

## 유전 알고리즘을 이용한 최적 모델 추종형 보일러-터빈 제어 시스템의 설계에 관한 연구

류철수\* · 황현준\* · 김동완\*\* · 박준호\* · 황창선\*  
\*부산대학교 전기공학과 · \*\*동명전문대학 전기과

### A Study on Design of Optimal Model Following Boiler-Turbine Control System Using Genetic Algorithms

C. S. Ryu\* · H. J. Hwang\* · D. W. Kim\*\* · J. H. Park\* · C. S. Hwang\*  
\*Pusan National University · \*\*Dong-Myung Junior College

**Abstract** - The aim of this paper is to introduce a method designing the optimal model following boiler-turbine control system using genetic algorithms. This boiler-turbine control system is designed by applying genetic algorithms with reference model to the optimal determination of weighting matrices Q, R that are given by LQ regulator problem. These weighting matrices are optimized simultaneously in the search domain selected adequately. The effectiveness of this boiler-turbine control system is verified by computer simulation.

#### 1. 서 론

일반적으로 모델추종(model following)문제는 기준모델추종오차를 2차평가함수속에 포함시켜 이것을 최소화시킴으로써 모델과 플랜트의 차수가 서로 다를 경우에도 플랜트의 출력을 모델의 출력에 일치시키는 방법이다. 이를 위해 1980년대 초반까지 선형서보(servo)문제를 레귤레이터(regulator)문제로 변환함으로써 플랜트의 파라메타 변동 등에 대해서도 정상상태오차가 없는 강인한 제어 시스템을 구성하는 방법들이 제안되었다.

한편 모델 추종형 제어 시스템의 설계에 따른 적절한 가중치 행렬 Q, R의 선정은 최적의 가중치 행렬들을 선정하기 위한 다수의 방법[1, 2]들이 발표되었음에도 불구하고 실제적용상의 어려움 등으로 인하여 최근까지 시행착오적인 방법[2, 3]에 크게 의존하고 있다. 특히 N. Kawasaki와 E. Shimemura 등[1]은 극배치(pole placement)개념을 도입하여 가중치 행렬들을 조직적으로 선정하는 방법을 제시하였으나 이 역시 희망하는 특성근을 선형적으로 결정한다는 점과 다수의 리카티 방정식(Riccati equation)들을 연속적으로 풀어야 한다는 결점이 있다.

본 논문에서는 유전 알고리즘(simple genetic algorithms, SGAs)을 사용하여 복잡한 최적화의 과정없이 가중치 행렬 Q, R을 동시에 최적화함으로써 상

대변수들의 강력한 결합과 동작점의 변화에 따른 시스템의 파라메타 변동에도 불구하고 기준모델의 출력을 최적으로 추종하는 최적 모델 추종형 보일러-터빈 제어 시스템을 설계하고자 한다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 설계된 모델 추종형 보일러-터빈 제어 시스템의 유용성을 확인한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 보일러-터빈 제어 시스템

본 연구에서는 Bell과 Åström의 160MW급 화력 발전소용 보일러-터빈 시스템에 대한 선형모델들(70% 동작점, 100% 동작점 : 공칭플랜트, 130% 동작점)[4]을 사용하여 모델추종형 보일러-터빈 제어 시스템을 설계한다.

##### 2.2 모델 추종형 보일러-터빈 제어 시스템의 설계

모델추종문제는 플랜트와 기준모델로 이루어진 확대계(augmentation system)에 대하여 식(2.2.1)과 같은 선형서보문제로 생각할 수 있다. 여기서  $u_p$ 는 플랜트의 제어입력이며  $e$ 는  $e \triangleq y_m - y_p$ 로 정의되는 기준모델추종오차이다. 그리고  $y_m$ 과  $y_p$ 는 각각 기준모델과 플랜트의 출력을 나타낸다.

$$J = \int (e^T Q e + \dot{u}_p^T R \dot{u}_p) dt \quad (2.2.1)$$

또한 식(2.2.2)와 같이 상태벡터 X 및 제어입력 v를 정의하면 확대계에 대한 정상상태모델  $\dot{X} = AX + Bv$ 을 구할 수 있다. 여기서  $\dot{x}_p$ ,  $\dot{x}_m$ ,  $\dot{u}_p$ 는 각각 정상상태에서의 플랜트 및 기준모델의 상태벡터와 제어입력을 나타낸다.

$$X \triangleq \begin{bmatrix} \dot{x}_p - \hat{\dot{x}}_p \\ \dot{x}_m - \hat{\dot{x}}_m \\ e \end{bmatrix}, \quad v \triangleq \dot{u}_p - \hat{\dot{u}}_p \quad (2.2.2)$$

따라서 정상상태모델에 대한 평가함수를 식(2.2.

3)과 같이 정의하면 식(2.2.1)로 주어진 선형서보문제를 레귤레이터문제로 취급할 수 있으며 식(2.2.3)에 대한 리카티 방정식을 풀어 최적제어량  $v^*$  즉  $u_p^*$ 를 구할 수 있다.

$$J = \int (X^T \bar{Q} X + v^T R v) dt \quad (2.2.3)$$

여기서  $\bar{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q \end{bmatrix}$  이고  $Q(\geq 0)$ ,  $R(> 0)$ 은 각각

상태 및 제어입력에 대한 가중치 행렬들이다.

본 연구에서는 시스템의 응답속도 등을 고려하여 페루프 시스템이 0.1[rad/sec]정도에서 대역폭  $\omega_b$ 를 가지도록 모델 추종형 보일러-터빈 제어 시스템을 설계한다. 그리고 %오버슈트는 10%이내로 한다. 또한 설계사양에 따른 기준모델은 식(2.2.4)와 같이 제어 시스템이 최적의 응답특성을 가지도록 ITAE의 최소표준형 2차모델( $\omega_o = 0.11$ [rad/sec])로 선정하였다.

$$M_o(s) = \frac{\omega_o^2}{s^2 + 1.4 \times \omega_o s + \omega_o^2} \times I_3 \quad (2.2.4)$$

한편 보일러-터빈 제어 시스템을 설계하기 위해 공칭동작점을 기준으로 설정된 제어입력  $u_i(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$ 에 대한 제한조건(constraint)[4]은 식(2.2.5)와 같다.

$$0 \leq u_i(t) \leq 1 \quad (2.2.5)$$

여기서 모델 추종형 보일러-터빈 제어 시스템을 설계하기 위하여 위의 제한조건 및 설계사양을 고려하여 시행착오법에 의해 선정된 가중치 행렬  $Q$ ,  $R$ 은 각각 다음과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2.6)$$

## 2.3 유전 알고리즘을 이용한 최적 모델 추종형 제어 시스템의 설계

### 2.3.1 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 적자생존에 따른 확률적인 방법으로 최적해를 찾아가는 최적화 기법중의 하나이다. 유전 알고리즘의 특징 및 자세한 내용은 참고문헌[5]에 제시되어 있으므로 본 연구에서는 이를 생략한다.

### 2.3.2 가중치 행렬 $Q$ , $R$ 의 동시최적화

유전 알고리즘을 사용하여 가중치 행렬들을 동시에 최적화하기 위해 먼저 식(2.2.6)으로 주어진 가중치 행렬에 설계 파라메타  $Q_1 \sim Q_3$  및  $R_1 \sim R_3$ 를 변수로 두고 식(2.3.1)과 같이 가중치 행렬의 매개변수화를 행한다.

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \quad (2.3.1)$$

최적화를 위해 가중치 행렬에 대한 조건식( $Q \geq 0$ ,  $R > 0$ )을 고려하여 선정된 설계 파라메타의 탐색구간  $D_1 \sim D_6$ 는 각각 다음과 같다.

$$D_1 : 0 \leq L_1 = 0.001 \leq Q_1 \leq 0.1 = U_1 \quad (2.3.2)$$

$$D_2 : 0 \leq L_2 = 0.001 \leq Q_2 \leq 0.1 = U_2 \quad (2.3.3)$$

$$D_3 : 0 \leq L_3 = 0.001 \leq Q_3 \leq 20 = U_3 \quad (2.3.4)$$

$$D_4 : 0 < L_4 = 0.001 \leq R_1 \leq 10 = U_4 \quad (2.3.5)$$

$$D_5 : 0 < L_5 = 0.001 \leq R_2 \leq 10 = U_5 \quad (2.3.6)$$

$$D_6 : 0 < L_6 = 0.001 \leq R_3 \leq 10 = U_6 \quad (2.3.7)$$

최적 모델 추종형 보일러-터빈 제어 시스템을 설계하기 위해 6개의 설계 파라메타들을 하나의 문자열에 적절한 크기( $Q_{1,2,3} : m_1=m_2=8, m_3=10, R_{1,2,3} : m_4=m_5=8, m_6=10$ )의 비트(bit)수로 부호화(coding)한다. 여기서 비트수  $m_i$ 로 부호화된 임의의  $i$ 번째 파라메타  $X_i$ 에 대하여 탐색구간  $D_i$ 와의 관계식을 나타내면 식(2.3.8)과 같다. 단  $x_i$ 는  $m_i$ 의 비트수를 가지는 2진수의 현재 정수값이며  $U_i$ 와  $L_i$ 는 각각  $D_i$ 의 상·하한치이다.

$$X_i = L_i + \frac{x_i}{2^{m_i} - 1} (U_i - L_i) \quad (2.3.8)$$

한편 제어입력  $u_i(t)$ 에 대한 제한조건식 식(2.2.5)는 패널티법(penalty method)[4]에 의해 유전 알고리즘에 따른 개별문자열의 적합도(fitness)에 반영된다. 이를 위해 본 연구에서는 패널티 함수  $\phi$ 를  $\phi(h_i(x)) \triangleq h_i(x)^2$ ,  $h_i(x) \triangleq 1 - u_i(t) (\geq 0)$  or  $u_i(t) - 0 = u_i(t) (\geq 0)$ 로 정의하였다. 또한 패널티 계수  $\gamma$ 는  $10^4$ 으로 선정하였다. 여기서 시스템의 출력  $y_{ij}(k(t))$ 와 기준모델의 출력  $y_{mij}(k(t))$ 와의 차이를 기준모델추종오차  $err_{ij}(k(t)) = \text{abs}(y_{mij}(k(t)) - y_{ij}(k(t)))$ 로 하여 적합도  $fit$ 를 구하면 식(2.3.9) 및 식(2.3.10)과 같다. 단  $i, j = 1, 2, 3$ 은 각각 보일러-터빈 시스템의  $i$ 번째 입력과  $j$ 번째 출력을 나타낸다.

$$err_{fit} = \sum_{j=1}^3 [w_j \times \frac{1}{9} \times \sum_{i=1}^3 [\sum_{k=1}^{K_1} [s_j \times \sum_{t=1}^{K_2} \text{abs}(err_{ij}(k(t)))] + \gamma \times \phi(h_i(x))]] \quad (2.3.9)$$

$$fit = \frac{1}{1 + err_{fit}} \quad (2.3.10)$$

단 식(2.3.9)에서  $k(t+1) = k(t) + T_s$ ,  $k(1) = 0$ [sec]이며  $T_s (= 1.0$ [sec])는 샘플링 시간을 나타낸다. 그리고 가중치  $w_p$ 는 보일러-터빈 시스템의 동

작점의 변화에 따른 파라메타 변동을 제어 시스템의 설계시 직접 고려하기 위하여 도입하였으며 제어 시스템의 공칭성능 및 기준모델에 대한 추종성 등을 감안하여  $w_1 = 0.5, w_2 = 0.35, w_3 = 0.15$  ( $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ )로 각각 선정하였다. 여기서  $p = 1, 2, 3$ 은 각각 100%, 70%, 130% 동작점에서의 플랜트들을 의미한다. 또한 식(2.3.9)에서는 플랜트 출력의 크기(계단입력의 크기)를 고려하여 스케일링 팩터  $s_j$ 를 도입하였으며 각각의 값은  $s_1 = 1/10, s_2 = 1/20, s_3 = 1/0.1$ 이다.

### 2.4 시뮬레이션 및 비교고찰

그림 1과 그림 2는 2.3절에서의 설계 방법(방법 2, 적합도 : 0.8694)에 의해 최적화된 설계 파라메타들 ( $Q_{1,2,3} \sim R_{1,2,3} : 0.0630, 0.0574, 0.5437, 0.0257, 6.2908, 0.0997$ )을 사용하여 설계된 보일러-터빈 제어 시스템에 대한 계단응답 및 기준모델추종오차이다. 단 본 연구에서는 비교고찰의 용이성 등을 고려하여 시스템의 3번째 출력(드럼수위[m])에 대한 그림만을 제시하였다. 여기서 방법 1(적합도 : 0.7824)은 가중치 행렬에 설계 파라메타  $Q_3, R_3$ 만을 주고 이것을 최적화( $Q_3 : 2.5033, R_3 : 0.6265$ )한 경우이다. 그림들로부터 방법 2의 경우 적합도의 증가로 인한 기준모델추종오차의 감소로 인해 시스템의 과도응답특성이 시행착오법(적합도 : 0.7325) 및 방법 1에 비해서 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 유전 알고리즘을 사용하여 가중치 행렬들을 동시에 최적화함으로써 최적 모델 추종형 보일러-터빈 제어 시스템을 설계하였다. 제시된 설계 방법은 특정 파라메타만을 최적화한 경우 및 시행착오법에 비해 적합도가 높고 설계시야를 잘 만족한다. 또한 복잡한 최적화의 과정이 없으므로 보다 쉽게 실제의 제어 시스템 설계에 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

### (참 고 문 헌)

[1] N. Kawasaki, etc, "A Method for Deciding Weighting Matrices in a Linear Quadratic Regulator Problem to Locate all Poles in the Specified Region", Trans. of SICE, Vol. 17, No. 3, pp. 335-342, 1980.  
 [2] T. Takeda, etc, "An Algorithm for Determining the Weighting Matrices of the Quadratic Performance Function", Trans. of SICE, Vol. 17, No. 6, pp. 631-638, 1981.  
 [3] 金鍾植, 線形制御시스템 工學, 淸文閣, 1993.  
 [4] W. H. Kwon, etc, "Design of a Boiler-Turbine Control System Using a Modified LQG/LTR

Method", Trans. of KIEE, Vol. 39, No. 2, pp. 199-209, 1990.

[5] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

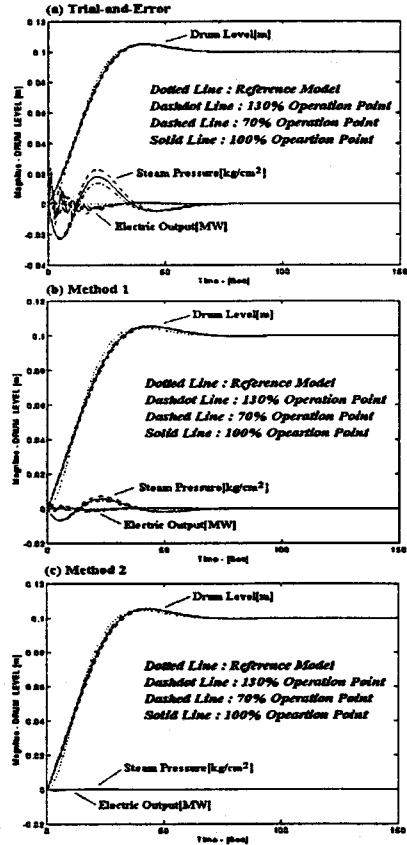


그림 1. 드럼수위[m]에 대한 계단응답

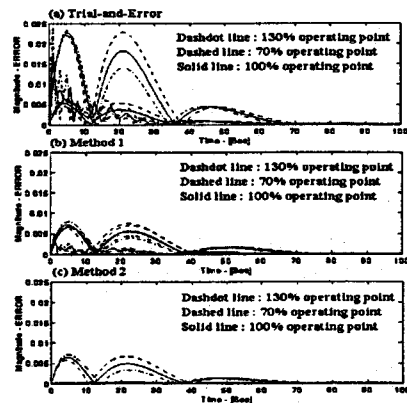


그림 2. 드럼수위[m]의 계단응답에 대한 기준모델추종오차