

## Generic Model Control에 의한 화력발전소의 주증기 온도제어기 설계

조영춘\* 남해곤  
전남대학교 전기공학과

이광식 윤성훈  
삼성중공업 기계사업본부

### Main Steam Temperature Controller Design of a Fossil Power Plant by Generic Model Control

Y.C. Cho\* H.K. Nam  
Dept. of Electrical Engineering,  
Chonnam National University

K.S. Lee S.H. Yoon  
Power & Process Plant Div.  
Samsung Heavy Industries Co.

#### Abstract

A nonlinear process-model based control for main steam temperature control of a 100MW oil-fired drum-type fossil power plant is developed and its performances are compared to those of the conventional PID control. The process model for simulation is derived based "first principle approach" and is validated in steady and transient conditions. The model is in good agreements with the field test data. Performances of the nonlinear PMBC for main steam temperature control are far superior to those of PID in all aspects for the disturbances of ramp increase in load and step change in fuel Btu value.

#### 1. 서론

급속한 경제성장과 소득수준의 향상으로 전력소비량은 급증하고 있다. 따라서 부족자원이 빈약한 우리나라에서는 안정적인 전력에너지 공급을 위하여 기지부하의 역할을 원자력 발전설비가 담당하는 정책을 추진하고 있다. 원자력 발전설비의 증가로 인하여 기존의 화력 발전설비는 중간부하 또는 peak부하 조정용으로 사용됨으로서, 급격한 부하변동률로 신속한 부하증증을 하여야 하고 더 나아가 일부 발전소는 일간/주간 기동정지 운전을 하여야 한다. [1]

이처럼 화력발전에 가해지는 가혹한 운전조건은 프로세스 변수들을 설정치로부터 뛰어나가며 변동이 심하여 설비의 파괴현상을 가속시켜 발전소 수명을 단축시킬 수 있다. 특히 제어기의 성능이 불량할 경우 프로세스 변수와 제어입력이 과다하게 변하고 불편요한 전동을 유발하여 피로현상과 수명단축을 가속시킨다. 특히 최종 열교환기의 출구 온도변화는 열교환기의 블로우 및 파이프는 물론 터빈 casing, blade 및 밸브등에 열 스트레스를 가하여 발전소 수명에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 제작자들은 최종 열교환기의 온도변화를 제한하고 있으며 증기 온도 제어는 매우 중요하다 하겠다.[3]

현재 화력발전 설비의 제어는 주로 선형제어기인 PID와 feedforward 신호를 결합한 Coordinated Control System (CCS)에 이루어지고 있다.[1] 이 CCS는 주로 경험과 직관에 의해 설계되고, 비교적 성능도 우수하다. 특히 CCS는 설계당시의 engineering 작업량이 적고 현장 tuning에 의하여 상대적으로 쉽게 조정작업이 이루어지는 장점때문에 발전소 제어는 물론 정화 모델을 얻는것이 어려운 프로세스 제어에서 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 CCS는 제어성능이 프로세스 및 제어기 정수의 변화에 민감한 영향을 받는 한계를 가지고 있어 성능에 제약이 있고, distillation column

제어등 고성능을 요구하는 프로세스에는 적합하지 않다.[4] 또한 비선형 프로세스 제어에 선형제어기를 사용하므로 광범위한 영역에 모두 최적으로 조정될 수 없는 단점도 있다.

CCS의 대안으로 자연스럽게 LQG등 현대 다변수 제어이론을 적용한 제어기를 고려할 수 있다. 그러나 현대제어기는 정확한 프로세스 모델을 필요로 하여 설계당시에 발전소 제어에 대한 상세한 정보를 필요로 하고 제어기 설계에 많은 engineering을 요한다. 일반적으로 대규모 플랜트는 프로세스 모델을 얻는 것이 어렵거나, 모델을 개발하더라도 그 오차가 상당히 큰 속성을 가지고 있다. 이 오차는 모델오차에 민감하지 않는 강인한 제어기를 적용하거나 설치된 후 현장에서의 tuning작업에 의해 극복할 수 있다. 그러나 새로운 제어기를 현장에 설치하는데는 무엇보다도 먼저 운전원이 이 제어기를 수용해야 하는데, 현대 제어기는 현장 tuning이 매우 어렵고 제한적인 어려움이 있다. 이 범주의 이미 상업화된 제어기로는 주증기 온도 제어기인 "State Variable Controller"(SVC)가 있으나 문헌 [3]에서 PID와 SVC의 성능을 비교한 결과 SVC가 PID보다 월등히 우수함을 보고하고 있다.

최근에 선형제어법보다는 프로세스의 비선형성을 제어에 직접 반영하는 비선형 PMBC를 개발하고자 하는 노력이 있다. 이 비선형 PMBC는 비선형 피드백, feedforward, decoupling을 제공하여 선형제어기인 PID에 비하여 광범위한 영역에서 더 우수한 제어특성을 보이며 프로세스 오차에 덜 민감한 장점을 가지고 있다.

Lee와 Sullivan은 GMC를 제안하고 이 GMC가 모델링 오차에 민감하지 않음을 보였다.[2] Riggs등은[4] 프로세스 제어에서 난제로 남아온 distillation column 제어, 폐수의 pH 제어, 유량제어등에 GMC를 적용한 결과 제어특성이 월등히 개선됨을 보였다. 비선형 PMBC는 프로세스 모델을 필요로 하기 때문에 아직 일반화 되지는 못하였으나 근사프로세스 모델이 개발된 프로세스에 응용되면 제어특성이 대폭개선될 가능성이 있음을 알수 있다.

Honeywell 연구진과 Riggs등은 EPRI 프로젝트로[3] McDonald등이 개발한 드럼형 250 MW급 Cromby 2호기 모델에 주증기 온도 제어용 PID, SVC, 비선형 PMBC를 설계하여 성능을 비교한 결과 PMBC가 월등히 우수함을 보고하고 있다. 그러나 Cromby 2호기는 이미 퇴역된 구형의 발전설비이고 모델도 초기의 것이어서 실용화를 위해선 보다 정교한 모델에 적용할 필요가 있고 Riggs등은 열전달 모델로 선형관계식을 사용하였기 때문에 성능개선의 여지가 있다 하겠다.

본 논문에서는 100MW 드럼형 화력발전소의 제어기 설계 및 성능 평가를 위해 개발된 신뢰도 높은 모델[5] GMC에 의한 주증기 온도 제어기를 설계하여 PID 제어기, 문헌[3]에서 제안했던 PMBC 제어기와 비교하였다.

## 2. 프로세스 모델링

본 논문에서 비선형 PMBC 주증기 온도제어기 성능평가에 사용된 발전소는 100 MW급 유류/가스 연소 드럼형 열병합 발전소이고, 그 비선형 프로세스 모델은 아래와 같은 "first principle approach"를 사용하여 개발되었다.[5]

### 1. 물리법칙

- a. 질량보존의 법칙
- b. 에너지 보존의 법칙
- c. 관성보존의 법칙

### 2. 열 상태 방정식

- a. 물/증기의 열 상태 방정식 (steam tables)
- b. 공기/연소기계의 열상태 방정식

### 3. 열 전달 법칙

- a. 복사 열 전달
- b. 대류 열 전달

이 모델은 정상상태 및 과도상태에서 현장의 시험데이터와 비교 검증되었는데 모델의 드롭수위가 현장 실측치보다 약간 큰 진폭과 큰 주기를 가지고 진동하는 것의 원인에는 현장 실측치와 거의 일치하여 제어기 설계에 적합한 것이다.

## 3. Generic Model Control

### 3.1 GMC에 의한 주증기온도 제어기 설계

지금까지 제안된 비선형 PMBC중 실용화하기 쉬운 방법이 Lee와 Sullivan에 의해 개발된 GMC이다.[2] 먼저 GMC를 간단히 설명하기 위해서 상태변수와 출력변수가 동일하고 프로세스 모델이 다음과 같이 상미분방정식으로 기술된다고 하자.

$$\dot{y} = f(y, d, u) \quad (1)$$

위에서  $y$ 는 상태변수이자 출력변수이고,  $d$ 는 측정가능한 외란,  $u$ 는 입력변수이다.

Lee와 Sullivan은 프로세스 변수  $y$ 를 현재 값  $y_o$ 에서 설정치  $y_{sp}$ 로 이동시키고자 할 때 GMC 제어법칙을 다음과 같이 정의 하였다.

$$f(y_o, u, d_o, u) + K_1(y_o - y_{sp}) \quad (2)$$

$$+ K_2 \int_0^t (y - y_{sp}) dt = 0 \quad (2)$$

여기서  $K_1$ 은 비례제어 정수로서 반응속도를 결정하는 tuning parameter이고 폐루프 시정수의 역수이다. 그리고 적분항은 zero offset을 제거하기 위한 적분제어기이며  $K_2$ 는 적분이득이다. GMC는 식(2)를 만족하는 제어입력  $u$ 를 구하는 문제로 요약된다. 모델식의 변수 또는 파라미터는 제어입력  $u$ 에 종속될 수 있으므로, 제어입력  $u$ 를 결정하는 것은 연립 비선형 연립방정식을 푸는 문제로 귀착된다.

그림1은 spray가 행해지는 최종과열기의 블럭선도를 보여주고 있다.

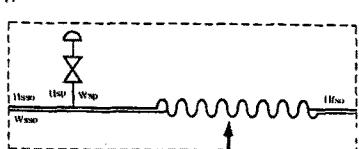


그림 1. 최종과열기의 블럭선도

이 최종 열교환기의 지폐방정식은

$$M_{fs} C_{fs} \frac{dT_{fso}}{dt} = Q_{fs} + W_{ss} H_{ss} + W_{sp} H_{sp} - (W_{ss} + W_{sp}) H_{fso} \quad (3)$$

$Q_{fs}$ : 연소가스에서 최종과열기의 증기로 전달된 열유량

$M_{fs}$ : 최종 과열기의 등가 질량

$C_{fs}$ : 과열기 류브금속 비열

$T_{fso}$ : 최종 과열기 출구의 증기온도

$T_{so}$ : 2차 과열기 출구의 증기온도

$H_{fso}$ : 최종 과열기에서의 열량

$H_{sp}$ : spray water 엔탈피

$H_{ss}$ : 2차 과열기 출구에서의 엔탈피

$W_{ss}$ : 최종 과열기 출구에서의 증기 유량

$W_{sp}$ : 조절기에서의 spray water 유량

spray유량을 결정하기 위해서 식(3)에 GMC 제어법칙을 적용하면

$$\frac{Q_{fs} + W_{ss} H_{ss} + W_{sp} H_{sp} - (W_{ss} + W_{sp}) H_{fso}}{C_{fs} M_{fs}} + K_1(T_{fso} - T_{so}) + K_2 \int_0^t (T_{fso} - T_{so}) dt = 0 \quad (4)$$

주증기 온도제어를 위한 GMC구조에 대한 블럭선도는 다음과 같다.

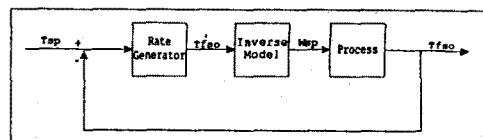


그림 2. GMC block diagram

Riggs등은 열전도율을 다음 선형식으로 가정하고 정상상태에서의 에너지 balance식에 의해 열전도율을 계산함으로서 offset 오차를 보상하고자 하였다.

$$Q_{fs} = h_T (T_{gasg} - T_{fawg}) \quad (5)$$

여기서  $T_{gasg}$ 는 열교환기의 배기기계평균온도이며  $T_{fawg}$ 는 열교환기내의 증기평균온도이다. 이 선형열전달식은 부하변동시 모델오차를 상당량 포함할 수 있으므로 본 연구에서는 열전달식을 본래 대류 열전달식에 충실한

$$Q_{fs} = K_{fs} W_{fs}^{0.6} (T_{gasg} - T_{fawg}) \quad (6)$$

를 사용하여 GMC구조를 개선하였다. Riggs등은 offset 오차제거에 정상상태에서 열전도계수를 매번 계산하는 수동적인 방법을 취하였고 이 방법은 offset 오차교정이 느릴 염려가 있다. 본 연구에서는 식(4)처럼 적분제어기를 도입하여 좀더 능동적으로 offset 오차에 대처하였다.

### 3.2 제어기 정수의 설정

최종 과열기에서 정상상태 에너지 보존법칙을 이용해 열전달 계수를 구하면

$$h_C = \frac{Q_{fs}}{W_{fs}^{0.6} (T_{gasg} - T_{fawg})} \quad (7)$$

여기서

$$Q_{fs} = (W_{ss} + W_{sp}) H_{fso} - W_{ss} H_{ss} - W_{sp} H_{sp} \quad (8)$$

제어기에서 사용되는  $h_T$ 는  $h_C$ 를 아래 식과 같이 필터링해서 결정하였다.

$$h_T = f h_C + (1 - f) h_T \quad (9)$$

그림 3은 제어기 설계에서 센서, actuator의 반응속도, 페루프의 시정수, sampling time 등이 만족하야 할 조건을 보여주고 있다. 본연구에서는 sampling interval time을 1초, 센서 및 actuator인 spray control 밸브는 시정수가 5초이내로 가정하고, 페루프의 시정수가 약 10초가 되도록  $K_1, K_2$ 를 설정하였다.  $K_1, K_2$ 에 PMBC에서 조정을 요하는 필터링 계수  $f$ 는 정수가 약 1000초가 되도록 설정하였다.

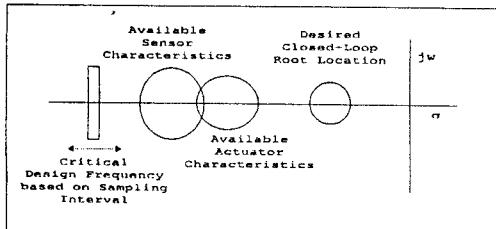


그림 3. Hardware Constraints in Terms of Overall Control System Bandwidth

#### 4. 제어성능 평가

PMBC의 제어성능을 객관적으로 평가하기 위해서, 비선형 PMBC 주증기온도 제어기를 시험대상 발전설비에 설치되어 있는 PID 주증기온도 제어기와 비교하였다. simulation에서 PID는 발전소에 설치되어 있는 제어기를 그대로 이용했으며, PMBC는 Riggs가 제안한 구조와 본 논문에서 제안한 구조를 같이 시험하였다. 성능평가는 다음과 같은 제어성능 평가지표를 사용하였다.

##### \* 제어성능 평가지표

절대오차 적분치 : Integral absolute error (IAE)

자승오차 적분치 : Integral square error (ISE)

최대편차 : Maximum deviation from set point (MD)

그림 4는 부하를 50MW에서 75MW로 분당 7MW 증가시킨 경우에 PID, Riggs등이 제안한 PMBC, 그리고 본연구에서 개선한 PMBC를 simulation 결과를, 표 1은 평가지표를 보여주고 있다. 그럼에서 PID 제어기를 사용할 경우 온도가 설정치로부터 약 30°의 이산되어 서서히 설정치에 접근하는 반면, PMBC는 온도를 설정치에 거의 정확히 유지하고 있음을 알 수 있다. Riggs등이 제안한 PMBC는 (그림에서 “개선전”으로 표기됨) 논문에서 제안한 PMBC는 (그림에서 “개선후”으로 표기됨) 개선전의 것이 작은 진폭으로 진동하는 문제점이 있고 개선후는 전혀 진동이 없는 것을 제외하고는 성능상에 큰 차이는 없었다.

그림 5는 연료의 열량을 5% 감소시켜 프로세스 모델에 부정확하도록 한 외란을 simulation 한 결과이다. PID 제어기의 경우 온도가 약 10° 설정치로부터 이산된 것을 제외하면 부하를 증가시킬 경우와 동일한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

표 1은 위의 외란들과 각 제어기의 경우에 제어성능 평가지표를 계산한 결과인데, PMBC가 PID에 비하여 월등히 우수하고, Riggs등이 제안한 PMBC보다 본연구에서 개선한 PMBC가 진동을 제거함으로서 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

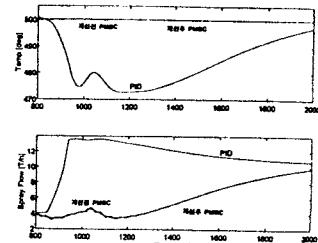


그림 4. Simulation Results for Ramp Load Increase

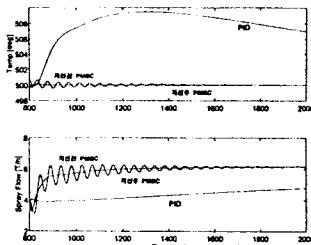


그림 5. Simulation Results for 5% Change in Fuel Heat Value

부하변화 (50MW에서 75MW로 증가)			
지표	PID	개선전	개선후
IAE	19404.04	50.48	19.217
ISE	19381.62	32.03	14.48
MD	27.359	0.176	0.106
연료열량 변화 (5% 감소)			
지표	PID	개선전	개선후
IAE	9537.66	115.68	5.39
ISE	9355.33	11.46	0.028
MD	9.46	0.648	0.195

표 1. 제어성능 평가지표

#### 5. 결론

100 MW급 드럼형 열병합 화력발전소의 비선형 프로세스 모델을 개발하고 PMBC 주증기 온도 제어기를 설계하여 그 성능을 시험하였다. 부하변동과 연료의 열량을 변화시켜 PID, Riggs등이 제안했던 PMBC, 그리고 본 연구에서 개발한 PMBC의 성능을 비교한 결과 본연구에서 제안한 PMBC가 월등히 우수함을 확인하였다. 향후 연구과제는 드럼수위와 증기압력제어에도 비선형 PMBC를 적용하여 발전소의 제어성능을 개선하며 실용화를 위해서 다양한 외란에 대하여 신뢰도를 검증하는 것이다.

#### 참고문헌

- Hae-Kon Nam, "Modeling and Control System Design Study of A Coal Fired Power Plant", PhD Thesis, The university of Texas at Austin, 1986. 8.
- P. L. Lee and G. R. Sullivan, "Generic Model Control (GMC)", Computer and Chemical Engineering, No.12, pp.573, 1988
- EPRI Final Report TR-100342, "Comparison of Advanced Steam Temperature Control Algorithms for Fossil Fuel Fired Utility Power Plants", Project 2710-13, MAY 1992
- J.B. Riggs and J. Watts, "Model-based Control Streamlines Process," Control, 1991. 7.
- 남 해근, 최 병환, 이 광식, 윤 성훈, "Power Plant Modeling and Simulation", 삼성중공업 과제완료 보고서 903B-378, 1994. 2.