

비선형 PMBC에 의한 드럼형 열병합발전소 제어

조영춘 · 남해곤 · 이광식* · 윤성훈*

전남대학교 전기공학과, *삼성중공업 기계사업본부

Nonlinear Process Model Based Control of Drum-type Cogeneration Power Plant

Young Chun Cho, Hae Kon Nam, Kwang Sik Lee* and Sung Hoon Yoon*

Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

*Power & Process Plant Division Samsung Heavy Industries Co.

요 약

100 MW급 유류 연소 드럼형 열병합발전소의 주증기온도와 드럼수위 제어를 위한 비선형 PMBC를 개발하고 그 성능을 PID 알고리즘과 비교하였다. "first principle" approach를 사용하여 개발된 프로세스 모델은 정상상태와 과도상태에서 그 정확도를 현장의 데이터와 비교, 검증한 것으로 제어기 성능 평가와 설계에 적합한 정교한 것이다. PMBC와 PID 제어의 성능을 부하증가와 연료의 열량변화 등의 외란에 비교한 결과, PMBC가 PID에 비하여 속응성, 절대오차 적분치, 제어노력 등에서 월등하게 우수한 것을 확인하였다.

Abstract—Nonlinear process-model based controls (PMBC) are developed for control of main steam temperature and drum level of a 100 MW drum-type oil-fired power plant. The process model is derived using the "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 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. 서 론

급속한 경제성장과 소득수준의 향상으로 전력소비량은 급증하고 있다. 부존자원이 빈약한 우리나라에서는 안정적인 전력에너지 공급을 위하여 기저부하의 역할을 원자력 발전설비가 담당하고 화력발전설비는 중간부하 또는 peak부하 조정용으로 사용하는 정책을 추진하고 있다. 따라서 화력발전설비는 급격한 부하변동으로 신속한 부하추종을 하여야 하고 더 나아가 일부 발전소는 일간/주간 기동정지 운전을 하여야 한다¹⁾. 산업사회가 고도화되면서 고품질의 전력수요가 요구되고 최근의 에너지 절약 및 환경기준의 강화, 발전원가의 상승과 투자비의 증가 등은 화력발전의 고효율 운전과 개선된 프로세스 제어를 필요로 하고 있다.

화력발전에 가해지는 가혹한 운전조건은 프로세스 변수들을 설정치로부터 離散시키고 제어입력의 변동이

심하여 설비의 피로현상을 가속시켜 발전소 수명을 단축시킬 수 있다. 특히 제어기의 성능이 불량할 경우 프로세스 변수와 제어입력이 과다하게 변하고 불필요한 진동을 유발하여 피로현상과 수명단축을 가속시킨다. 드럼수위 제어기의 성능이 불량할 경우 드럼수위가 과다하게 변하여 발전소를 정지시킬 수 있어 전력의 안정적인 공급에 지장을 초래할 수 있다. 또한 최종열교환기의 출구온도 변화는 열교환기의 튜브 및 파이프는 물론 터빈 casing, blade 및 발브 등에 열 스트레스를 가하여 발전소 수명에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 제작자들은 최종 열교환기의 온도변화를 아래와 같이 엄격하게 제한하고 있으며 드럼수위와 증기온도 제어는 양질의 전력공급에 매우 중요하다 하겠다²⁾.

• 평균 증기온도는 정격 증기온도(보통 1000°F)보다 크지 않을 것.

• 증기온도는 비정상적인 조건을 제외하고는 정격온도

를 넘지 않을 것.

- 정격온도를 25°F 이상 초과하지 않고 정격온도를 초과하는 시간이 연간 400시간 이하일 것.

- 정격온도를 50°F 초과하는 시간이 연간 80시간 이내이고, 한번의 swing 동안은 15분을 초과 하지 않을 것.

현재 화력발전설비의 제어는 주로 선형제어기인 PID와 feedforward 신호를 결합한 Coordinated Control System (CCS)에 이루어지고 있다¹⁾. 이 CCS는 주로 경험과 직관에 의해 설계되고 성능도 비교적 우수하다. 특히 CCS는 설계당시의 engineering 작업량이 상대적으로 적고 현장 tuning에 의하여 조정작업이 이루어지는 장점 때문에 발전소 제어는 물론 정확한 모델을 얻는 것이 어려운 프로세스 제어에서 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 CCS는 제어성능이 프로세스 및 제어기 정수의 변화에 민감한 영향을 받고, 비선형 프로세스 제어에 선형제어기를 사용하므로 광범위한 운전영역에 모두 최적으로 조정될 수 없는 단점이 있다²⁾.

CCS의 대안으로 자연스럽게 LQG 등 현대 다변수 제어이론을 적용한 제어기를 고려할 수 있다. 그러나 현대 제어기는 정확한 프로세스 모델을 필요로 하여, 모델개발에 프로세스에 대한 상세한 정보를 필요로 한다. 일반적으로 대규모 플랜트는 프로세스 모델을 얻는 것이 어렵거나, 모델을 개발하더라도 그 오차가 상당히 큰 속성을 가지고 있다. 이 모델오차는 강인한 제어기를 적용하거나 설치된 후 현장에서의 tuning작업에 의해 극복할 수 있다. 새로운 제어기를 현장에 설치하는 데는 무엇보다도 먼저 운전원이 이 제어기를 수용해야 하고, 운전원은 직관에 기초한 제어기 구조를 선호하는 경향이 있다³⁾. 그러나 현대제어기는 현장 tuning이 매우 어렵고 제어기를 직관적으로 이해하기 어려운 어려움이 있다. 발전소 제어에 상업화된 현대제어기로는 주증기 온도 제어기인 "State Variable Controller"(SVC)가 있으나 문헌⁴⁾에서 PID와 SVC의 성능을 비교한 결과 SVC가 PID보다 월등히 우수하지는 않았음을 보고하고 있다.

최근에 선형제어 법칙보다는 프로세스의 비선형성을 제어에 직접 반영하는 비선형 PMBC를 개발하고자 하는 노력이 있었는데, generic model control (GMC)⁵⁾, nonlinear internal model control (NLIMC)⁶⁾, nonlinear predictive model control (NLPMC)⁷⁾이 이 범주에 속한다. 이들 비선형 PMBC간에는 성능의 차이는 크지 않으며, offset를 처리하는 방법에서 큰 차이를 보이고 있다. 이 비선형 PMBC는 비선형 피드백, feedforward, decoupling을 제공하며 선형제어기인 PID에 비하여 광범위한 영역에서 더 우수한 제어특성을 보이고, 모델오차에 덜 민감한 장점을 가지고 있다.

비선형 PMBC는 프로세스 모델을 필요로 하기 때문에

아직 일반화 되지는 못하고 있으나, 프로세스 제어에서 난제로 남은 distillation column 제어, 폐수의 pH 제어⁸⁾, 유량제어 등에 성공적으로 적용되어 근사모델이 개발되면 제어특성이 월등히 개선될 수 있음을 알 수 있다. Honeywell 연구진과 Riggs 등은 EPRI 프로젝트⁹⁾ 드림형 250 MW급 Cromby 2호기 모델에 주증기온도 제어용 PID, SVC, 비선형 PMBC의 성능을 비교한 결과 PMBC가 월등히 우수하여 발전설비의 제어에 적합함도 보였다.

이와 같이 성능개선의 잠재력이 높은 PMBC를 발전설비의 제어에 실용화를 위해선, Cromby 2호기는 이미 퇴역된 구형의 발전설비이고 모델도 초기의 것이어서 보다 정교한 모델에 적용할 필요가 있고, Riggs 등은 선형 열전달식을 사용하였기 때문에 성능개선의 여지가 있다 하겠다. 열병합발전은 발전용에 비하여 프로세스용 증기추기가 외란으로 추가되므로 보다 나은 성능의 제어기를 필요로 한다. 본 논문에서는 100 MW급 드림형 열병합 화력발전소의 제어기 설계 및 성능 평가를 위해 개발된 신뢰도 높은 모델에¹⁰⁾ GMC에 의한 주증기 온도 제어기를 설계하여 PID 제어기, Riggs 등이 제안했던 PMBC 제어기와 비교하였으며, GMC에 의한 드림수위 제어기를 설계하여 선형제어기인 PID제어기와 비교하였다.

2. 프로세스 모델링

본 논문에서 시험대상으로 선정한 발전소는 광양제철소 발전설비 제 7,8호기의 100 MW급 유류/가스 연소 드림형 열병합발전소로서 Fig. 1은 급수 및 증기 계통도를 Fig. 2는 공기 및 가스 계통도를 나타내고 있다.

프로세스 모델의 지배방정식 유도에 사용한 법칙은 다음과 같다.

1. 물리법칙
 - a. 질량 보존의 법칙
 - b. 에너지 보존의 법칙
 - c. 관성 보존의 법칙
2. 열 상태 방정식
 - a. 물/증기의 열상태 방정식 (steam tables)
 - b. 공기/연소개스의 열상태 방정식
3. 열 전달 법칙
 - a. 복사 열 전달
 - b. 대류 열 전달

이와 같이 "first principle" approach에 의해 개발된 16차의 비선형 프로세스 모델은 다음과 같은 형태로 요약된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, w) \\ g(x, u, w) &= 0 \\ y &= h(x, u, w) \end{aligned}$$

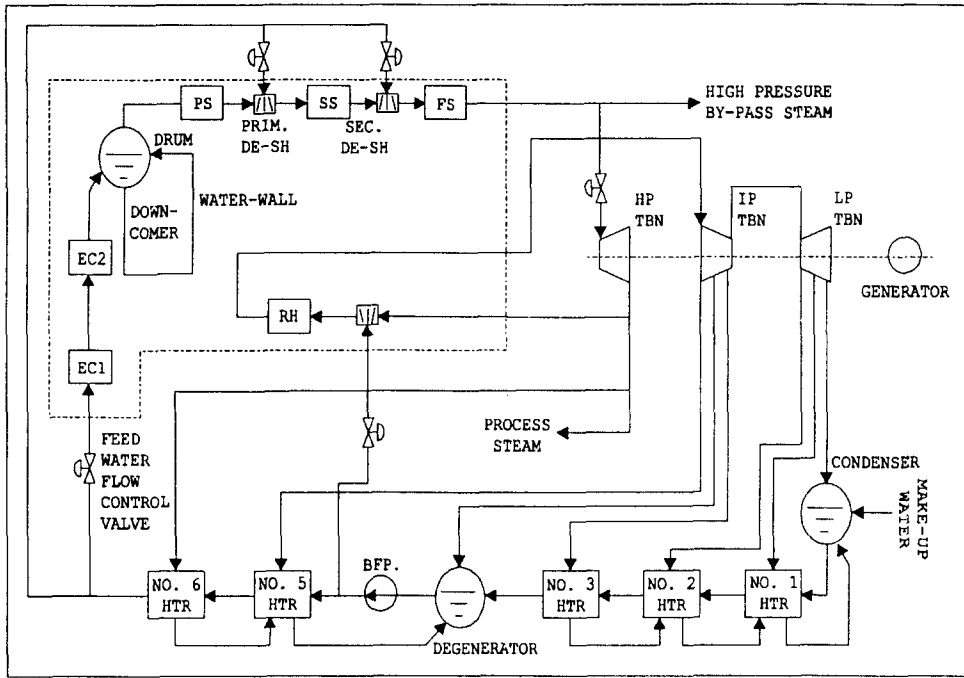


Fig. 1. Water/Steam system.

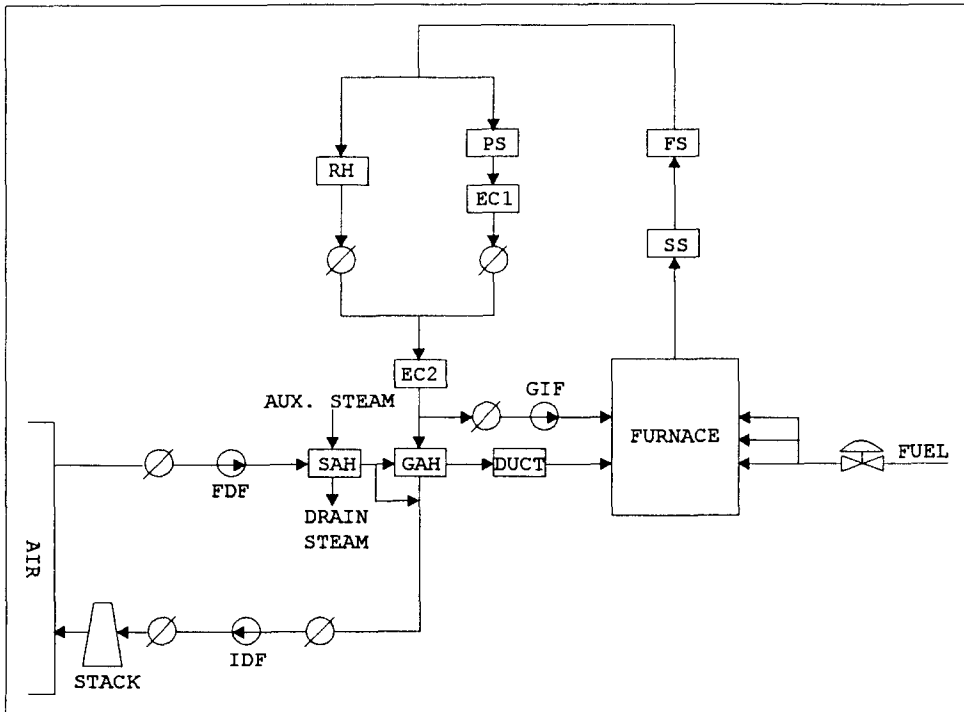


Fig. 2. Air/Gas system.

- 여기서, f : process state equations
- g : algebraic process equations
- h : output equations
- x : state vector
- u : control vector
- w : implicit parameter vector

위와 같이 개발된 프로세스 모델은 정상상태와 과도 상태에서 그 정확도를 현장의 데이터와 비교하여 검증된 것이다¹⁰⁾. 정지 상태의 모델 검증은 드림수위를 설정치로 유지시키기 위해 급수제어 루프만을 페루프로 구성하고, 다른 제어루프들은 개루프 상태로 유지시켜(연료, 공기 등의 모든 보일러 입력량은 일정값으로 유지) 이에 따른 보일러의 출력을 현장에서의 시험 결과와 비교하는 것으로 보일러 및 터빈의 기계적인 모델의 代數的 정확성을 검토했다. 과도 상태의 모델 검증은 모든 제어루프를 페루프로 구성하고 발전기 출력을 변화시키거나 운전모드를 변화시키면서 각 주요요소의 과도적 변화추이를 현장결과와 비교 검증하였다. 그 결과 드림수위만이 simulation 결과가 현장 시험 데이터보다 약간 수위가 크게 변동하나 그 외의 변수들은 만족스럽게 일치하여 모델의 정확성을 확인하였다.

3. Generic Model Control

지금까지 제안된 비선형 PMBC중 실용화하기 쉬운 방법이 Lee와 Sullivan에 의해 개발된 GMC이다¹²⁾ 먼저 GMC를 간단히 설명하기 위해서 상태변수와 출력변수가 동일하고 프로세스 모델이 다음과 같이 상미분방정식으로 기술된다고 하자.

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

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

Lee와 Sullivan은 프로세스 변수 y 를 현재 값 y_0 에서 설정치 y_{sp} 로 이동시키고자 할 때 GMC 제어법칙을 다음과 같이 정의하였다.

$$f(y_0, u, d_0, k) + K_1(y_0 - y_{sp}) + K_2 \int_0^t (y - y_{sp}) dt = 0 \tag{2}$$

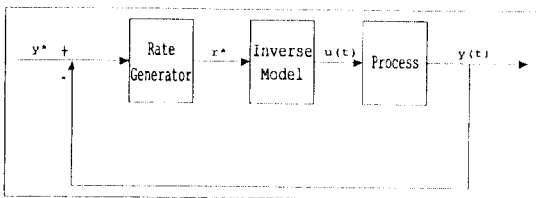


Fig. 3. GMC block diagram.

여기서 K_1 는 비례제어 정수로서 반응속도를 결정하는 tuning parameter이고 페루프 시정수의 역수이다. 그리고 적분항은 zero offset를 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 결정하는것은 비선형 연립방정식을 푸는 문제로 귀결된다. Fig. 3은 GMC 구조에 대한 블록선도를 나타내고 있다.

4. GMC에 의한 주증기 온도 제어기 설계

Fig. 4는 spray가 행해지는 최종 열교환기의 블록선도를 보여주고 있다.

이 최종 열교환기의 지배방정식은

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

여기서, Q_{fs} : 연소가스에서 최종과열기의 증기로 전달된 열유량

M_{fs} : 최종 과열기의 등가 질량

C_{pm} : 과열기 튜브급속 비열

T_{fso} : 최종 과열기 출구의 증기온도

T_{favg} : 최종 과열기 연소개스의 평균온도

T_{favg} : 최종 과열기 내의 증기 평균온도

H_{fso} : 최종 과열기에서의 열량

H_{sp} : spray water 엔탈피

H_{sso} : 2차 과열기 출구에서의 엔탈피

W_{fso} : 최종 과열기 출구에서의 증기 유량

W_g : 연소가스 유량

W_{sp} : 조절기에서의 spray water 유량

spray 유량을 결정하기 위해서 식 (3)에 GMC 제어법칙을 적용하면

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

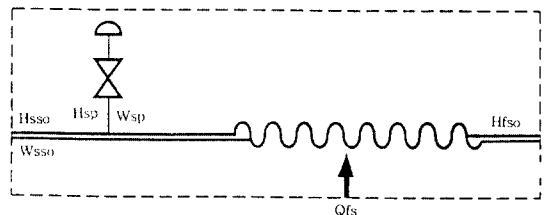


Fig. 4. Final superheater block diagram.

Riggs 등은 열전도율을 다음 선형식으로 가정하고 정상상태에서의 에너지 balance식에 의해 열전도율을 계산함으로써 offset 오차를 보상하고자 하였다.

$$Q_{fs} = h_r (T_{gavg} - T_{fsavg}) \quad (5)$$

여기서 T_{gavg} 는 열교환기의 배기가스 평균온도이며 T_{fsavg} 는 열교환기내의 증기평균온도이다.

이 선형 열전달식은 부하변동시 모델오차를 상당량 포함할 수 있으므로 본 연구에서는 열전달식을 본래 대류 열전달식에 충실한

$$Q_{fs} = K_{fs} W_g^{0.6} (T_{gavg} - T_{fsavg}) \quad (6)$$

를 사용하여 GMC구조를 개선하였다. Riggs 등은 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.

5. GMC에 의한 드럼수위 제어기 설계

Fig. 5는 드럼, downcomer, waterwalls 계통의 구성도를 보여주고 있다.

드럼 계통에서의 지배방정식은

$$\frac{d}{dt} (V_{drw} D_{drw} + V_{drs} D_{drs}) = W_{cci} - W_{drs} \quad (7)$$

여기서,

$$W_{cci} = W_{bfp} - W_{pds} - W_{sds} - W_{rds} \quad (8)$$

- V_{drw} : 드럼내의 물의 체적 [m³]
- V_{drs} : 드럼내의 증기의 체적 [m³]
- D_{drw} : 드럼내의 물의 밀도 [kg/m³]
- D_{drs} : 드럼내의 증기의 밀도 [kg/m³]

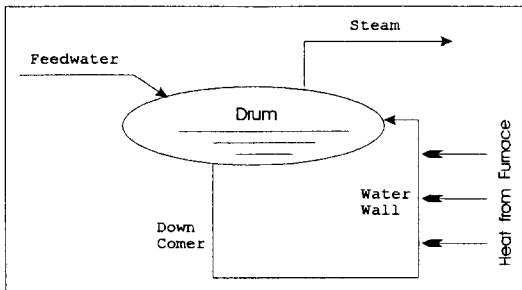


Fig. 5. Drum, downcomer, waterwalls system.

- W_{cci} : Economizer 출구의 water
- W_{drw} : 1차 열교환기로 들어가는 Steam
- W_{bfp} : Boiler feedwater pump 출구의 Water
- W_{pds} : 1차 열교환기 출구에서의 spray water
- W_{sds} : 2차 열교환기 출구에서의 spray water
- W_{rds} : 재열기 출구에서의 spray water
- L_{dr} : 드럼 수위

또한 드럼수위 계통에서 밀도의 변화율에 의해 저장되는 질량은 상대적으로 체적의 변화율에 의해 저장되는 질량에 비해 무시할 수 있으므로 다음과 같이 가정한다.

$$\frac{d}{dt} (D) = 0 \quad (9)$$

따라서,

$$\frac{d}{dt} V_{drw} = \frac{W_{bfp} - W_{pds} - W_{sds} - W_{rds} - W_{drs}}{D_{drw} - D_{drs}} \quad (10)$$

출력 변수인 드럼 수위에 대한 상태방정식은

$$\frac{d}{dt} L_{dr} = \frac{dL_{dr}}{dV_{drw}} \frac{dV_{drw}}{dt} = K_{ldr} \frac{dV_{drw}}{dt} \quad (11)$$

급수량을 제어하기 위해서 식 (11)에 GMC 제어법칙을 적용하면

$$K_{ldr} \frac{W_{bfp} - W_{pds} - W_{sds} - W_{rds} - W_{drs}}{D_{drw} - D_{drs}} + K_1 (L_{dr} - L_{sp}) + K_2 \int_0^t (L_{dr} - L_{sp}) dt = 0 \quad (12)$$

6. 제어기 정수의 설정

Fig. 6은 제어기 설계에서 센서, actuator의 반응속도, 펌프의 시정수, sampling time 등이 만족하여야 할 조건을 보여주고 있다.

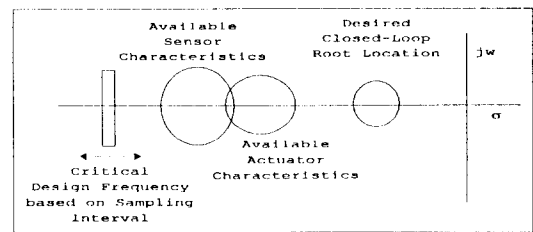


Fig. 6. Hardware constraints in terms of overall control system bandwidth.

본 연구에서는 sampling interval time을 1초, 센서 및 actuator인 spray control 밸브와 유량 제어 밸브는 시정수가 5초 이내로 가정하고, 주증기온도와 드럼수위는 페르투프의 시정수가 약 10초가 되도록 K_1 , K_2 를 설정하였다.

최종 열교환기에서 정상상태 에너지 보존법칙을 이용해 열전달 계수를 구하면

$$h_c = \frac{Q_{fs}}{W_g^{0.6}(T_{gavg} - T_{fsavg})} \quad (13)$$

여기서,

$$Q_{fs} = (W_{sso} + W_{sp})H_{fs0} - W_{sso}H_{sso} - W_{sp}H_{sp} \quad (14)$$

제어기에서 사용되는 h_r 는 h_c 를 아래 식과 같이 필터링해서 결정하였다.

$$h_r = fh_c + (1-f)h_r \quad (15)$$

K_1 , K_2 외에 주증기 온도 제어기인 PMBC에서 조정을 요하는 필터링 계수 f 는 필터의 시정수가 약 1000초가 되도록 설정하였다.

7. 제어성능 평가

PMBC의 제어성능을 객관적으로 평가하기 위해서 시험대상 발전설비에 설치되어 있는 PID 제어기와 비교하였으며 성능평가에는 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)

7-1. 주증기 온도 제어기

Simulation에서 PID는 발전소에 설치되어 있는 제어기를 그대로 이용했으며, PMBC는 Riggs가 제안한 구조와 본 논문에서 제안한 구조를 같이 시험하였다

Fig. 7은 부하를 800초에서 50 MW에서 75 MW로 분당 7 MW 증가시킨 경우에 PID, Riggs 등이 제안한 PMBC, 그리고 본 연구에서 개선한 PMBC의 simulation 결과를, Table 1은 평가지표를 보여주고 있다. 그림에서 PID 제어기를 사용할 경우 온도가 설정치로부터 약 30°C 이산되어 서서히 설정치에 접근하는 반면, PMBC는 온도를 설정치에 거의 정확히 유지하고 있음을 알 수 있다. Riggs 등이 제안한 PMBC와(그림에서 "개선전"으로 표기됨) 본 논문에서 제안한 PMBC는(그

림에서 "개선후"으로 표기됨) 성능상에 큰 차이는 없으나 개선전의 것이 작은 진폭으로 진동하는 문제점이 있고 개선후는 전혀 진동이 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 연료의 열량을 5% 감소시켜 프로세스 모델이 부정확하도록 한 외란을 800초에서 가하여 simulation한 결과이다. PID 제어기의 경우 온도가 설정치로부터 약 10°C 이산되고 매우 느리게 설정치로 수렴하는데 비하여, PMBC는 온도를 거의 설정치에 유지하고 있다. 개선전의 PMBC는 부하증가의 경우에 비하여 온도와 spray 유량이 상당한 진폭으로 진동하고 있음도 알 수 있다.

Table 1은 위의 외란들과 각 제어기의 경우에 제어성능 평가지표를 계산한 결과인데, PMBC가 PID에 비하여 월등히 우수하고, Riggs 등이 제안한 PMBC보다 본 연구에서 개선한 PMBC가 진동을 제거함으로써 상당히

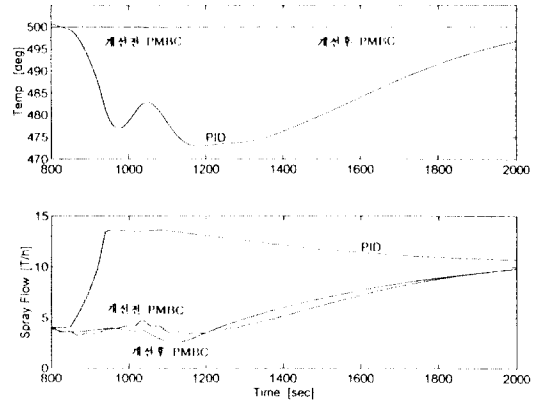


Fig. 7. Simulation results of PID and PMBC temperature controllers for Ramp Load Increase.

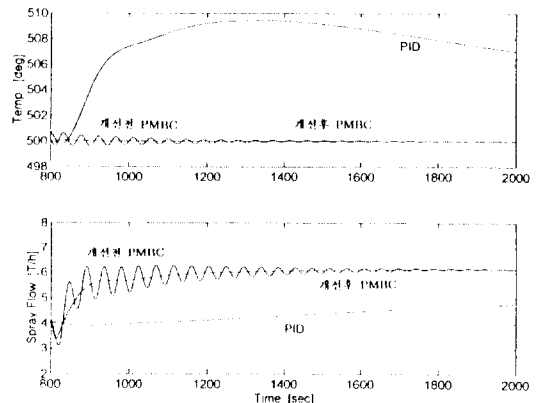


Fig. 8. Simulation results of PID and PMBC temperature controllers for 5% change in fuel heat value.

Table 1. Performance indices of PID and PMBC main steam temperature control.

Load Increase from 50 MW to 75 MW, 7 MW/min			
performance Index	PID	PMBC Before Improved	PMBC After Improved
IAE	19404.04	50.48	18.23
ISE	19381.62	32.03	14.467
MD	27.359	0.176	0.107
5% Reduction in Fuel Heat Value			
Performance Index	PID	PMBC Before Improved	PMBC After Improved
IAE	9537.66	115.68	4.947
ISE	9355.33	11.46	0.023
MD	9.46	0.648	0.14

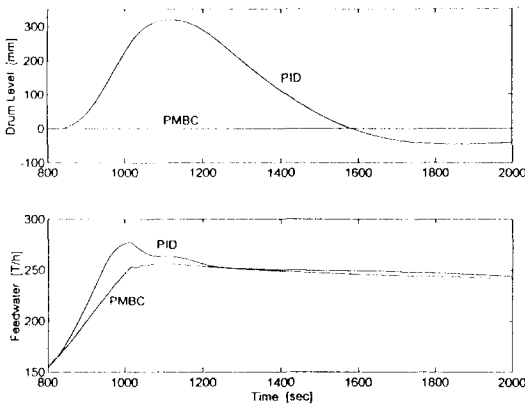


Fig. 9. Simulation results of PID and PMBC drum level controllers for Ramp load increase.

개선되었음을 알 수 있다.

7-2. 드럼 수위 제어기

Fig. 9는 부하를 50 MW에서 75 MW로 분당 7 MW 증가시킨 경우에 PID와 본연구에서 제안한 PMBC의 simulation 결과를, Table 2는 평가지표를 보여주고 있다. 그림에서 PID 제어기를 사용할 경우 드럼수위가 설정치로부터 큰 진폭을 가지고 약 350 mm 이산되어 서서히 설정치에 접근하는 반면, PMBC는 드럼수위를 설정치에 거의 정확히 유지하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 연료의 열량을 5% 감소시킨 경우의 결과로서 PID 제어기의 경우 드럼수위가 약 10 mm정도 설정치로부터 이산되어 서서히 설정치로 접근하는 반면

Table 2. Performance indices of PID and PMBC drum level control.

Load Increase from 50 MW to 75 MW, 7 MW/min		
Performance Index	PID	PMBC
IAE	137650	22.89
ISE	107719	0.12
MD	319	0.64
Load Increase from 50 MW 75 MW, 7 mW/min		
Performance Index	PID	PMBC
IAE	4864.85	6.85
ISE	3228.59	0.011
MD	9.49	0.26

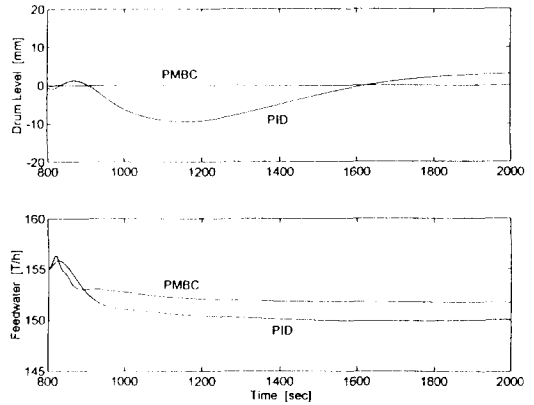


Fig. 10. Simulation results of PID and PMBC drum level controllers for 5% change in fuel heat value.

PMBC는 정확히 설정치를 유지하고 있음을 알 수 있다. Table 2는 제어성능 평가지표를 계산한 결과인데, PMBC가 PID에 비하여 월등히 우수함을 보여주고 있다.

8. 결 론

100 MW급 드럼형 열병합 화력발전소의 비선형 프로세스 모델을 개발하고 PMBC 주증기 온도 제어기와 드럼수위 제어기를 설계하여 그 성능을 시험하였다. 주증기온도 제어기의 경우 부하변동과 연료의 열량을 변화시켜 PID, Riggs 등이 제안했던 PMBC, 그리고 본 연구에서 개발한 PMBC의 성능을 비교한 결과 본 연구에서 제안한 PMBC가 월등히 우수함을 확인하였다.

또한 드럼수위 제어기의 경우에도 PMBC가 PID에 비하여 월등히 우수함을 확인하였으며 향후 연구과제는 증기압력제어에도 비선형 PMBC를 적용하여 발전소의 제어성능을 개선하며 실용화를 위해서 다양한 외란에 대하여 신뢰도를 검증하는 것이다.

참고문헌

1. Hae-Kon Nam: "Modeling and Control System Design Study of A Coal Fired Power Plant", PhD Thesis, The university of Texas at Austine, (1986. 8.)
2. P.L. Lee and G.R. Sullivan: "Generic Model Control (GMC)", Computer and Chemical Engineering, (12), 573 (1988).
3. C.G. Economou, M. Morari, and B.O. Palsson: Internal Model Control. 5. Extension to Nonlinear Systems, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., (25), (1986).
4. J.R. Parish and C.B. Brosilow: Nonlinear Inferential Control, AIChE J., (34), (1988).
5. EPRI Final Report TR-100342, "Comparison of Advanced Steam Temperature Control Algorithms for Fossil Fuel Fired Utility Power Plants", Project 2710-13, MAY (1992).
6. J.B. Riggs and J. Watts: "Model-based Control Streamlines Process," Control, (1991. 7.)
7. G.L. Williams, R.R. Rhinehart, and J.B. Riggs: In-Line Process Model Based Control of Wastewater pH Using Dual Base Injection, Ind. Eng. Che. Res., 29(7), (1990).
8. R.R. Rhinehart and J.B. Riggs: "Process Control Through Nonlinear Modeling, Control," (1990. 7.).
9. A.M. Henson and D.E. Seborg: "Extension of Non-linear Coupling Methods to Include Feedback Linearization", Paper 1444A, presented at the 1989 AIChE Annual Meeting, San Francisco, CA, November (1989).
10. 남해근, 최병환, 이광식, 윤성훈, "Power Plant Modeling and Simulation", 삼성중공업 과제완료 보고서 903B-378, (1994. 2).
11. B.A. Lundberg and L.W. Bezanson, "Enhanced Robustness of Generic Model Control Using Derivative Feedback", Chemical, Bio and Materials Engineering, 36(2), February (1990).
12. personal discussion with J.B. Riggs.