

유전 알고리즘 기반의 강인한 성능을 가지는 모델추종형 보일러-터빈 H^∞ 제어 시스템의 설계

황 현 준[†]

(원고접수일 : 2011년 10월 10일, 원고수정일 : 2011년 10월 28일, 심사완료일 : 2011년 11월 2일)

A Design of GA-Based Model-Following Boiler-Turbine H^∞ Control System Having Robust Performance

Hyun-Joon Hwang[†]

요 약 : 본 연구에서는 강인한 성능을 가지는 모델추종형 H^∞ 제어기의 설계법을 제시한다. 이를 위해 강인한 성능을 보장하는 해집단내에서 기준모델의 출력을 최적으로 추종하도록 유전 알고리즘을 사용하여 가중치 함수와 설계 파라미터 γ 를 동시에 최적화한다. 설계된 H^∞ 제어기는 강인한 성능에 관한 필요 충분조건식을 만족함은 물론 설계사양에 따른 만족스러운 응답특성을 가진다. 제시된 방법을 보일러-터빈 제어 시스템에 적용하여 그 유용성을 확인한다.

주제어 : 강인한 성능, 모델추종형 H^∞ 제어기, 유전 알고리즘

Abstract: This paper suggests a design method of the model-following H^∞ control system having robust performance. This H^∞ control system is designed by applying genetic algorithm(GA) with reference model to the optimal determination of weighting functions and design parameter γ that are given by Glover-Doyle algorithm which can design H^∞ controller in the state space. These weighting functions and design parameter γ are optimized simultaneously in the search domain guaranteeing the robust performance of closed-loop system. The effectiveness of this H^∞ control system is verified by applying to the boiler-turbine control system.

Key words: Model-following H^∞ control system, Robust performance, Genetic algorithm (GA)

1. 서 론

1980년대 초반 G. Zames[1]에 의해 개발된 H_∞ 제어이론은 가중치 함수(weighting function)와 설계 파라미터 γ 를 적절히 선정함으로써 주어진 설계사양을 만족하고 비구조적 불확실성(unstructured uncertainty)[2]에 대한 강인한 안정성(robust stability)[2]을 가지는 제어 시스템을 설계하는 것이다.

이러한 H_∞ 제어이론의 문제점으로 다음과 같은 두 가지를 생각할 수 있다. 첫 번째는 구조적 불확실성(structured uncertainty)[3]에 대한 강인한 성능

(robust performance)[3] 문제를 루프형상(loop-shaping)법에 기초한 기존의 방법으로는 해결할 수 없다는 것이고, 두 번째는 제어 시스템의 성능 및 안정성을 결정하는 가중치 함수 및 설계 파라미터 γ 의 선정이 대부분 시행착오적(trial-and-error)인 방법[4-5]에 크게 의존하게 되어 시스템에 따른 최적의 응답특성을 보장할 수 없다는 것이다.

일반적으로 가중치 함수 $W_1(s)$ 의 이득을 크게 하면 시스템의 성능이 향상되지만 안정성이 나빠진다. 또한 가중치 함수 $W_2(s)$ 의 이득을 크게 하면 시스템의 안정성이 향상되지만 성능이 떨어지고

[†] 교신저자(포항대학교 전기소방계열, E-mail:hwang@pohang.ar.kr, Tel: 054-245-1098)

설계 파라미터 γ 도 비슷한 특성을 가진다. 따라서 이러한 구속조건(trade-off)[6]에도 불구하고 설계사양에 따른 최적의 응답특성을 가지며 강인한 안정성은 물론 μ -합성법(μ -synthesis)[3]과 같이 복잡한 과정을 거치지 않고 간단히 강인한 성능을 보장할 수 있는 H ∞ 제어기의 설계법이 요구된다.

1970년대 초반 J. Holland에 의해 제시된 유전 알고리즘(simple genetic algorithm : SGA)[7]은 적합도(fitness)가 큰 문자열(string)을 다음 세대에 재생산함으로써 전역해를 찾아가는 최적화 기법으로 특히 다수의 변수들을 하나의 문자열로 부호화(coding)함으로써 병렬연산 및 동시최적화가 가능하다. 따라서 최근까지 많은 적용사례들[8-9]이 발표되고 있다.

본 연구에서는 동시최적화가 가능한 GA를 사용하여 가중치 함수와 설계 파라미터 γ 를 선정함으로써, 구속조건에도 불구하고 최적의 응답특성을 가지는 강인한 성능까지 보장하는 H ∞ 제어 시스템의 설계법을 제시하고자 한다. 이를 위해 강인한 성능을 보장하는 해집단(population)내에서 설계사양에 따른 기준모델(reference model)의 출력을 최적으로 추종하도록 GA를 사용하여 가중치 함수의 이득(gain) 및 동특성(dynamics) 파라미터 그리고 설계 파라미터 γ 를 동시에 최적화 한다.

제시된 모델추종형 H ∞ 제어기 설계법을 발전소 및 선박의 핵심 설비인 보일러-터빈 모델에 적용, 시뮬레이션을 통해 그 유용성을 확인한다.

2. 보일러-터빈 H ∞ 제어 시스템

H ∞ 제어기를 설계하기 위한 Bell과 Åström의 보일러-터빈 선형모델[10]은 다음과 같다. 여기서 위첨자 T는 전치(transpose)를 의미하며 상태변수 x_1, x_2, x_3 는 각각 드럼 증기압[kg/cm 2], 전기적 출력[MW], 드럼내의 유체밀도[kg/cm 3]를, 입력 u_1, u_2, u_3 는 보일러 연료 조절기의 위치, 증기 조절밸브의 위치, 급수 조절기의 위치를 나타낸다. 또한 출력 y_1, y_2, y_3 는 드럼 증기압[kg/cm 2], 전기적 출력[MW], 드럼수위[m]를 각각 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \tag{1}$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} -2.509 \times 10^{-3} & 0 & 0 \\ 6.940 \times 10^{-2} & -0.1 & 0 \\ -6.690 \times 10^{-3} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.9 & -0.349 & -0.15 \\ 0 & 14.155 & 0 \\ 0 & -1.398 & 1.659 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 6.34 \times 10^{-3} & 0 & 4.7 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.253 & 0.512 & -0.014 \end{bmatrix}$$

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T, \quad u = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T, \quad y = [y_1 \ y_2 \ y_3]^T$$

주어진 보일러-터빈 시스템은 식 (1)의 D 행렬로부터 3입력 3출력의 다변수(multivariable) 시스템 일뿐만 아니라 양의 실수부를 가지는 불안정한(unstable) 시스템으로서 제어하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 또한 시스템의 노후화 및 부하의 변동으로 인해 동작점이 변할 수 있으며 이러한 동작점의 변화는 시스템의 모델링 오차로 나타난다. 모델링 오차 $E_m(s)$ 는 공칭동작점(100%)에 대한 가변 동작점들(70% ~ 130%)[10]을 선정하여 식 (2)와 같은 곱셈형(multiplicative)모델로 나타낼 수 있다. 여기서 $G_o(s)$ 와 $G_e(s)$ 는 각각 공칭 및 가변 동작점에서의 플랜트의 전달함수행렬(TFM: Transfer Function Matrix)이다.

$$E_m(s) = [G_e(s) - G_o(s)] \times G_o^{-1}(s) \tag{2}$$

H ∞ 제어문제는 일반화 플랜트 $P(s)$ 와 제어기 $K(s)$ 로 이루어진 폐루프 시스템을 안정하게 하고 외부입력과 오차신호사이의 전달함수인 선형분수 변환식 $F_l(P, K)$ 의 H ∞ -노름을 최소화하는 제어기 $K(s)$ 를 찾는 문제가 된다. 즉 H ∞ 제어문제는 식 (3)과 같다.

$$\text{minimize } \| F_l(P, K) \|_{\infty} \tag{3}$$

여기서 $F_l(P, K) \in RH_{\infty}$ 이다. 단 RH_{∞} 는 실계수를 가지고 상태공간모델로 나타낼 수 있는 안정한 전달 함수들의 집합을 의미한다.

그런데 일반적으로 H ∞ -노름을 정확히 계산할 수

없으므로 다음과 같이 적절한 상한치 γ 를 주고 안정한 제어기 $K(s)$ 를 찾는다.

$$\|F_1(P, K)\|_{\infty} < \gamma \tag{4}$$

본 연구에서는 상태공간에서 두개의 대수 리카티 방정식을 풀어 일반화 플랜트와 같은 차수의 제어기를 조직적으로 구할 수 있는 Glover-Doyle 알고리즘[6]을 사용하여 보일러-터빈 H_{∞} 제어기를 설계하기로 한다.

설계된 보일러-터빈 H_{∞} 제어 시스템이 만족스러운 명령추종성과 강인한 안정성을 가지기 위해서는 외란과 모델링 오차가 에너지를 가지는 저주파수역 및 고주파수역에서 각각 감도(sensitivity)함수 $S(s)$ 및 상보감도(complementary sensitivity)함수 $T(s)$ 의 크기를 작게 해주어야 한다. 따라서 보일러-터빈 H_{∞} 제어 시스템에 대한 선형분수변환식 $F(P, K)$ 는 식 (5), 식 (6)과 같은 혼합감도문제(mixed sensitivity problem)로 나타낼 수 있다. 여기서 $W_1(s)$ 와 $W_2(s)$ 는 각각 외란과 모델링 오차에 의해 결정되는 감도 및 상보감도함수의 가중치 함수이다.

$$\begin{aligned} F_1(P, K) &= \begin{bmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)T(s) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)(I-S(s)) \end{bmatrix} \\ &= [P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}]w(s) \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} P_{11} &= \begin{bmatrix} W_1(s) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad P_{12} = \begin{bmatrix} -W_1(s)G_o(s) \\ W_2(s)G_o(s) \end{bmatrix} \\ P_{21} &= I, \quad P_{22} = -G_o(s) \end{aligned} \tag{6}$$

주어진 혼합감도문제를 풀어 보일러-터빈 H_{∞} 제어 시스템을 구성하기 위해서는 시스템의 충분한 해석을 통해 적절한 가중치 함수들을 선정하는 것이 중요하다. 일반적으로 가중치 함수는 외란 $D_d(s)$ 와 모델링 오차 $E_m(s)$ 에 대해 식 (7)과 식 (8)을 만족[2]하도록 모델링한다.

$$|D_d(j\omega)| \leq |W_1(j\omega)|, \text{ at low freq.} \tag{7}$$

$$|E_m(j\omega)| \leq |W_2(j\omega)|, \text{ at high freq.} \tag{8}$$

식 (2)로 주어지는 보일러-터빈 시스템의 모델링 오차 $E_m(s)$ 는 20[rad/sec]이상의 고주파수역에서 에너지를 가진다. 한편 시스템의 응답속도가 느리므로 외란의 유효주파수도 0.05[rad/sec]이하로 비교적 낮다고 가정할 수 있다. 따라서 외란 $D_d(s)$ 는 식 (9)와 같다. 여기서 I_3 는 3×3의 단위행렬(unit matrix)을 나타낸다.

$$D_d(s) = 0.02 \times \frac{1}{s} \times I_3 \tag{9}$$

본 연구에서는 루프형상법[6] 및 플랜트의 특성에 기초하여 시스템의 응답속도를 결정한다. 루프 전달함수 $L(s) (= G_o(s)K(s))$ 는 저주파역에서 $D_d(s)$ 의 이득보다 크고 고주파수역에서는 $E_m^{-1}(s)$ 의 이득보다는 작아야한다. 즉 $L(s)$ 의 이득교차 주파수(gain crossover frequency) w_c 는 외란과 모델링오차의 유효주파수사이의 적절한 값으로 결정되어야 한다. 또한 보일러-터빈 시스템은 대표적인 공정시스템(process system)으로서 응답속도가 느리다. 이 두가지 사항을 고려하여 시스템의 대역폭(bandwidth) $w_b (\cong w_c)$ 는 0.15[rad/sec](0.05 < 0.15 < 20[rad/sec]) 정도에서 값을 가지도록 보일러-터빈 H_{∞} 제어 시스템을 설계한다. 그리고 설계된 제어 시스템은 정상상태값의 10%이내에서 최대 오버슈트를 가지도록 한다. 여기서 혼합감도문제에 따른 가중치 함수의 조건식 식 (7), 식 (8) 및 위의 설계사양들을 동시에 만족하도록 여러 번의 시행착오를 거쳐 선정된 가중치 함수 $W_1(s)$, $W_2(s)$ 및 설계 파라미터 γ 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W_1(s) &= \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix} \\ &\times \frac{(s+5)}{s^2 + (0.0001 + 0.05)s + (0.0001 \times 0.05)} \in RH_{\infty} \end{aligned} \tag{10}$$

$$W_2(s) = \frac{50 \times (s+10)}{s+1000} \times I_3 \in RH_{\infty} \tag{11}$$

$$\gamma = 1.5 \tag{12}$$

3. GA를 이용한 강인한 성능을 가지는 H ∞ 제어기의 설계

3.1 유전 알고리즘의 개요

유전 알고리즘[7]은 재생산(reproduction), 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation)의 3개의 유전 연산자들을 사용하여 최적화를 행하는 최적화 기법 중의 하나이다. H ∞ 제어기를 설계할 때 유전 알고리즘의 각 단계에서 필요한 문자열의 크기(m), 해집단의 크기(n), 세대수(z) 그리고 교배 확률(P_c) 및 돌연변이 확률(P_m) 등은 경험적인 방법에 의해 적절히 선정하기로 한다. 또한 재생산은 룰렛휠(roulette-wheel) 방법을 사용하고, 단순(simple) 교배 및 돌연변이를 각각 사용한다.

3.2 강인한 성능을 위한 조건

지금까지 강인한 제어는 주로 비구조적 불확실성에 대한 안정성 측면에서 다루어져 왔으나 최근에는 강인한 안정성뿐만 아니라 구조적 불확실성에 대한 강인한 성능이 요구되고 있다. 그러나 특이치와 루프형상법에 기초한 기존의 H ∞ 제어이론으로는 강인한 성능 문제의 해결이 곤란하다. 반면에 μ -합성법은 구조적 특이치 μ 를 도입하여 시스템에 대한 μ -해석(μ -analysis)을 행한 후 D-K 반복(D-K iteration)[3]에 의해 H ∞ 제어이론과 μ -해석을 합성(synthesis)시킴으로써 강인한 성능 문제를 해결하도록 한 것이다.

한편 공칭 성능(nominal performance)[1]과 강인한 안정성을 얻기 위한 필요충분조건은 식 (13)과 식 (14)를 만족하는 것이다.

$$\|W_1(s)S(s)\|_{\infty} < 1 \tag{13}$$

$$\|W_2(s)T(s)\|_{\infty} < 1 \tag{14}$$

그런데 강인한 성능을 얻기 위해서는 불확실성을 포함하는 실제 플랜트(real plant)에 대해서도 식 (13)이 성립해야 한다. 따라서 강인한 성능을 얻기 위한 필요충분조건식은 식 (15)[2]와 같다.

$$\begin{aligned} & \left\| \frac{W_1(s)S(s)}{1 + W_2(s)T(s)} \right\|_{\infty} < 1 \text{ and} \\ & \|W_2(s)T(s)\|_{\infty} < 1 \end{aligned} \tag{15}$$

또한 제어 시스템이 강인한 성능에 관한 조건식 (15)를 만족한다는 것은 각각의 전달함수 $G_1(s) \triangleq W_1(s)S(s)[1 + W_2(s)T(s)]^{-1}$ 와 $G_2(s) \triangleq W_2(s)T(s)$ 에 대한 헤밀토니안 행렬(Hamiltonian matrix) H_{ij} ($i = 1, 2, j = 1$)의 고유치(eigenvalue) λ_{ij} ($j = 1, 2, 3, \dots; n = 12$)의 실수부 $\lambda_{ij}^R = \text{Re}[\lambda_{ij}]$ 에 대해 식 (16)[3]을 만족하는 것이다.

$$\prod_{j=1}^n \lambda_{ij}^R = \prod_{j=1}^n \text{Re}[\lambda_{ij}] \neq 0 \tag{16}$$

따라서 본 연구에서는 반복적인 H ∞ 제어기의 설계과정을 포함하는 복잡한 μ -합성법을 사용하지 않고 유전 알고리즘을 사용하여 가중치 함수와 설계 파라미터 γ 의 최적화를 행함으로써, 강인한 성능에 관한 필요충분조건식 (16)을 만족함은 물론 설계사양에 따른 기준모델의 응답특성을 잘 추종하는 강인한 성능을 가지는 H ∞ 제어 시스템을 설계하고자 한다.

3.3 강인한 성능을 가지는 보일러-터빈 H ∞ 제어기의 설계

유전 알고리즘을 사용하여 강인한 성능을 가지는 모델추종형 보일러-터빈 H ∞ 제어 시스템을 설계하기 위하여 먼저 강인한 성능을 보장하는 해집단내에서 식 (10) ~ 식 (12)로 주어지는 가중치 함수와 설계 파라미터 γ 를 동시에 최적화하여야 한다. 이를 위해 주어진 가중치 함수에 크기와 형태를 결정하는 이득 및 동특성 파라미터를 변수로 주고 식 (17) 및 식 (18)과 같이 가중치 함수의 매개변수화를 행한다. 여기서 $g_{w11} \sim g_{w13}$, g_{w2} 와 $p_{w1} \sim p_{w3}$ 는 각각 가중치 함수 $W_1(s)$ 와 $W_2(s)$ 의 이득 및 동특성 파라미터들을 나타낸다.

$$\begin{aligned} W_1(s) = & \begin{bmatrix} g_{w11} & 0 & 0 \\ 0 & g_{w12} & 0 \\ 0 & 0 & g_{w13} \end{bmatrix} \\ & \times \frac{(s + p_{w1})}{s^2 + (0.0001 + p_{w2})s + (0.0001 \times p_{w2})} \end{aligned} \tag{17}$$

$$W_2(s) = \frac{g_{w2} \times (s + p_{w3})}{s + 100 \times p_{w3}} \times I_3 \tag{18}$$

여기서 각각의 탐색구간(search domain) D_1 과 D_2 는 식 (19) 및 식 (20)과 같이 선정하였으며 특히 하한치 L_1 과 L_2 는 식 (7)과 식 (8)을 만족하도록 결정하였다.

$$D_1: L_1 = 0.0005 \leq g_{wi} \leq 0.01 = U_1 \quad (19)$$

$$D_2: L_2 = 30 \leq g_{w2} \leq 100 = U_2 \quad (20)$$

설계 파라미터 γ 에 대한 탐색구간 D_3 는 식 (21)과 같다.

$$D_3: L_3 = 0.5 \leq \gamma \leq 3 = U_3 \quad (21)$$

또한 동특성 파라미터 p_{w1} , p_{w2} , p_{w3} 의 탐색구간 $D_4 \sim D_6$ 는 식 (22) ~ 식 (24)와 같다.

$$D_4: L_4 = 0.1 \leq p_{w1} \leq 10 = U_4 \quad (22)$$

$$D_5: L_5 = 0.01 \leq p_{w2} \leq 0.5 = U_5 \quad (23)$$

$$D_6: L_6 = 0.1 \leq p_{w3} \leq 20 = U_6 \quad (24)$$

가중치 함수의 이득, 동특성 파라미터 및 γ 를 동시에 최적화하기 위해 이들 8개의 변수를 그림 1과 같이 하나의 문자열에 적절한 크기(m_i , $i = 1, 2, \dots, 8$)의 비트(bit)수로 부호화한다.

g_{w11}	g_{w12}	g_{w13}	g_{w2}	γ	p_{w1}	p_{w2}	p_{w3}
00101	11000	11011	10100	101100	0100110	1101100	1000100
$m_1=5$	$m_2=5$	$m_3=5$	$m_4=5$	$m_5=6$	$m_6=7$	$m_7=7$	$m_8=7$ bits
$m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7 + m_8 = 47$ bits							

Figure 1: Coding of gain, dynamics parameters and γ

여기서 비트수 m_i 로 부호화된 임의의 i 번째 파라미터 X_i 에 대하여 탐색구간 D_i 와의 관계식을 유도하면 식 (25)와 같다.

$$X_i = L_i + \frac{x_i}{2^{m_i-1}} (U_i - L_i) \quad (25)$$

단 x_i 는 m_i 의 비트수를 가지는 2진수의 현재 정수 값이며 D_i 의 상·하한치는 각각 U_i 와 L_i 이다. 따라서 탐색구간 D_i 는 $(2^{m_i} - 1)$ 개로 분할되고 비트수 m_i 는 탐색의 정밀도(resolution)을 나타내게 된다.

본 연구에서는 보일러-터빈 H_∞ 제어 시스템이 설계사양에 따른 최적의 명령추종성을 가지도록

식(26)과 같이 적절한 기준모델(reference model)을 선정 후 그림 2과 같이 유전알고리즘을 사용하여 플랜트의 출력이 기준모델의 출력을 추종하도록 하였다. 기준모델은 최적의 명령추종성 및 설계사양에 따른 시스템의 응답속도 등을 고려하여 대역폭 w_b 가 $0.15[\text{rad/sec}] (\cong w_c = 0.15[\text{rad/sec}])$ 정도이며 오버슈트가 없는 1차 모델로 선정하였다.

$$M_o(s) = \frac{0.15}{s + 0.15} \times I_3 \quad (26)$$

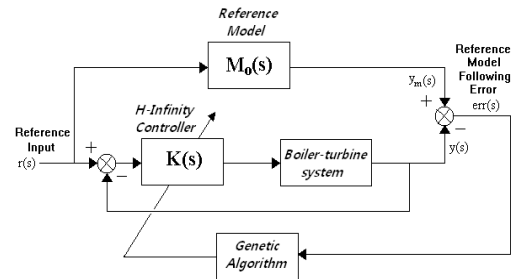


Figure 2: Model-following H_∞ control system using GA

또한 시스템의 출력 $y_{ij}(k(t))$ 와 기준모델의 출력 $y_{mij}(k(t))$ 와의 차이를 기준모델 추종오차 $err_{ij}(k(t)) = \text{abs}(y_{mij}(k(t)) - y_{ij}(k(t)))$ 로 하여 적합도 fit 를 구하면 식(27) 및 식(28)과 같다. 단 $\text{abs}(\cdot)$ 는 절대값을, $i, j = 1, 2, 3$ 은 각각 i 번째 입력과 j 번째 출력을 나타낸다. 여기서 $k(t+1) = k(t) + T_s$, $k(1) = 0[\text{sec}]$ 이며 $T_s = 5[\text{sec}]$ 는 샘플링 시간을 나타낸다.

$$err_{fit} = \frac{1}{9} \times \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (\sum_{k=1}^{21} \text{abs}(err_{ij}(k(t))))$$

$$= \frac{1}{9} \times \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (\sum_{k=1}^{21} \text{abs}(y_{mij}(k(t)) - y_{ij}(k(t)))) \quad (27)$$

$$fit = \frac{1}{1 + err_{fit}} \quad (28)$$

한편 식 (28)로부터 적합도 fit 는 기준모델추종오차 err_{fit} 의 역수로 정의되어 있으므로 설계결과 적합도가 높을수록 기준모델에 보다 최적으로 추종하고 설계사양(오버슈트 및 응답속도)을 잘 만족시킨다.

모델추종형 보일러-터빈 H ∞ 제어 시스템을 구성하기 위한 설계 순서는 다음과 같다.

- Step 1: 가중치 함수에 식 (17), 식 (18)과 같이 적절한 이득 및 동특성 파라미터를 준다.
- Step 2: 설계 파라미터 γ 를 포함한 각각의 탐색구간 D_i 를 결정한다.
- Step 3: 유전 알고리즘에 의해 파라미터의 집합 $\Phi \Leftarrow [g_{w11}, g_{w12}, g_{w13}, g_{w2}, \gamma, p_{w1}, p_{w2}, p_{w3}]$ 를 계산한다.
- Step 4: 주어진 파라미터의 집합 Φ 와 Glover-Doyle 알고리즘을 사용하여 H ∞ 제어를 설계한다.
- Step 5: 설계된 H ∞ 제어 시스템이 강인한 성능을 위한 조건식(16)을 만족하는지 조사한다. 만족시키면 식(28)을 사용하여 적합도를 계산하고 그렇지 않으면 적합도를 0으로 한다.
- Step 6: 설정된 세대수만큼 Step 3에서 Step 5의 과정을 반복한다.

4. 시뮬레이션 및 비교고찰

본 장에서는 3장에서 제시한 설계 순서에 따라 강인한 성능을 가지는 보일러-터빈 H ∞ 제어를 설계하고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 비교고찰한다. 유전 알고리즘에서 사용된 파라미터들과 적합도는 표 1과 같고 이에 따라 선정된 가중치 함수의 이득, 동특성 파라미터 그리고 설계 파라미터 γ 와 강인한 성능을 위한 필요충분조건식 (16)의 결과는 표 2와 같다.

Table 1: Parameters in GA and fitness

	m	n	z	P_c	P_m	err_{fit}	fit
Trial-&-Error	-	-	-	-	-	0.3238	0.7554
Proposed method	47	20	100	0.7	0.03	0.0957	0.9127

Table 2: Design parameters and condition for robust performance

	g_{w11}	g_{w12}	g_{w13}	g_{w2}	γ	p_{w1}	p_{w2}	p_{w3}	$\Pi_1^{A,B} (\neq 0)$
Trial-&-Error	0.001	0.001	0.001	50	1.5	5	0.05	10	-
Proposed method	0.0053	0.0059	0.0097	62.2581	1.8889	4.6992	0.2646	10.2850	$G_1(s): 1.4418e5$ $G_2(s): 1.4428e5$

표 1로부터 3장에서 제시된 설계 방법이 2장에서의 시행착오적인 방법보다 상대적으로 높은 적

합도를 가짐을 알 수 있다. 또한 표 2로부터 설계된 보일러-터빈 H ∞ 제어 시스템은 식 (16)의 강인한 성능을 위한 필요충분조건식을 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

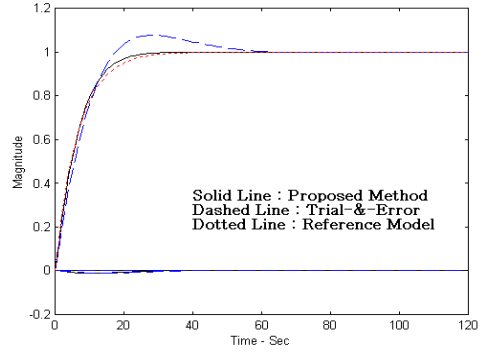


Figure 4: Step responses of output 1(steam pressure)

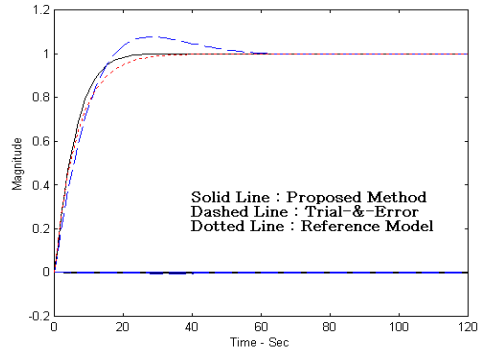


Figure 5: Step responses of output 2(electric output)

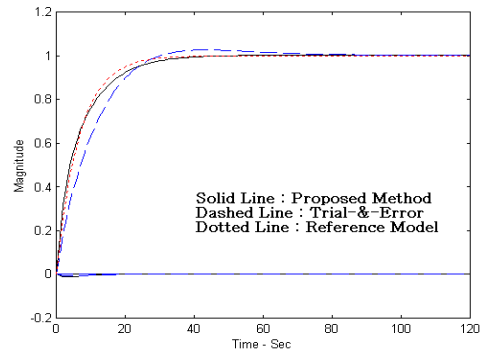


Figure 6: Step responses of output 3(drum level)

그림 4 ~ 그림 6은 3장에서 설계된 다변수 보일러-터빈 H ∞ 제어 시스템의 3개의 출력(y_1 :드럼 증

기압[kg/cm^2], y_2 :전기적 출력[MW], y_3 :드럼수위[m])에 대한 스텝응답을 2장의 시행착오법의 결과와 함께 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 제시된 방법($fit = 0.9127$)이 2장의 시행착오적인 방법($fit = 0.7554$)보다 설계사양에 따른 기준모델의 출력에 보다 잘 추종하며 만족스러운 응답특성을 가짐을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유전 알고리즘을 사용하여 강인한 성능을 가지는 해집단내에서 기준모델의 출력을 최적으로 추종하도록 모델추종형 H_∞ 제어기의 설계법을 제시하고 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 확인하였다.

설계된 H_∞ 제어 시스템(적합도: 0.9127)은 오버슈트(10% 이내)와 상승시간(대역폭:0.15[rad/sec])이 설계사양을 만족함은 물론 시행착오법(적합도: 0.7554)에 비해 기준모델의 출력을 보다 잘 추종한다. 또한 제시된 설계방법은 μ -합성법에 비해 복잡한 최적화의 과정이 없으므로 비교적 쉽게 실제 보일러-터빈 제어 시스템 설계에도 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] G. Zames, "Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate Inverses", Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. 26, no. 2, pp. 301-320, 1981.
- [2] J. C. Doyle, B. A. Francis and A. R. Tannenbaum, Feedback Control Theory, Dover, 2009.
- [3] D. W. Gu, P. H. Petkov and M. M. Konstantinov, Robust Control Design with Matlab, Springer, 2005.
- [4] Y. Suozhong, Y. Yidong, "Design of automatic carrier landing system using H_∞ control", Intelligent Control and Automation Conference, Proceedings on, vol. 5, no. 28, pp. 3449-3451, 2000.

- [5] R. Fales and A. Kelkar, "Robust control design for a wheel loader using mixed sensitivity H-infinity and feedback linearization based methods," American Control Conference, Proceedings on, Vol. 6, pp. 4381-4386, 2005.
- [6] J. M. Maciejowski, Multivariable Feedback Design, Addison-Wesley, 1989.
- [7] S. N. Sivanandam, Introduction to Genetic Algorithms, Springer, 2007.
- [8] I. Kitsios and T. Pimenides, "Structured specified robust multivariable controller design for practical applications using genetic algorithms", Control Theory and Applications Conference, Proceedings on, vol. 150, no. 3, pp. 317-323, 2003.
- [9] S. C. Duong, H. Kinjo, E. Uezato and T. Yamamoto, "A switch controller design for the acrobot using neural network and genetic algorithm", Control, Automation, Robotics and Vision Conference, Proceedings on, pp. 1540-1544, 2008.
- [10] W. H. Kwon, S. W. Kim, P. G. Park and E. K. Kim, "Design of a boiler-turbine control system using a modified LGQ/LTR method", KIEE Transactions on, vol. 39, no. 2, pp. 199-209, 1990.

저 자 소 개



황현준(黃現俊)

1992년 부산대학교 전기공학과 (공학사), 1995년 부산대학교 전기공학과(공학석사), 1999년 부산대학교 전기공학과(공학박사), 1998년 - 현재 포항대학교 전기소방계열(부교수), 관심분야: 강인제어, 유전알고리즘