

500MW급 초임계압 관류형 보일러 온도제어에 대한 기술

이광훈, 이주현
한국전력공사 전력연구원

Temperature Control Technology for Once Through Boiler

LEE KWANGHOON, LEE JOOHYUN
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - In this paper, we reviewed the steam temperature control in an once through boiler. The steam temperature control is very difficult. Generally, steam temperature of an once through boiler is not only controlled by boiler spray water flow, but also influenced by feed water flow and fuel flow. An advanced control strategy has been developed by experienced engineer. Specifically, We reviewed temperature control strategy for Taian power plant in this paper. This control strategy is represented by state control observer. This state control observer algorithm for temperature control has been used since the late 1980's. This paper describes control strategy employed and observed benefits from advanced steam temperature control.

1. 서 론

근래 대용량 발전소의 증가와 함께 보일러의 형태도 기존의 드럼형 보일러에서 효율이 좋은 관류형 보일러가 주류를 이루어 왔다. 초임계압 관류형 보일러는 증발관 직경을 작게하므로서 초기 투자비를 줄일 수 있다. 관류형 보일러 온도는 Spray 에 의해서 제어되고 열 입력과 유체유량의 비에 의해 열 흡수가 자동적으로 결정되어 광범위한 범위에 걸쳐 희망하는 증기 온도를 얻을 수 있으나 드럼 보일러보다 보유수량이 적어 신속한 기동정지가 요구되는 중간부하 운전용 보일러로서 적합한 반면, 부하변동에 대한 여유가 적어 급수량과 연료량이 정확하게 일치하지 않으면 증기 압력 및 과열증기의 온도가 변동되므로 급수와 연료에 대한 신속 정확한 제어장치가 요구된다. 이 논문에서는 초임계압 관류 보일러 온도제어에서 진보된 로직이 어떻게 구현되어 있는가에 대해 살펴보고자 한다. 프로세스에서의 시간지연은 프로세스의 제어에 있어서 어려움을 초래하며, 시스템의 성능 저하의 원인이 되고 있다. 이러한 프로세스의 시간지연을 극복하고자 해서 제안된 제어기의 구조가 기존의 제어기에 state control observer 를 결합한 형태이다. 본 논문에서는 태안 화력 발전소에 적용된 프로세스를 선택하여, state control observer 제어기와 PID 제어기에 대해서 프로세스의 지연시간에 따른 state control observer 의 효용성을 알아 보기로 한다.

2. 관류 보일러 온도제어

2.1 관류 보일러 증기온도 제어의 특징

관류 보일러는 열 입력과 유체유량의 비에 의해 열 흡수가 자동적으로 결정되어 광범위한 범위에 걸쳐 희망하는 증기 온도를 얻을 수가 있다. 물론 관류 보일러에서도 Spray에 의해 증기온도를 신속히 변화시키는 제어를 하고 있으나 이는 일시적인 효과로, 과열기에 유입되는

유체의 엔탈피가 변화하기 때문에 Spray에 의한 항구적인 온도변화를 기대할 수는 없다.

2.2 증기온도 제어의 제한범위

2.2.1 급수유량/증기유량

관류 보일러는 급수와 증기가 구분되는 지점이 일정하지 않기 때문에 급수량과 증기량의 비가 다를 경우 매우 큰 압력변화를 초래한다. 또한 보일러의 보유열량이 적기 때문에 부하 상승시 급수유량/증기유량의 편차가 제한되어야 한다.

2.2.2 급수유량/KCAL 입력

정상상태에서 급수유량에 대한 열 입력의 비율은 최종 증기온도를 희망치에 유지시키는 비율이어야 한다. 과도상태에서의 이 비율은 새로운 부하에 합당한 열 입력을 증감시키는 동시에 보일러 금속부의 보유열량을 고려하여야 한다.

2.2.3 급수 유량 제어

보일러 요구신호에 부응한 급수 demand 신호 작성, 증기압력 제어 및 증기온도 제어간의 상호간섭을 적게 하기 위한 연소율과의 협조제어가 필요하다.

2.2.4 연소율 교정

희망 증기온도 유지를 위한 연소율과 급수율과의 관계를 수정, spray 가 일시적인 증기온도 제어의 수단으로 이용되는 반면 급수율과 연소율의 비는 항구적인 증기온도의 제어수단으로 이용된다. 저부하시 과열기 출구의 증기온도는 거의 과열기 입구의 가스온도에 좌우된다. 이는 다량의 가스에 의한 높은 열 교환율과 매우 적은 증기 유량의 영향으로 증기온도는 거의 가스온도와 같게 된다. 부하가 상승하면 과열기 출구온도는 과열기 입구의 유체온도에 영향을 받는 보통의 상태로 된다. 따라서 저부하시에는 검출 응답이 빠른 가스온도를 선행요소로 이용하면 증기온도의 제어특성을 개선할 수 있다.

2.2.5 연료 유량 제어

연소율 요구신호에 부응한 연료 유량을 확보. 연료/공기 비율의 제한회로 구성 필요

2.2.6 공기 유량 제어

공기유량 요구신호에 부응한 공기유량을 확보 최저 공기유량 제한회로 구성이 필요

2.2.7 재열증기 온도 제어

공기 유량의 demand 신호를 선행요소로 이용하여 재열기에 흡수되는 열량의 분배를 적절히 하여 제어하고 과열기 및 재열 증기간의 상호간섭을 적게 하기 위하여 아래의 방법을 고려하여야 한다.

- 공기 유량 요구 신호를 선행신호로 이용하여 연소변화가 재열증기 온도에 미치는 영향을 고려하여 damper 를 선행 제어한다.

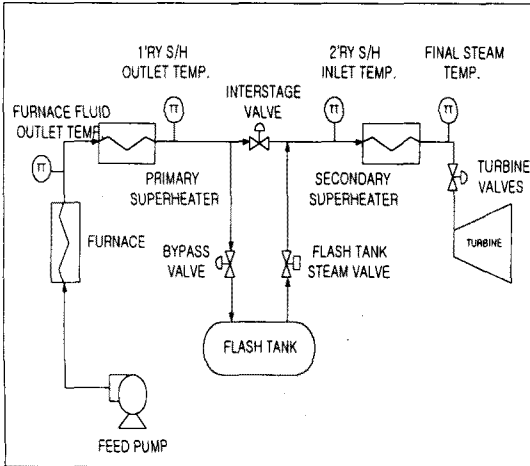
- 재열부의 상태 변화 요인인 엔탈피 편차를 과도상태의 연소를 교정신호에 보정한다.

3. State Control Observer

3.1 State Control Observer 를 이용한 온도제어

관류 보일러에서 super heater temperature 의 적정 유지는 발전 plant 의 수명에 상당한 영향을 주기 때문에 super heater temperature control 은 보일러 제어 loop 중에서 중요한 비중을 차지하고 있다. super heater temperature control 은 다른 제어계에 비하여 시정수가 크고 제어 loop 간의 상호 간섭이 많으며 특히 변압운전 plant 에서는 부하변동에 따른 변수가 많기 때문에 종래의 PID 제어로는 양호한 제어 특성을 얻기가 어려웠으나 SCO 제어는 process 의 입, 출력 변수로부터 구해진 2차 평가함수를 최소로 하는 최적제어로 이를 위하여는 다량의 data 처리가 요구되기 때문에 종래의 analog 제어시스템에서는 적용이 곤란하였으나 1980년대에 들어 micro-processor 에 의한 digital 분산제어 system 이 발전 plant 에 적용되기 시작함으로써 SCO 채택이 가능하게 되었다.

Once-Through Boiler Operation



〈그림 3.1 관류형 보일러의 제어 시스템 구성도〉

그림 3.1 은 관류형 보일러의 전체 제어 시스템 구성도로써 저 부하 및 정상상태에서 기본적인 사항을 나타냈다.

3.2 State Control Observer 의 특징

PID 제어이론은 process 를 전달함수에 의해 표현하였으나 state control 은 상태변수를 상태 방정식으로 나타낸다. 따라서 프로세스를 다입력, 다출력으로 다룰 수가 있으며 PID 제어계는 주파수 영역에 따른 설계 개념을 갖고 있으나, SCO 는 시간 영역에 따른 설계 개념을 갖고 있다.

또한 SCO 는 상태량과 조작량의 비중을 고려한 장래 어느 시간의 평균치를 목적함수로 설계, 이를 최소로 하기 위한 적정한 feed back 량을 구하여 제어한다.

PID 제어계는 주로 피제어량의 목표치와의 편차에 주목하여 feed back 량을 결정하는데 비해 state control 에서는 피제어량 뿐만 아니라 system 상태를 표시하는 내부변수 및 예측값을 상태변수 vector 에 포함하여 이것에 최적 조작 gain 행렬을 가하여 조작량을 결정한다.

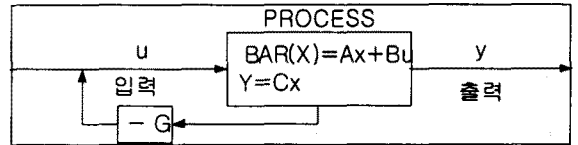
3.3 State Control Observer 의 개념

x 를 Process 내부상태를 나타내는 변수로 하고 Process 입력을 u , Process 출력을 y 라고 하면 상태 방정식 및 출력 방정식은

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

이 Process 를 제어하기 위하여 상태변수 x 에 Gain 을 가하여 조작입력 u 를 만들면 아래와 같다.



- A : 계행렬 X : 상태변수 Vector
- B : 제어행렬 U : 조작변수 Vector
- C : 출력행렬 Y : Process 변수 Vector

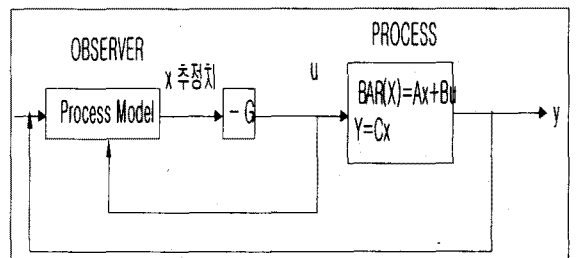
여기서 최적 Feed Back Gain 을 구하기 위한 상태변수 x 와 조작입력 u 에 관한 2차 형식의 평가함수 J 를 도입하면

$$J = \int_0^{\infty} (x'Qx + u'Ru)dt \quad (Q, R \text{ 비중 선택계수})$$

- x' : x 의 전치 vector
- u : u 의 전치 vector

state control 은 위 식의 평가함수 J 가 가장 적게 되는 모양의 gain 행렬 G 를 선택한 feed back 제어계를 말한다. 그러나, 될 수 있는 한 적은 입력과 가능한 빠르게 하는 것은 서로 상반된 요구이므로 그 어느 쪽을 중시하느냐에 따라 Q 와 R 의 크기가 결정된다.

위의 제어계에서는 상태변수가 직접 얻는 것으로 구성되어 있으나 일반적으로 그것을 직접 측정할 수 없기 때문에 process model 을 도입하고 그 model 에 process 의 입, 출력을 얻어 상태변수 x 를 추정해서 사용한다.



digital 제어계에서는 연속적으로 표현하지 않고 분산치로서 취급하므로 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$x(n+1) = \Phi \cdot x(n) + \Psi \cdot u(n)$$

$$y(n) = cx(n)$$

Ψ : 상태추이 행렬

Φ : 제어추이 행렬 (조작행렬)

$$J_1 = \sum_{i=1}^{\infty} (x'(i)Qx(i) + u(i-1)Ru(i-1))$$

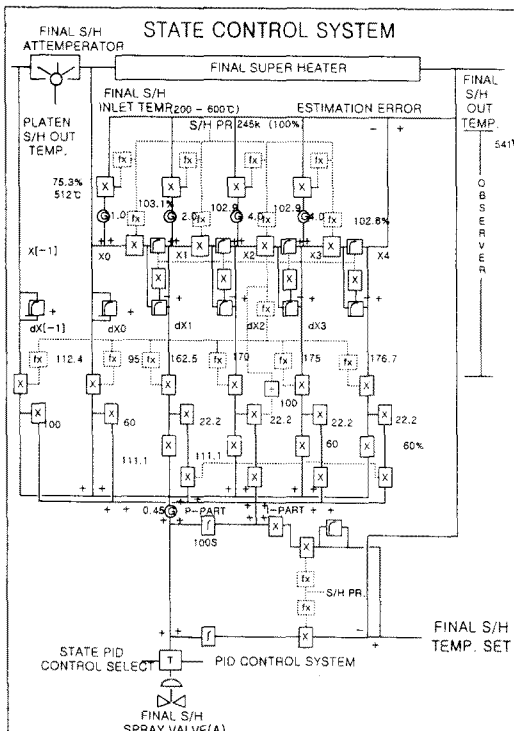
3.4 State Control Observer 의 작용

그림 3.1 은 500MW 정상운전중 주증기 압력 245 kg/cm² 일 때 각부의 Parameter 의 값을 나타낸 것으로 Final Super Heater Outlet Temperature 가

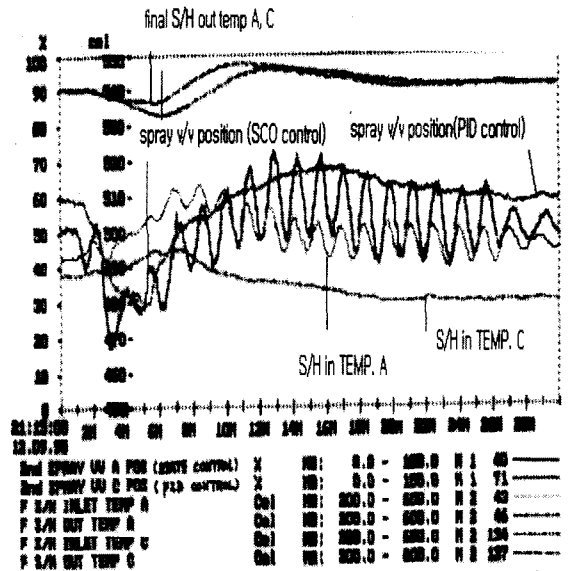
Observer Modeling 값과 같을 경우 Estimation Error 는 0 으로 그 상태에서 평형되어 있음을 나타낸다. 이제 Final Super Heater inlet Temperature. 에 변화가 있을 경우를 들어보면 그 온도변화는 시정수 50sec, 50sec, 58sec, 50sec 의 1차 지연요소로 X1, X2, X3, X4로 전개되고 X1, X2, X3, X4 는 각각의 또다른 시정수 100sec, 500sec, 579sec, 500sec 에 의한 1차 지연 신호 X'1, X'2, X'3, X'4를 감한 일종의 Lead Signal $\Delta X1, \Delta X2, \Delta X3, \Delta X4$ 이 발생하여 Spray Valve 조작신호를 생성한다. 한편 이 과정에서 전개된(MODELING) 최종 X4 값은 Final Super Heater outlet Temperature 와 비교하여 편차 (Estimation Error) 를 반영한다. 온도변화의 Pattern 이 최초 Modeling 한 Pattern 과 일치할 경우 Estimation Error 는 0 에 근접하게 되나 온도변화의 원인에 특이한 외란 요소가 계제되어 Estimation Error 가 발생할 경우 이 성분은 Feed Back 신호로 각각의 X0, X1, X2, X3, X4 에 가감되어 재차 수정된 pattern 의 spray valve 조작신호 $\Delta X1, \Delta X2, \Delta X3, \Delta X4$ 를 생성한다. PID Control 은 상태량이 설정치 와 편차가 발생한 후에 제어신호가 발생하는데 비해 State Control 은 위와 같이 상태량이 설정치로부터 편차가 나기 전에 이를 예측한 선형제어를 하기 때문에 제어특성이 개선된다.

3.5 부하에 따른 Parameter 갱신

그림 3.5.1 에서 정격부하, 정격압력 상태의 Parameter 를 나타냈으나 실제로는 부하에 따라 동특성이 크게 다르기 때문에 제어에 사용하는 상태 방정식과 Gain 행렬을 항상 부하에 적합하게 할 필요가 있다. 보통은 2~3개의 기준 부하대에 System Identification 을 행하여 상태 방정식과 Gain 행렬개수를 만들어 선형보간법에 따라 부하에 적합한 계수행렬을 계산하여 사용한다. 태안화력의 Modeling 기준 부하대는 200, 350, 500MW 로 주증기 압력에 의한 Gain 및 Time Scheduling 을 요소요소에 가하고 있다.



〈그림 3.5.1 State Control System〉



〈그림 3.5.2 SCO 와 PID Control trend〉

4. 결 론

프로세스에서의 현저한 시간지연은 제어에 있어서 어려움을 초래하며, 시스템의 성능 저하의 원인이 되고 있다. 이러한 프로세스의 시간지연을 극복하고자 발전소에 채택된 제어기의 구조가 기존의 제어기에 state control observer 를 결합한 형태이다. state control observe 채용한 PI 제어기가 부하 외란 응답에 훨씬 좋은 반응을 보이며, 제어기 파라미터 값을 줄이고, 정확한 modeling 을 함으로서 그림 3.5.2에서 보는 바와같이 control 빠르게 응답함을 알 수 있다. 그러나 이 제어기를 채택함에 있어서 먼저 정확한 modeling 이 필요하다.

〈참 고 문 헌〉

- (1) Be'la G Lipta'k "Process Control", Instrument en Handbook pp1060-1062, 1995[3]
- (2) Williams Levine "The Control", Handbook PP60 1996
- (3) 태안 화력발전소 운전지침서 한국전력공사 pp50-198, 19
- (4) Katsuhiko Ogata, "Discrete-Time Control Sys Printice-Hall International Editons, pp199-204, 1987[
- (5) 보일러 자동제어 한국전력공사 pp103-198, 1995
- (6) C.C.Hang, K.J.Astrom and W.K.Ho, "Refinements Ziegler-Nichols tuning formula", IEE Proceedings- D 138, No. 2, March, pp111-118, 1991