

화력발전소에서 과열저감기의 증기온도제어

(Steam Temperature Control of Attemperator in Thermal Power Plant)

신휘범*

(Hwi-Beom Shin)

Abstract

An attemperator is a part of the 4-stage superheater in the boiler system of the thermal power plant. The attemperator receives the over-heated steam and makes the steam with proper temperature by adjusting the control valve of the cold steam. In this paper, the attemperator is modeled considering physical point of view and the linearized model is derived for the control purpose. To overcome the integral windup phenomenon due to the opening limitation of the control valve, an anti-windup PI controller is proposed to the attemperator and compared with the PI controller operated in the thermal power plant in view of control performance.

Key Words : Thermal Power Plant, Boiler, Attemperator, Anti-Windup PI Control

1. 서 론

화력발전소의 보일러 시스템은 시변 비선형 특성을 지니는 여러 장치들이 매우 밀접하게 연관되어 동작하는 복잡한 계통이다. 보일러의 역할은 발전기가 연결된 터빈을 회전시키기 위한 고온, 고압의 증기를 발생하는 것이다. 과열기는 수분을 포함한 습증기를 입력으로 받아 수분을 증발시키고 온도를 더 높여 과열 증기로 만드는 장치이다. 과열증기의 온도제어는 일차로 보일러의 연료로 인가한 석탄의 열량에 의해 증기의 온도를 원하는 값 이상으로 상승시키고, 과열저

감기에서 분사되는 낮은 온도의 증기의 양을 조절하여 증기 온도를 원하는 값으로 떨어뜨려 일정하게 유지하는 것을 목적으로 하고 있다. 과열기의 정격온도 유지는 발전소 효율과 밀접한 관계가 있는데 설계치보다 높을 경우 효율은 증가하나 과열기, 터빈 재질의 열응력 발생으로 보일러의 수명 단축과 손상의 원인이 된다. 또한 정격 이하의 온도로 운전 할 경우 효율 감소뿐만 아니라 증기의 질 저하로 인하여 터빈 회전 날개의 침식 유발 등의 문제가 발생한다[1-2].

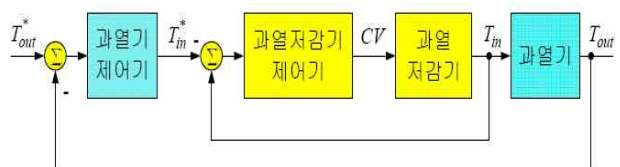


그림 1. 과열기의 온도 제어 시스템
 Fig. 1. Temperature control system of superheater

* 주저자 : 경상대학교 전기공학과 교수
 Tel : 055-772-1716, Fax : 055-772-1719
 E-mail : hbshin@gnu.ac.kr
 접수일자 : 2011년 4월 3일
 1차심사 : 2011년 4월 13일, 1차심사 : 2011년 6월 8일
 심사완료 : 2011년 6월 14일

과열기의 증기 온도제어는 그림 1과 같이 cascade 제어 형태로 구성된다. 내부에 과열저감기와 제어기가 있고 외부 루프에 과열기와 제어기가 있다. 최종 제어변수는 과열기를 거친 증기의 온도이다. 명령 값과 비교하여 오차를 구하고, 이를 PI 제어기에 통과시켜 과열기에 입력되는 증기 온도에 대한 명령 값을 만든다. 과열기에 입력되는 증기 온도는 측정되어 명령 값과 비교하여 PI 제어기에 의해 과열저감기의 스프레이 증기 유량 또는 스프레이 제어밸브의 개도 CV를 발생한다. 여기서 내부 제어루프를 과열저감기 제어 루프라 하고, 외부 제어루프를 과열기 제어루프라 부른다.

일반적으로 내부 루프의 동특성이 외부 루프보다 빠르고, 이전 단의 과열기로부터 발생한 외란을 저감시킨다. 외부 루프는 과열저감기 이후에 발생한 외란을 저감하는데 사용한다. 과열저감기의 특징은 이전 과열기의 증기 온도를 낮출 수만 있고, 스프레이 제어밸브의 개도가 0~100[%]로 제한된다. PI 제어기를 사용한 경우 과도한 발전소 MW 출력 변동이나 외란에 의해 적분 windup 현상이 발생하여 과도상태가 오래 지속되고, 기준 온도로부터 크게 벗어나 긴 시간 동안 맥동이 발생하고, 심할 경우 보일러 계통에 난조가 발생할 수 있다[3-4].

본 논문에서는 과열저감기를 재조명하여 물리적으로 의미가 있는 모델을 유도하고, anti-windup PI제어 알고리즘을 제안하고, 과열저감기의 온도제어에 적합하도록 설계하여 제어 성능을 향상시키고자 한다. 태안화력발전소 6호기의 운전 데이터를 기반으로 Matlab을 통해 시뮬레이션하여 현재 운용하고 있는 PI제어기와 제안한 anti-windup PI제어기에 의한 과열저감기 온도제어의 성능을 비교한다.

2. 과열저감기 모델링

2.1 과열저감기 모델

과열저감기는 그림 1에서처럼 이전 과열기에 의해 과도하게 높아진 과열증기의 온도를, 대상 과열기의 입력 과열증기 온도가 원하는 값을 갖도록 낮은 온도

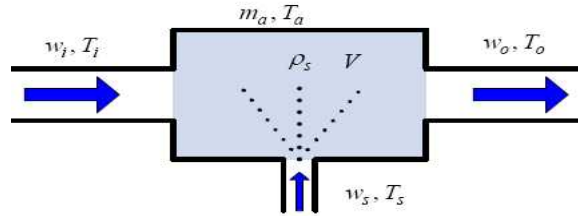


그림 2. 과열저감기 모델
Fig. 2. Attemperator model

의 증기를 쏘아 낮추는 역할을 한다. 그림 2를 참고하여 질량 평형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} [\rho_s V] = w_i + w_s - w_o \quad (1)$$

여기서 ρ_s 는 증기 밀도[kg/m³]이고, V 는 과열저감기의 부피[m³]이다. w_i 와 w_o 는 과열저감기의 입력 및 출력 증기 유량을 나타내고, w_s 는 스프레이 증기 유량이고, 단위는 [kg/s]이다. 열평형은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{dt} [\rho_s \mu_s V + m_a C_a T_a] = w_i h_i + w_s h_s - w_o h_o \quad (2)$$

m_a , C_a 및 T_a 는 과열저감기 몸체의 질량, 비열 상수 및 온도를 각각 나타낸다. h_i , h_o 및 h_s 는 입력되는 증기, 출력되는 증기 및 스프레이 증기의 엔탈피를 각각 나타내고, 단위는 kJ/kg이다. μ_s 는 과열저감기 증기의 내부에너지를 나타내며, 관계식 $\mu = h - p/\rho$ 을 이용하여 위 식을 다시 쓰면 다음과 같다[1-2].

$$h_o V \frac{d\rho_s}{dt} + \rho_s V \frac{dh_o}{dt} - V \frac{dp}{dt} + \frac{d}{dt} [m_a C_a T_a] = w_i h_i + w_s h_s - w_o h_o \quad (3)$$

여기서 p 는 증기 압력을 나타낸다. 식 (1)에 h_o 를 곱하고 식 (2)에서 빼면 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\rho_s V \frac{dh_o}{dt} - V \frac{dp}{dt} + \frac{d}{dt} [m_a C_a T_a] = w_i h_i + w_s h_s - (w_i + w_s) h_o \quad (4)$$

엔탈피와 비열 상수의 관계 $h = C_p T$ 를 이용하여 위 식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho_s V C_o \frac{dT_o}{dt} = -(w_i + w_s) C_o T_o + w_i C_i T_i + w_s C_s T_s + V \frac{dp}{dt} - \frac{d}{dt} [m_a C_a T_a] \quad (5)$$

C_i , C_o 및 C_s 는 과열저감기에 입력되는 증기, 출력되는 증기 및 스프레이 물의 비열 상수[kJ/kg·K]를 나타낸다. T_s 는 스프레이의 온도[°C]이고, C_s 의 값은 거의 일정하다. 출력 증기의 비열 상수 C_o 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_o = \frac{C_i w_i + C_s w_s}{w_i + w_s} \quad (6)$$

과열저감기 몸체로 전달되는 열 흐름은 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} [m_a C_a T_a] = k_a (T_i - T_a) \quad (7)$$

여기서 T_a 는 과열저감기 몸체의 온도[°C]를 나타낸다. 따라서 식 (6)과 (7)을 식 (5)에 대입하면 과열저감기 출구 온도의 동특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_s V C_o \frac{dT_o}{dt} = -C_i w_i T_o + (C_s T_s - C_o T_o) w_s + (C_i w_i - k_a) T_i + k_a T_a + V \frac{dp}{dt} \quad (8)$$

위 식의 왼쪽 항의 계수는 과열저감기 내에 존재하는 증기의 비열 질량으로 과열저감기로 들어오는 입력 증기 유량과 스프레이 유량의 향으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_{eq} = \rho_s V C_o = k_m (w_i + w_s) \quad (9)$$

따라서 과열저감기 출구 온도의 동특성은 다음과 같다.

$$m_{eq} \frac{dT_o}{dt} = -C_i w_i T_o + (C_s T_s - C_o T_o) w_s + (C_i w_i - k_a) T_i + k_a T_a + V \frac{dp}{dt} \quad (10)$$

과열저감기의 출구 온도는 위 식에서처럼 스프레이 유량 w_s 로 제어되고, 증기의 온도를 낮출 수만 있다. 측정 가능한 변수는 T_i, T_o, w_i, w_s, p 이다.

다음은 스프레이 유량과 과열저감기의 스프레이 밸브 개도와의 관계를 유도한다. 과열기의 배관은 2개의 병렬로 구성되어 있고, 2개의 과열저감기로 과열기 입구 증기 온도를 각각 제어한다. 두 과열저감기로 입력되는 스프레이 유량 w_{st} 는 두 밸브의 개도와 스프레이와 과열 증기의 압력차에 의해 다음과 같이 결정된다고 볼 수 있다.

$$w_{st} = k_v (p_s - p) (CVA + CVB) \quad (11)$$

여기서 p_s 는 스프레이 증기 압력[kgf/m²]이고, CVA와 CVB는 2개의 과열저감기 개도[%]이다. 한 과열저감기로 입력되는 스프레이 유량은 상대적인 개도에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_s = \frac{CVA}{CVA + CVB} w_{st} \quad (12)$$

따라서 한 과열저감기로 입력되는 스프레이 유량은 개도에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_s = k_v (p_s - p) CVA \quad (13)$$

2.2 과열저감기 선형화 모델

과열저감기의 출구 온도는 식 (10)에서처럼 비선형 시스템으로 스프레이 유량 w_s 로 제어되고, 과열 증기 온도를 낮출 수만 있다. 주요 변수에 대해 위의 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$m_{eq} \frac{dT_o}{dt} = -C_i w_i T_o - (C_o T_o - C_s T_s) w_s + \kappa(T_i, T_a, p) \quad (14)$$

여기서

$$\kappa(T_i, T_a, p) = (C_i w_i - k_a) T_i + k_a T_a + V \frac{dp}{dt} \quad (15)$$

이고, 외란으로 볼 수 있다. 외란의 주요 항은 증기 입력 온도와 유량이다. 출구온도 동특성은 비선형이므로 다음과 같이 한 동작점에 대해 미소 변동을 주어 선형화할 수 있다.

$$m_{eq}(\dot{T}_o + \Delta \dot{T}_o) = -C_i(w_i + \Delta w_i)(T_o + \Delta T_o) - (C_o(T_o + \Delta T_o) - C_s T_s)(w_s + \Delta w_s) + \kappa + \Delta \kappa \quad (16)$$

이차항을 무시하고 한 동작점에서 다음과 같은 선형 모델을 얻을 수 있다.

$$m_{eq} \Delta \dot{T}_o = -(C_i w_i + C_o w_s) \Delta T_o - (C_o T_o - C_s T_s) \Delta w_s + \Delta \nu \quad (17)$$

여기서

$$\Delta \nu = -C_i T_o \Delta w_i + \Delta \kappa \quad (18)$$

이다.

과열저감기로 입력되는 스프레이 유량 w_s 와 개도 CVA에 대한 식 (13)을 한 동작점에 대해 미소 변동을 주어 선형화하면 다음과 같다.

$$\Delta w_s = k_v(p_s - p) \Delta CVA + k_o CVA(\Delta p_s - \Delta p) \quad (18)$$

밸브 개도 입력에 대한 과열저감기 출구온도의 동특성은 식 (17)과 (18)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_{eq} \Delta \dot{T}_o = -(C_i w_i + C_o w_s) \Delta T_o - (C_o T_o - C_s T_s) k_v(p_s - p) \Delta CVA + \Delta d \quad (19)$$

여기서

$$\Delta d = \Delta \nu + (C_o T_o - C_s T_s) k_v(\Delta p_s - \Delta p) CVA \quad (20)$$

이다. 이 식을 선형 일차시스템으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{y} = -ay - bv + d \quad (21)$$

여기서

$$a = (C_i w_i + C_o w_s) / m_{eq} \quad (22)$$

$$b = (C_o T_o - C_s T_s) k_v(p_s - p) / m_{eq} \quad (23)$$

$$d = (C_o T_o - C_s T_s) k_v(\Delta p_s - \Delta p) CVA / m_{eq} + \Delta \nu \quad (24)$$

이다. 출력 y 는 과열저감기 출구증기 온도[°C]이고, 제어 입력 v 는 밸브 개도[%]로 다음의 제한을 갖는다.

$$v = \begin{cases} 100 & \text{if } u > 100 \\ u & \text{if } 0 \leq u \leq 100 \\ 0 & \text{if } u < 0 \end{cases} \quad (25)$$

여기서 u 는 PI제어기의 출력을 나타낸다. 제어기 출력과 구동기 출력이 같으면 PI제어기는 선형영역에서 동작하고, 다르면 포화영역에서 동작한다.

3. 과열저감기의 증기온도제어

그림 3은 PI제어기가 적용된 과열저감기의 제어 블록선도를 나타낸다. 식 (21)의 모델에서 입력 계수가 음이므로 출구온도를 음의 궤환으로 하면 전체적으로 양의 궤환이 되어 불안정해지므로 출구온도를 양으로 궤환한다. 출구온도 오차를 만들기 위해 출구온도 명령을 음으로 입력한다. PI 이득은 출력 전력에 따라 조절된다.

제안한 anti-windup PI제어기는 다음 식으로 표현할 수 있다[5-8].

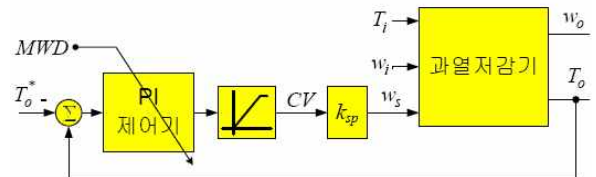


그림 3. 과열저감기의 온도제어 블록선도
Fig. 3. Control block diagram of attemperator

$$u = k_p e + k_i q \quad (26)$$

여기서 k_p , k_i 는 비례 및 적분제어 이득을 각각 나타내고, 오차 e 는 $e = y - y^*$ 이고, y^* 는 명령 또는 기준 값이다. 적분 상태 q 는 다음과 같다.

$$\dot{q} = \begin{cases} e & \text{if } u = v \\ \omega_i(\hat{q}_{ss} - q) & \text{if } u \neq v \end{cases} \quad (27)$$

여기서 \hat{q}_{ss} 은 적분 상태의 정상상태를 예측한 값을 나타내며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{q}_{ss} = \frac{1}{bk_i} \{e + ae + bv\} \quad (28)$$

그림 4는 제안한 적분상태 예측기를 갖는 anti-windup PI제어기를 나타낸다. PI제어기가 선형영역에서 동작하면 PI제어기의 적분기는 출력오차를 적분하여 일반 PI제어를 수행한다. 한편 포화영역에서 동작하면 적분상태가 예측한 적분상태의 값으로 초기화된다. 이때 예측 오차에 존재하는 잡음을 줄이고 갑작스런 적분상태 변화를 방지하기 위해 저역통과필터를 사용한다. 적분기 초기화 동특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

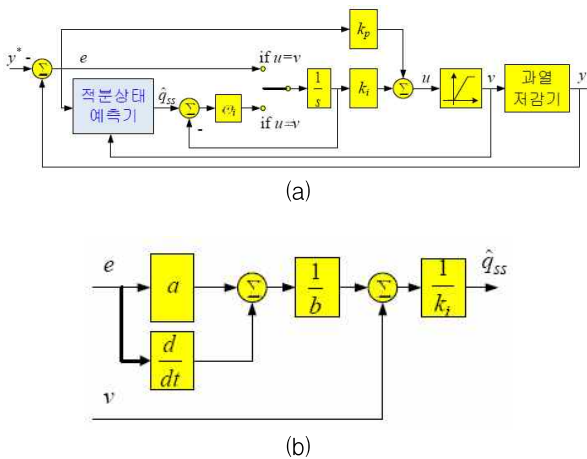


그림 4. (a) 제안한 anti-windup PI제어기, (b) 적분상태 예측기
 Fig. 4. (a) Proposed anti-windup PI controller, (b) integral state predictor

$$\frac{q(s)}{\hat{q}_{ss}(s)} = \frac{1}{s/\omega_i + 1} \quad (29)$$

적분기 초기화 시간은 저역통과필터의 대역폭 ω_i 를 조절하여 결정할 수 있다. 일반적으로 대역폭은 PI제어시스템의 대역폭보다 매우 넓게 설정한다.

4. 과열저감기의 PI제어기 성능 비교

태안화력발전소의 운전 데이터를 과열저감기 모델과 연결하여 현재 운영하고 있는 과열저감기의 PI제어기와 제안한 anti-windup PI제어기의 성능을 비교한다. 운전 데이터는 다음의 두 종류를 대상으로 한다.

- (1) 500[MW]에서 260[MW]로 출력이 하강한 경우
 - 2009년 6월 20일 04 : 36 : 00 ~ 12 : 56 : 00, 1초 샘플링
 - 전력 명령이 계단 명령과 비슷함
- (2) 260[MW]에서 500[MW]로 출력이 상승한 경우
 - 2009년 6월 22일 10 : 47 : 00 ~ 19 : 07 : 00, 1초 샘플링
 - 전력 명령이 ramp 명령과 비슷함

다음의 2개의 지수로 제어기의 성능을 비교한다.

- (1) 출구온도 침두-침두 오차(e_{pk-pk})
 - 명령 값이 변하여 발생하는 과도상태 구간에서 침두-침두 값
- (2) 출구온도 실효치 오차(e_{rms})
 - 정상상태 및 과도 상태를 포함한 온도 오차의 실효치

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t e^2 d\tau} \quad (30)$$

그림 5는 전력요구 명령이 260[MW]에서 500[MW]로 ramp형태로 상승할 때 과열기 및 과열저감기의 주요 운전 데이터를 나타낸다. MWD의 과형과 유사하게 증기 입력, 스프레이 압력, 연료 유량, 증기 유량 등이 변한다. 과열기 제어기의 최종 목표는 전력 명령이 변하여 주요 변수도 같이 변함에도 불구하고 과열기 출구온도를 원하는 기준 값으로 유지하는 것이다.

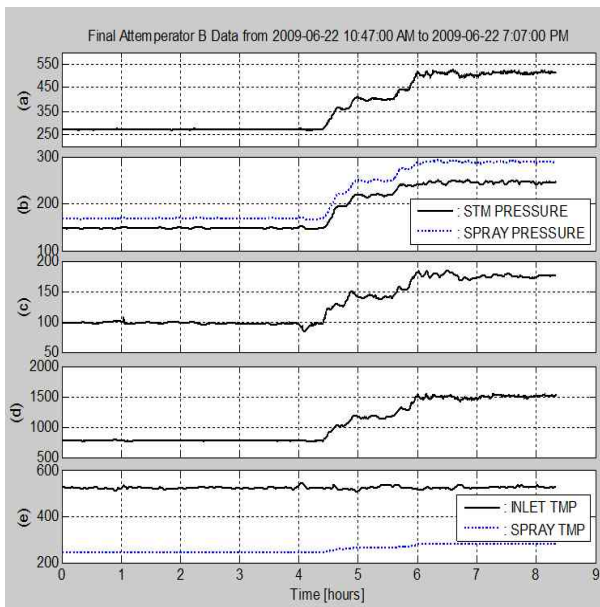


그림 5. 260[MW]에서 500[MW]로 변한 경우 과열저감기의 운전 데이터, (a) 전력 명령[MW], (b) 주증기 및 스프레이 압력[kgf/cm²], (c) 연료 유량[T/h], (d) 증기 유량[T/h], (e) 입구 및 스프레이 온도[°C]

Fig. 5. Operating data of attemperator during ramp-up of MW demand, (a) MWD[MW], (b) steam and spray pressure[kgf/cm²], (c) fuel flow[T/h], (d) steam flow[T/h], (e) inlet and spray temperature[°C]

전력 명령이 ramp 형태로 변하여 과열저감기에 대한 외란 또한 ramp 형태로 변하므로 외란에 의한 충격이 작아 PI 제어기의 출력이 상한 값 또는 하한 값의 제한에 걸리지 않을 가능성이 높다.

그림 6은 그림 5의 운전 데이터를 기반으로 과열저감기의 제어를 현재 운용 중인 PI 제어기로 제어한 경우의 응답 특성을 나타낸다. 초기 과도구간은 수동 모드에서 자동모드로 전환하는 구간으로 볼 수 있다. 이 구간에서 과열기 PI 제어기는 과열기 입구 온도 명령의 제한 값이 설정되는데 시간이 걸린다. 따라서 이 구간에서 과열기 PI 제어기의 제어 입력이 그림 6 (c) 처럼 제한에 걸린다. 따라서 적분상태가 그림 6 (d) 처럼 초기에 크게 증가한다. 이로 인해 출구온도가 그림 6 (b) 처럼 초기 30분 동안 적분 windup 현상이 발생한다.

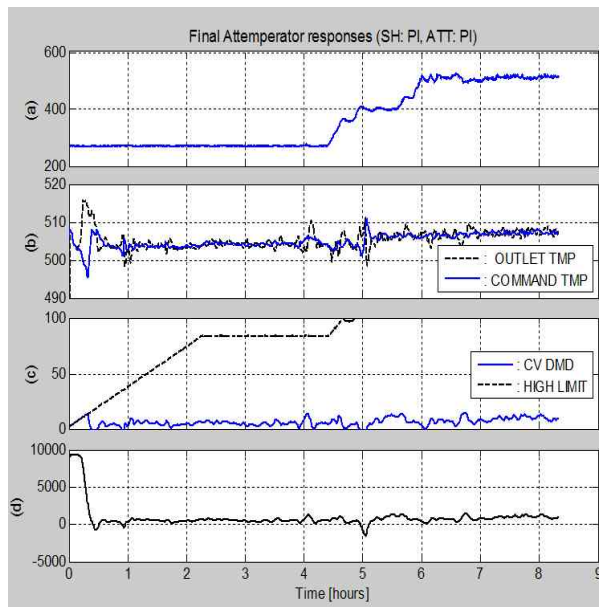


그림 6. 260[MW]에서 500[MW]로 변한 경우 과열저감기의 PI 제어기 응답, (a) 전력 명령[MW], (b) 출구온도 명령 및 출구온도[°C], (c) 밸브 개도 명령 및 명령 제한[%], (d) PI 제어기의 적분 상태

Fig. 6. Responses of attemperator with PI controller during ramp-up of MW demand, (a) MWD [MW], (b) command and output temperatures[°C], (c) CV opening command and saturation limit[%], (d) integral state of PI control

약 4시간 20분부터 1시간 40분 동안 전력이 상승하여 이 기간 동안 과도상태가 존재하고, 나머지 구간은 정상상태로 볼 수 있다. 전력명령 변화는 ramp 형태로 변하여 명령 변화에 의한 과도구간에서 과열저감기 PI 제어기에 의한 밸브개도 명령이 그림 6 (c)와 같이 제한 값에 걸릴 가능성은 작다. 따라서 ramp 형태의 전력명령 상승의 경우 PI 제어기 응답은 선형영역에서 동작할 확률이 높다. 출구온도 실효치 오차는 1.25[°C], 명령 변화 과도상태에서 출구온도 침두-침두 오차는 10[°C]이다.

그림 7은 그림 5의 운전 데이터를 기반으로 제안한 anti-windup PI 제어기로 제어한 경우의 응답 특성을 나타낸다. 초기 모드전환 구간에서 anti-windup PI 제어기의 밸브개도가 상한 값에 걸리지만 그림 7 (d)와 같이 적분상태의 값이 그림 6 (d)와 비교하면 재빠르

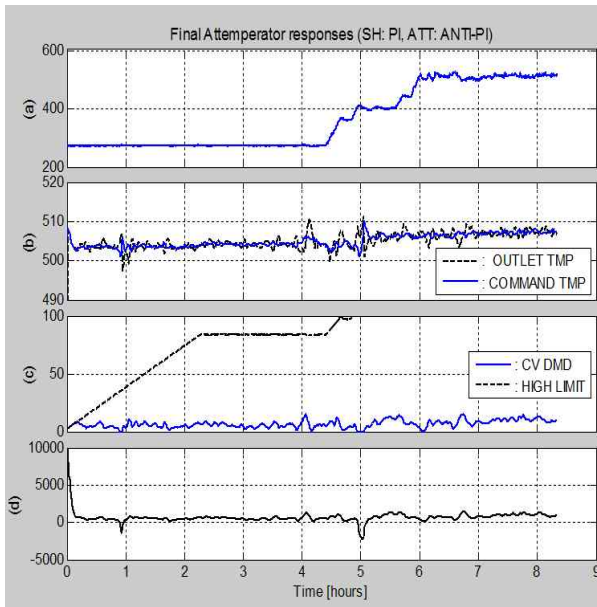


그림 7. 260[MW]에서 500[MW]로 변한 경우 과열저감기의 anti-windup PI제어기 응답, (a) 전력 명령[MW], (b) 출구온도 명령 및 출구온도[°C], (c) 밸브 개도 명령 및 명령 제한[%], (d) anti-windup PI제어기의 적분 상태
 Fig. 7. Responses of attemperator with anti-windup PI controller during ramp-up of MW demand, (a) MWD [MW], (b) command and output temperatures[°C], (c) CV opening command and saturation limit[%], (d) integral state of anti-windup PI control

게 감소한다. 따라서 그림 7 (b)와 같이 과열저감기 출구온도의 응답에서 windup현상이 발생하지 않는다. 전력 명령 변화는 ramp형태로 변하여 명령 변화에 의한 과도구간에서 과열저감기 PI제어기에 의한 밸브 개도 명령이 제한 값에 걸릴 가능성은 작다. 따라서 ramp형태의 전력 상승 요구에 대해 일반 PI제어기 응답과 거의 유사하다. 출구온도 실효치 오차는 0.76[°C], 명령 변화 과도상태에서 출구온도 침두-침두 오차는 9.6[°C]이다.

그림 8은 전력 명령이 500[MW]에서 260[MW]로 계단 형태로 변할 경우 과열저감기의 주요 운전 데이터를 나타낸다. 전력 명령의 과형과 유사하게 주 증기 입력, 스프레이 압력, 연료 유량, 증기 유량 등이 변한다. 전력 명령이 계단 형태로 변하여 과열저감기에 대

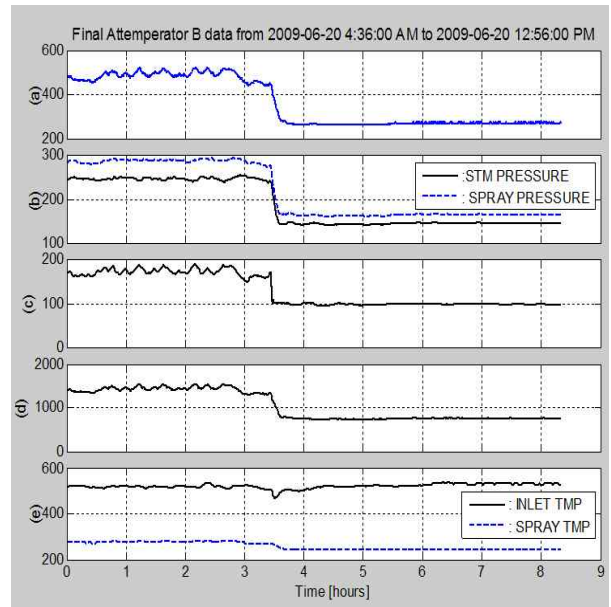


그림 8. 500[MW]에서 260[MW]로 변한 경우 과열저감기의 운전 데이터, (a) 전력 명령[MW], (b) 주 증기 및 스프레이 압력[kgf/cm²], (c) 연료 유량[T/h], (d) 증기 유량[T/h], (e) 입구 및 스프레이 온도[°C]
 Fig. 8. Operating data of attemperator during step-down of MW demand, (a) MWD[MW], (b) steam and spray pressure[kgf/cm²], (c) fuel flow[T/h], (d) steam flow[T/h], (e) inlet and spray temperature[°C]

한 외란 또한 계단 형태로 변하므로 외란에 의한 충격이 커서 PI제어기의 출력이 상한 값 또는 하한 값의 제한에 걸릴 가능성이 높다. 초기에는 수동모드에서 자동모드로 전환한 것으로 볼 수 있어 모드 전환 과도상태가 존재한다. 약 3시 30분에 전력 명령이 계단으로 하강하여 이 기간 동안 과도상태가 존재하고, 나머지 구간은 정상상태로 볼 수 있다.

그림 9는 그림 8의 운전 데이터를 기반으로 과열저감기의 제어를 현재 운용 중인 PI제어기로 제어한 경우의 응답 특성을 나타낸다. 과열저감기 PI제어기의 제어 출력인 밸브 개도는 그림 9 (c)에서처럼 약 2시간 45분 동안 하한 값으로 제한된다. 이 기간 동안 PI제어기의 적분상태가 그림 9 (d)에서처럼 크게 증가하여 그림 9 (b)에서처럼 windup현상이 발생하여 오랜

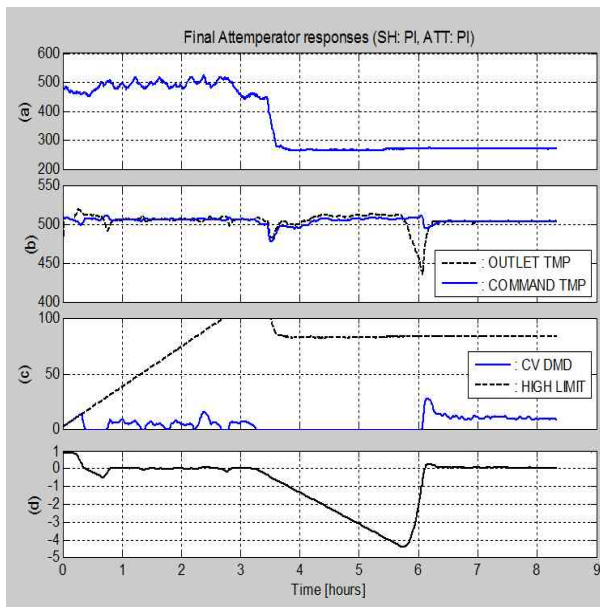


그림 9. 500[MW]에서 260[MW]로 변한 경우 과열저감기의 PI제어기 응답, (a) 전력 명령[MW], (b) 출구온도 명령 및 출구온도[°C], (c) 밸브 개도 명령 및 명령 제한[%], (d) PI제어기의 적분 상태(*10⁴)

Fig. 9. Responses of attemperator with PI controller during step-down of MW demand, (a) MWD [MW], (b) command and output temperatures[°C], (c) CV opening command and saturation limit[%], (d) integral state of PI control(*10⁴)

시간동안 출구온도가 명령에서 크게 벗어남을 알 수 있다. 출구온도 실효치 오차는 4.82[°C], 명령변화 과도상태에서 출구온도 침두-침두 오차는 19[°C]이다.

그림 10은 그림 8의 운전 데이터를 기반으로 과열저감기를 제안한 anti-windup PI제어기로 제어한 경우의 응답 특성을 나타낸다. 명령 계단 변화에 따른 과도구간에서 과열저감기의 anti-windup PI제어기가 밸브 개도는 하한 값에 걸리지만 그림 10 (d)와 같이 적분상태의 값은 크게 증가하지 않는다(그림 9 (d)와 비교). 따라서 그림 10 (b)와 같이 과열저감기 출구온도의 응답에서 windup현상이 발생하지 않고, 온도 명령을 잘 추종함을 알 수 있다. 출구온도 실효치 오차는 4.52[°C], 명령 변화 과도상태에서 출구온도 침두-침두 오차는 7.8[°C]이다.

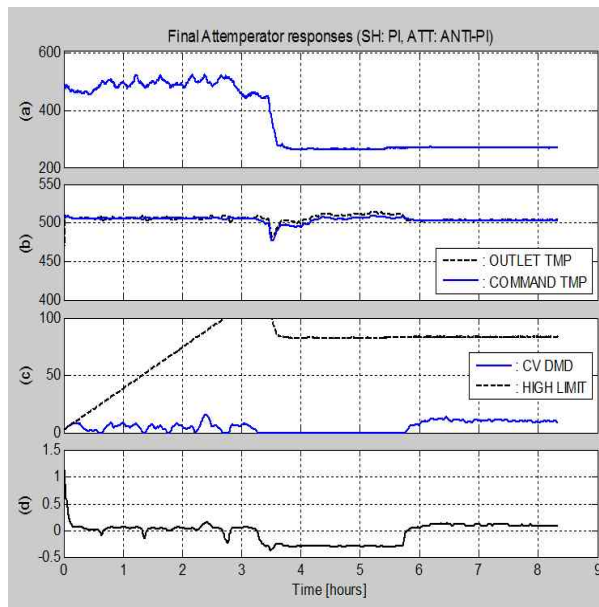


그림 10. 500[MW]에서 260[MW]로 변한 경우 과열저감기의 anti-windup PI제어기 응답, (a) 전력 명령[MW], (b) 출구온도 명령 및 출구온도[°C], (c) 밸브 개도 명령 및 명령 제한[%], (d) anti-windup PI제어기의 적분 상태(*10⁴)

Fig. 10. Responses of attemperator with anti-windup PI controller during step-down of MW demand, (a) MWD [MW], (b) command and output temperatures[°C], (c) CV opening command and saturation limit[%], (d) integral state of anti-windup PI control(*10⁴)

따라서 제시한 anti-windup PI제어기를 과열저감기에 적용하여 증기 온도의 침두-침두 오차 및 실효치 오차를 크게 줄일 수 있음을 알 수 있어 화력발전소 효율 증대에 기여할 것으로 예상된다.

4. 결 론

화력발전소 보일러 시스템에서 사용되는 과열저감기의 온도제어 성능을 향상하기 위하여 과열저감기에 대한 물리적인 모델을 개발하였고, anti-windup PI제어 알고리즘을 제안 설계하였다. 화력발전소의 실제 운전 데이터를 기반으로 모델을 시뮬레이션하여 현재 운용하고 있는 PI제어기와 제안한 anti-windup PI제

여기의 성능을 비교하였고, anti-windup PI제어기를 통해 제어성능을 크게 향상시킬 수 있음을 보였다. 따라서 제어성능의 향상으로 효율 및 수명 연장에 크게 기여할 것으로 기대된다.

References

[1] A. Ghaffari, A. Chaibakhsh, and H. Parsa, "An optimization approach based on genetic algorithm for modeling Benson type boiler," Proc. of 2007 American Control Conf., vol. FrA19.4, pp. 4860-4865, July 2007.

[2] A. Chaibakhsh, A. Ghaffari, S. Ali, and A. Moosavian, "A simulated model for a once-through boiler by parameter adjustment based on genetic algorithm," Simulation Modeling Practice and Theory, vol. 15, pp. 1029-1051, Aug. 2007.

[3] K. J. Åström and T. Hägglund, PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. Research Triangle Park, NC: ISA, 1995.

[4] Y. Peng, D. Vrancic, and R. Hanus, "Anti-windup, bumpless, and conditioned transfer techniques for PID controllers," IEEE Control Syst. Mag., vol. 16, no. 4, pp. 48 - 57, Aug. 1996.

[5] 신휘범, 이순영, 박종만, 신현식, "반포화 비례적분미분제어기," 대한민국 특허 출원번호: 2010-0014689.

[6] H. B. Shin, "New antiwindup PI controller for variable-speed motor drives," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 45, no. 3, pp. 445 - 450, Jun. 1998.

[7] J. G. Park, J. H. Chung, and H. B. Shin, "Anti-windup integral-proportional controller for variable-speed motor drives," J. of Power Electronics, vol. 2, no. 2, pp. 130 - 138, Apr. 2002.

[8] H. B. Shin, X. Li, J. G. Park, "Comparison and evaluation of anti-windup PI controllers," J. of Power Electronics, vol. 11, no. 1, pp. 45 - 50, Jan. 2011.

◇ 저자소개 ◇



신휘범(愼輝範)

1958년 10월 30일생. 1982년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1992년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1990~1993년 현대전자(주) 선임연구원. 2000~2002년 미국 Univ. of Wisconsin Madison 방문교수. 1993년~현재 경상대학교 전기공학과 교수 및 공학연구원 연구원.