논 문
59-11-12

# 화력발전소의 과열기증기의 온도제어

## Temperature Control of Superheater Steam in Thermal Power Plant

신 휘 범* · 이 순 영†
(Hwi-Beom Shin · Soonyoung Lee)

**Abstract** - The superheater in the thermal power plant makes the wet steam into the dry steam with high temperature and high pressure by using the boiler heat. The dry steam pressure rotates the turbine-generator system. The efficiency and life time of the boiler heavily depends on the steam temperature regulation. The steam temperature can be deviated from the reference by the MW demand of the power plant. It is therefore required that the PI(proportional-integral) controller should be robust against the disturbance such as the MW demand. In this paper, the PI controller with the integral state predictor is proposed and applied to regulate the steam temperature of the superheater, and it is compared with the conventional PI controller operated in the thermal power plant in view of control performance.

**Key Words** : Thermal power plant, Boiler, Superheater, Steam temperature control, 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 수증기를 발생하는 것이다. 과열기는 수분을 포함한 습증기를 입력으로 받아 수분을 증발시키고 온도를 더 높여 과열기 증기로 만드는 장치이다. 과열증기의 온도제어는 일차로 보일러의 연료로 인가한 석탄의 열량에 의해 수증기의 온도를 원하는 값 이상으로 상승시키고, 다음으로 과열저감기에서 분사되는 낮은 온도의 수증기의 양을 조절하여 증기 온도를 원하는 값으로 떨어뜨려 일정하게 유지하는 것을 목적으로 하고 있다. 과열기의 정격 온도 유지는 발전소 효율과 밀접한 관계가 있는데 설계치보다 높을 경우 효율은 증가되나 과열기, 터빈 재질의 열응력 발생으로 보일러의 수명 단축과 손상이 원인이 된다. 또한 정격이하의 온도로 운전 할 경우 효율 감소뿐만 아니라 증기의 질 저하로 인하여 터빈 회전 날개의 침식 유발 등의 문제가 발생한다[1,2].

과열기의 수증기 온도제어는 그림 1과 같이 cascade제어 형태로 이루어진다. 내부에 과열저감기와 제어기가 있고, 외부 루프에 과열기와 제어기가 있다. 최종 제어변수는 과열기를 거친 수증기의 온도이다. 명령 값과 비교하여 오차를 구하고 이를 PI(proportional integral: 비례적분)제어기를 통과하여 과열기에 입력되는 수증기 온도에 대한 명령을 과열저감기에 전달한다. 과열기에 입력되는 수증기 온도는 측정되어 명령 값과 비교하여 PI 제어기에 의해 과열저감기의 스프레이 흐름 양 또는 스프레이 제어밸브의 개도 $CV$를 발생한다. 여기서 내부 제어루프를 과열저감기 제어루프라 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. 과열기 출구온도의 경우 맥동의 허용치가 엄격하여 계단 형태의 전력 요구에 의한 외란에 대해서도 출구 온도가 잘 안변하는 PI제어기가 요구된다[3,4]. PI제어기의 적분상태의 정상상태 값을 예측할 수 있으면 계단 명령이나 외란에 대해 거의 일정한 응답을 얻을 수 있다[5]. 따라서 오차가 주어진 작은 오차 범위 밖에 있는 경우 P제어로 동작하고 동시에 적분상태의 정상상태 값을 예측한다. 오차가 오차 범위 내에 진입할 때 PI제어가 활성화되는데 이때 예측한 정상상태 값을 적분기의 초기 값으로 선정한다. 이러한 방법으로 계단 명령이나 외란에 대해 거의 일정한 응답을 갖는 PI 제어기를 구성할 수 있다.

본 논문에서는 적분상태 예측기를 갖는 PI제어 알고리즘을 과열기의 온도제어에 적합하도록 설계하여 제어 성능을 향상시키고자 한다. 제시한 태안화력발전소의 운전 데이터

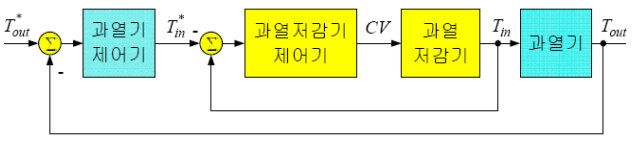



**그림 1** 과열기의 온도 제어 시스템
**Fig. 1** Temperature control system of superheater

* 정 회 원 : 경상대학교 전기공학과 교수, 공학연구원
† 교신저자, 정회원 : 경상대학교 전기공학과 교수, 공학연구원
E-mail : leesy@gnu..ac.kr
접수일자 : 2010년 8월 31일
최종완료 : 2010년 10월 2일

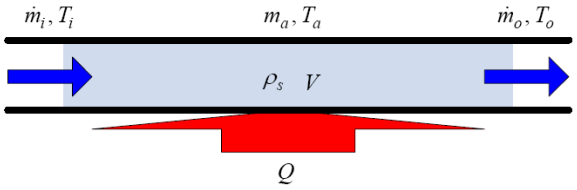



**그림 2** 과열기 모델
**Fig. 2** Superheater model

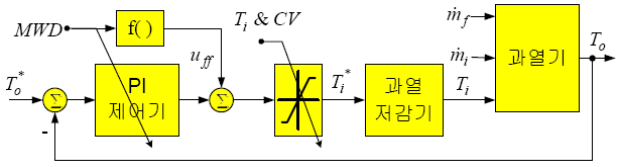



**그림 3** 과열기 제어 블록선도
**Fig. 3** Block diagram of superheater

를 기반으로 Matlab을 통해 시뮬레이션하여 현재 운용하고 있는 PI제어기와 제안한 적분상태 예측기를 갖는 PI제어기에 의한 과열기 온도제어의 성능을 비교한다.

## 2. 과열기 선형화 모델링

과열기(superheater)는 그림 2에서처럼 수증기가 보일러 내에 설치된 관을 통해 지나가 수증기의 온도를 증가시키는 역할을 한다. 참고문헌 [7]로부터 과열기 출구 온도의 동특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_p m_a \frac{dT_o}{dt} = -C_p \dot{m}_i T_o + C_p \dot{m}_i T_i - k_a \dot{m}_i + H \cdot \dot{m}_f \tag{1}$$

여기서 $T_i$와 $T_o$는 과열기의 입구 및 출구 수증기의 온도[°C]를 나타내고, $C_p$는 수증기의 비열 상수[kJ/kg·K]를 나타낸다. $\dot{m}_i$과 $\dot{m}_o$은 과열기의 입구 및 출구 수증기의 질량 흐름[kg/s]이고, $\dot{m}_f$은 보일러에 인가되는 미분탄의 질량 흐름[kg/s]이다. 과열기의 출구 온도 $T_o$는 입구 온도 $T_i$에 의해 제어된다. 측정 가능한 변수는 $T_i, T_o, \dot{m}_i, \dot{m}_f, p$이다.

주요 변수에 대해 위의 식 (1)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{dT_o}{dt} = -K_1 \dot{m}_i T_o + K_1 \dot{m}_i T_i + \eta(\dot{m}_f, \dot{m}_i) \tag{2}$$

여기서

$$K_1 = 1/m_a \tag{3}$$

$$\eta(\dot{m}_f, \dot{m}_i) = \frac{1}{C_p m_a}\left(H\dot{m}_f - k_a \dot{m}_i\right) \tag{4}$$

이고 $\eta(\dot{m}_f, \dot{m}_i)$는 외란으로 볼 수 있다. 외란의 주요 항은 석탄의 질량흐름 $\dot{m}_f$이다. 출구온도 동특성은 비선형이므로 다음과 같이 한 동작점에 대해 미소 변동을 주어 선형화할 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{d(T_o + \Delta T_o)}{dt} = &-K_1(\dot{m}_i + \Delta\dot{m}_i)(T_o + \Delta T_o) \\ &+ K_1(\dot{m}_i + \Delta\dot{m}_i)(T_i + \Delta T_i) + (\eta + \Delta\eta)\end{aligned} \tag{5}$$

이차항을 무시하면 한 동작점에서 선형 모델을 얻을 수 있다.

$$\dot{y} = -ay + bv + d \tag{6}$$

여기서

$$\begin{aligned} y &= \Delta T_o, \quad v = \Delta T_i \\ a &= b = K_1 \dot{m}_i \\ d &= \Delta\eta = \frac{1}{C_p m_a}\left(H\Delta\dot{m}_f - k_a \Delta\dot{m}_i\right) \end{aligned} \tag{7}$$

이다.

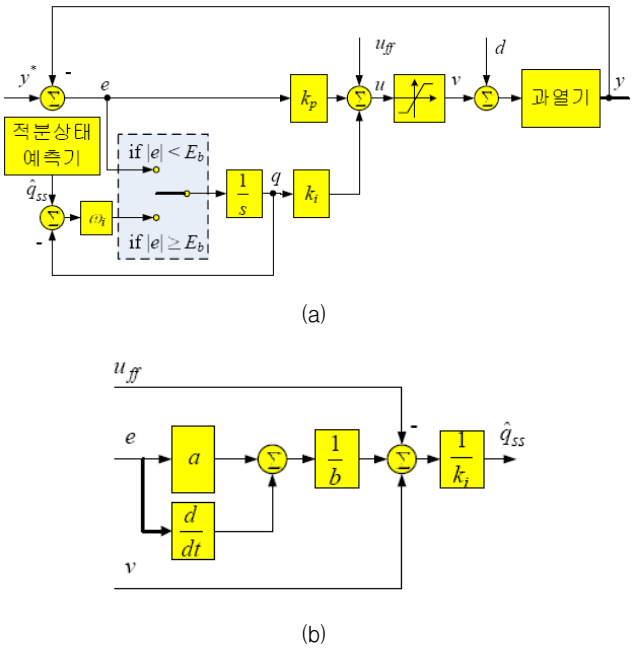
## 3. 과열기 증기 온도제어

그림 3은 PI제어기가 적용된 과열기제어 블록선도를 나타낸다. 전력요구(MWD)에 따라 PI 이득이 조정되고, feedforward 형태로 온도가 PI제어기 출력에 더해진다. 그 후 현재 과열기 입구온도와 스프레이 밸브 개도에 의해 결정된 제어 입력 상한 값에 의해 제한된다. 또한 밸브 개도 제한 값을 빼서 제어 입력의 하한 값으로 제한된다. 따라서 포화형의 상한 및 하한 과열기 입구온도 명령은 현재 과열기 입구온도의 파형과 유사한 형태를 갖는다. 과열기 출구온도가 명령에 비해 크게 떨어지면 과열기 PI제어기의 출력은 상한 제한에 오랫동안 걸려 있을 수 있다. 최종단 과열기의 증기온도를 기준치 내로 유지하는 것은 효율 및 수명에 관계되므로 기준 허용치 이내로 유지하는 것이 매우 중요하다.

이러한 목적을 달성하기 위해 그림 4(a)의 적분상태 예측기를 갖는 PI제어기를 과열기에 적용한다[5]. 출력 오차가 오차 범위 밖에 있으면 정상상태의 적분상태를 예측한다. 이 경우 비례와 미분 제어는 기존과 같게 동작하지만 적분기는 정상상태 값으로 유지된다. 그 후 오차가 오차 범위 안으로 진입하면 예측한 값을 적분기의 초기 값으로 인가한다. 이 경우 일반 PI제어를 수행하여 정상상태 출력 오차를 제거한다. feedforward항을 갖는 PI제어기는 다음과 같다.

$$u = k_p e + k_i q + u_{ff} \tag{8}$$

여기서 $u_{ff}$는 feedforward 항을 나타내고, $k_p$, $k_i$는 비례 및 적분제어 이득을 각각 나타내고, 오차 $e$는 $e = y^* - y$이고, $y^*$는 명령 또는 기준 값이다. 제어 입력 $v$는 과열기 출구온도로 다음의 제한을 갖는다.




(a)



(b)

**그림 4** (a) 적분상태 예측기를 갖는 PI제어기, (b) 적분상태 예측기

**Fig. 4** (a) PI controller with integral state predictor, (b) integral state predictor

$$v = \begin{cases} U_{\max} & \text{if } u > U_{\max} \\ u & \text{if } U_{\min} \leq u \leq U_{\max} \\ U_{\min} & \text{if } u < U_{\min} \end{cases} \tag{9}$$

오차에 대한 동특성을 유도하면 다음과 같다.

$$\dot{e} = -ae - bv + bk_i q_{ss} + bu_{ff} \tag{10}$$

따라서 그림 4(b)와 같이 적분상태의 정상상태 값은 다음 식을 이용하여 예측할 수 있다.

$$k_i \hat{q_{ss}} = \frac{1}{b}(\dot{e} + ae) + v - u_{ff} \tag{11}$$

식 (8)에서 적분상태를 다음과 같이 인가한다.

$$\dot{q} = \begin{cases} e & \text{if } |e| < E_b \\ \omega_i(\hat{q_{ss}} - q) & \text{if } |e| \geq E_b \end{cases} \tag{12}$$

여기서 $E_b$는 작은 값의 오차 범위를 나타내고, $\omega_i$는 적분상태를 초기화하는 저역통과필터의 대역폭이다. 예측기의 잡음이나 갑작스런 적분상태 변화를 방지하기 위해 저역통과필터를 사용한다. 적분상태 인가 시간은 다음에 의해 결정된다.

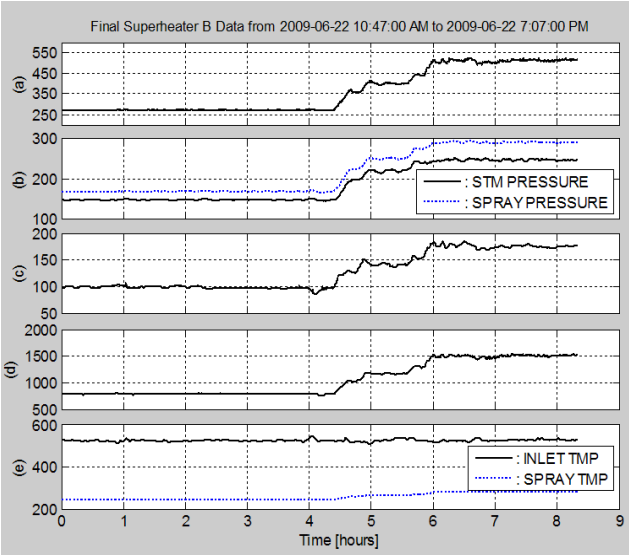



**그림 5** 260 MW에서 500 MW로 변한 경우 과열기 운전 데이터, (a) 전력 명령 [MW], (b) 주증기 및 스프레이 압력[kgf/cm$^2$], (c) 연료 질량흐름 [T/h], (d) 증기 질량흐름[T/h], (e) 입구 및 스프레이 온도 [°C]

**Fig. 5** Operating data of superheater during ramp-up of MW demand, (a) MWD [MW], (b) steam and spray pressure [kgf/cm$^2$], (c) fuel flow [T/h], (d) steam flow [T/h], (e) inlet and spray temperature [°C]

$$\frac{q(s)}{\hat{q_{ss}}(s)} = \frac{1}{s/\omega_i + 1} \tag{13}$$

제안한 적분상태 예측기를 갖는 PI제어기를 통해 출력 전력 변동 등 외란에 관계없이 증기온도를 허용치 이내로 유지할 수 있고, 변동 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 예상한다.

## 4. 과열기 PI 온도제어기 성능 비교

태안화력발전소의 운전 데이터를 유도한 과열기 모델과 연결하여 현재 운영하고 있는 과열기의 PI제어기와 제안한 적분상태 예측기를 갖는 PI제어기의 성능을 비교한다. 운전 데이터는 500 MW에서 260 MW로 출력이 계단 형태로 하강한 경우와 260 MW에서 500 MW로 출력이 ramp 형태로 상승한 경우를 선택하였다.

그림 5는 전력 명령이 260 MW에서 500 MW로 ramp 형태로 상승할 때 과열기의 주요 운전 데이터를 나타내며, 데이터는 1 초 간격으로 샘플되었다. MWD의 파형과 유사하게 주 증기 압력, 스프레이 압력, 연료 질량흐름, 증기 질량흐름 등이 변한다. 과열기 제어기의 최종 목표는 전력 명령이 변하여 주요 변수도 같이 변함에도 불구하고 과열기 출구온도를 원하는 기준 값으로 유지하는 것이다. 전력 명령이 ramp형태로 변하여 과열기에 대한 외란 또한 ramp 형태로 변하므로 외란에 의한 충격이 작아 PI제어기의 출력이 오차 범위 밖으로 벗어날 가능성은 낮다.

그림 6은 전력 명령이 500 MW에서 260 MW로 계단 형

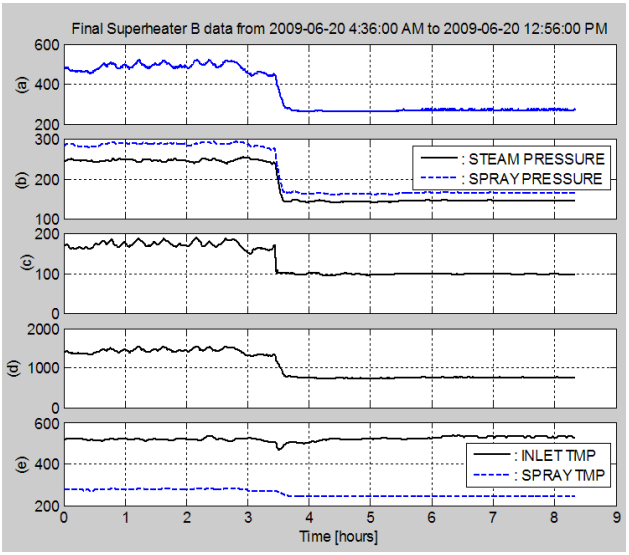



**그림 6** 500 MW에서 260 MW로 변한 경우 과열기 운전 데이터, (a) 전력 명령 [MW], (b) 주 증기 및 스프레이 압력 [kgf/cm$^2$], (c) 연료 질량흐름 [T/h], (d) 증기 질량흐름 [T/h], (e) 입구 및 스프레이 온도 [°C]

**Fig. 6** Operating data of superheater during step-down of MW demand, (a) MWD [MW], (b) steam and spray pressure [kgf/cm$^2$], (c) fuel flow [T/h], (d) steam flow [T/h], (e) inlet and spray temperature [°C]

태로 변할 경우 과열저감기의 주요 운전 데이터를 나타낸다. 전력 명령의 파형과 유사하게 주 증기 입력, 스프레이 압력, 연료 질량흐름, 증기 질량흐름 등이 변한다. 전력 명령이 계단 형태로 변하여 과열저감기에 대한 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.

명령 값이 변하여 발생하는 과도상태 구간에서 출구온도의 첨두-첨두 오차와 정상상태 및 과도 상태를 포함한 온도 오차의 실효치를 성능지수로 온도 제어기의 성능을 비교한다.

그림 7과 그림 8은 전력명령이 상승한 경우로 그림 5의 운전 데이터를 기반으로 과열기의 제어기를 현재 운용 중인 PI제어기와 제안한 PI 제어기의 응답 특성을 나타낸다. 초기 과도구간은 수동모드에서 자동모드로 전환하는 구간으로 볼 수 있다. 이 구간에서 과열기 PI제어기는 과열기 입구온도 명령의 제한 값이 설정되는데 시간이 걸린다. 따라서 이 구간에서 과열기 PI제어기의 제어 입력이 그림 7(c)처럼 제한에 걸린다. 따라서 적분상태가 그림 7(d)처럼 초기에 크게 증가한다. 이로 인해 출구온도가 그림 7(b)처럼 초기 30분 동안 기준값으로 크게 벗어난다. 약 4시 20분부터 1시간 40분 동안 전력 요구가 상승하여 이 기간 동안 과도상태가 존재하고, 나머지 구간은 정상상태로 볼 수 있다. 외란인 전력 명령 변화는 ramp형태로 변하여 명령 변화에 의한 과도구간에서 과열기의 PI제어기에 의한 제어 입력이 그림 7(c)와

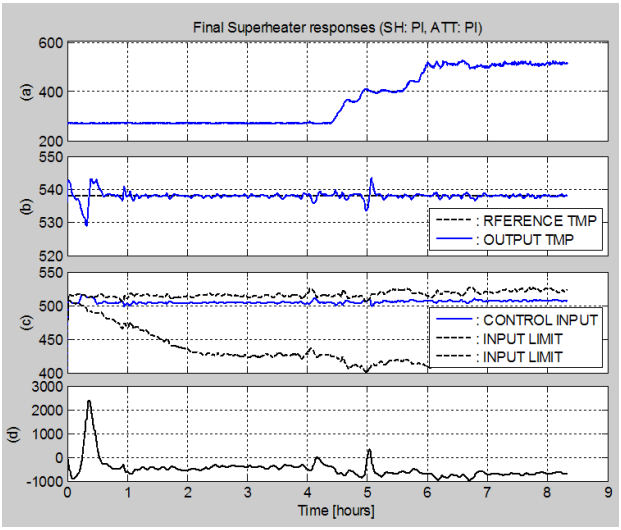



**그림 7** 260 MW에서 500 MW로 변한 경우 PI제어기 응답, (a) 전력 명령 [MW], (b) 출구온도 명령 및 출구온도 [°C], (c) 입력 증기온도 명령 및 명령 제한 [°C], (d) PI제어기의 적분 상태

**Fig. 7** Responses of superheater with PI controller during ramp-up of MW demand, (a) MWD [MW], (b) command and output temperatures [°C], (c) Input temperature command and saturation limit [°C], (d) integral state of PI control

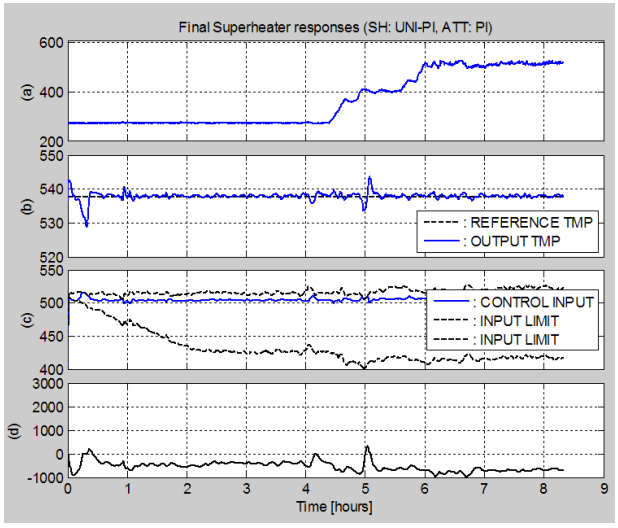



**그림 8** 260 MW에서 500 MW로 변한 경우 제안한 PI제어기 응답, (a) 전력 명령 [MW], (b) 출구온도 명령 및 출구온도 [°C], (c) 입력 증기온도 명령 및 명령 제한 [°C], (d) PI제어기의 적분 상태

**Fig. 8** Responses of superheater with proposed PI controller during ramp-up of MW demand, (a) MWD [MW], (b) command and output temperatures [°C], (c) Input temperature command and saturation limit [°C], (d) integral state of PI control

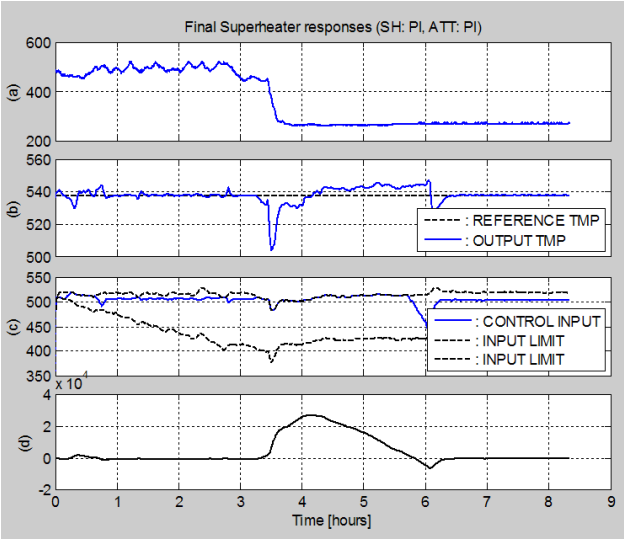



**그림 9** 500 MW에서 260 MW로 변한 경우 PI제어기 응답, (a) 전력 명령 [MW], (b) 출구온도 명령 및 출구온도 [°C], (c) 입력 증기온도 명령 및 명령 제한 [°C], (d) PI제어기의 적분 상태

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

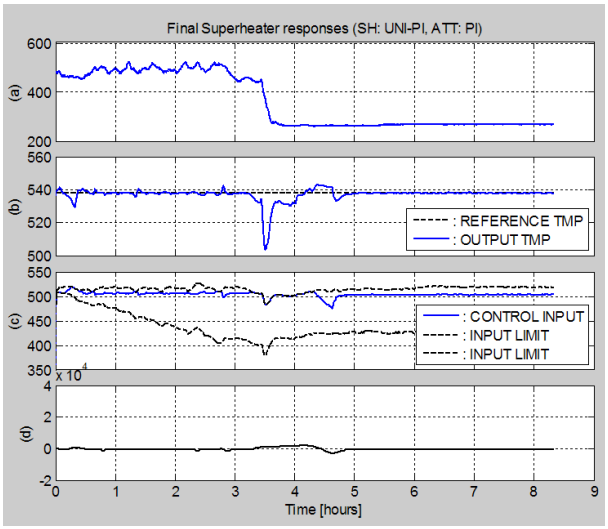



**그림 10** 500 MW에서 260 MW로 변한 경우 제안한 PI제어기 응답, (a) 전력 명령 [MW], (b) 출구온도 명령 및 출구온도 [°C], (c) 입력 증기온도 명령 및 명령 제한 [°C], (d) PI제어기의 적분 상태

**Fig. 10** Responses of superheater with proposed PI controller during step-down of MW demand, (a) MWD [MW], (b) command and output temperatures [°C], (c) Input temperature command and saturation limit [°C], (d) integral state of PI control

같이 제한 값에 걸릴 가능성은 적다. 따라서 ramp형태의 전력 명령 상승의 경우 PI제어기 응답은 선형영역에서 동작할 확률이 높다. 출구온도 실효치 오차는 1.25 °C, 명령 변화 과도상태에서 출구온도 첨두-첨두 오차는 10 °C이다.

그림 8은 제안한 적분상태 예측기를 갖는 PI제어기로 제어한 경우의 응답 특성을 나타낸다. PI 이득은 기존의 PI제어기와 같게 설정하였고, 식 (21)에서 사용한 오차 범위 $E_b$는 5 °C로 선정하였다. 그림 8(b)에서처럼 초기 모드전환 구간에서 증기온도가 기준 값으로부터 오차 범위를 벗어나지만 식 (21)에 의해 적분상태를 적절히 제어한다. 따라서 그림 7(d)와 8(d)를 비교해보면 모드 전환에서 제안된 PI제어기의 적분상태가 적절히 조절되어 그림 9(b)에서처럼 2차 오버슈트를 방지하여 기준값에 오차범위 내로 유지되도록 한다. 전력명령 변화가 ramp형태로 변하여 명령 변화에 의한 과도구간에서 증기온도가 오차 범위를 벗어나지 않아 기존 PI제어기의 응답과 같음을 그림 7과 그림 8로부터 알 수 있다. 출구온도 실효치 오차는 0.76 °C, 명령 변화 과도상태에서 출구온도 첨두-첨두 오차는 9.6 °C이다.

그림 9와 그림 10은 전력명령이 하강한 경우로 그림 6의 운전 데이터를 기반으로 과열기의 제어기를 현재 운용 중인 PI제어기와 제안한 PI제어기의 응답 특성을 나타낸다. 그림 9(c)에서 전력명령이 계단으로 변화하는 시점에서 볼 수 있듯이 PI제어기 출력이 약 2시간 30분 이상 동안 출구온도가 기준 값으로부터 크게 벗어나고 있고 제어 입력 또한 상한 값으로 제한되다 6시쯤에 하한 값으로 제한됨을 알 수 있다. 따라서 적분상태가 그림 9(d)에서처럼 과도상태 초기에 크게 증가한다. 이로 인해 출구온도가 그림 9(b)처럼 오랜 기간 동안 명령 값보다 출구온도가 큰 상태를 유지하여 적분상태가 정상적은 값으로 돌아오길 기다리는 windup현상이 발생한다. 출구온도 실효치 오차는 4.82 °C, 명령변화 과도상태에서 출구온도 첨두-첨두 오차는 19 °C이다.

그림 10은 과열기를 제안한 PI제어기로 제어한 경우의 응답 특성을 나타낸다. MWD 명령의 계단 변화에 따른 과도구간에서 과열기의 PI제어기의 명령이 그림 10(c)에서처럼 약 1시간 동안 제한에 걸리지만 적분상태가 그림 10(d)에서처럼 크게 증가하지 않는다. 이로 인해 출구온도가 그림 10(b)처럼 계단 충격에 대해서 출력이 기준 값으로부터 크게 벗어나지 않는다. 기존 PI제어로 제어된 그림 90(b)와 비교하면 오차 범위를 벗어나는 과도기간이 약 2시간 40분에서 약 1시간으로 감소하였고, 온도 변동이 작아졌음을 알 수 있다. 출구온도 실효치 오차는 4.18 °C, 명령 변화 과도상태에서 출구온도 첨두-첨두 오차는 9.8 °C이다.

## 3. 결 론

본 논문에서 화력발전소 보일러 시스템에서 사용되는 과열기의 온도제어 성능을 향상하기 위하여 적분기의 정상상태 값을 예측하는 예측기를 갖는 PI제어 알고리즘을 제시하였다. 화력발전소의 실제 운전 데이터를 기반으로 모델을 시뮬레이션하여 현재 운용하고 있는 PI제어기와 제안한 PI제어기의 성능을 비교하였고, 제안한 PI제어기를 통해 제어성능을 크게 향상시킬 수 있음을 보였다. 따라서 제어성능의 향상으로 화력발전소 보일러 시스템의 효율 및 수명 연장에 크게 기여할 것으로 기대된다.

**감사의 글**

본 연구는 한국서부발전(주)의 지원에 의하여 수행된 과제임.

## 참 고 문 헌

[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, 김순교, 정인영, "비례적분미분제어기 및 그 제어 방법," 대한민국 특허 출원번호: 2010-0035326.

[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] 이순영, 신휘범, "과열기와 과열저감기에 대한 모델링 및 파라미터 추정," 대한전기학회논문지(게재 예정).

## 저 자 소 개

**신 휘 범 (愼 輝 範)**

1982년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(석사). 1992년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공박). 1990년 ~ 1993년 현대전자(주) 선임연구원. 2000년 ~ 2002년 미국 Univ. of Wisconsin Madison 방문교수. 1993년 ~ 현재 경상대학교 전기공학과 교수 및 공학연구원 연구원.

**이 순 영 (李 順 榮)**

1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1982년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1985년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), Yale 대학교, Pennsylvania 주립대학교, Callgary 대학교 방문교수, 1986년 ~ 현재 경상대학교 전기공학과 교수 및 공학연구원 연구원