 고 문 헌]

- [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] B. W. Hogg and N. M. Ei-Rabaie, "Multivariable Generalized Predictive Control of a Boiler System", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 6, No. 2, pp. 282-288, June 1991.
- [3] 조정완, 김상우, 김종욱, "보일러-터빈 시스템을 이용한 다변수 퍼지 제어기의 설계", *제어자동화시스템공학회 논문지*, 제7권 4호, pp. 295-303, 2001. 4
- [4] 정호성, 황현준, 황장선, "퍼지 제어기를 이용한 다변수 모델 추종 보일러-터빈 제어시스템의 설계", *대한전기학회논문지*, 제46권 7호, pp. 1074-1083, 1997. 7
- [5] 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.
- [6] R. C. Bansal, "Bibliography on the Fuzzy Set Theory Applications in Power Systems (1994-2001)", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 4, pp.1291-1299, Nov. 2003
- [7] H. J. Zimmermann, *Fuzzy set theory and its applications*, Kluwer Academic Publishers, 1991.