

열병합발전소 主蒸氣溫度 제어를 위한 비선형 PMBC

조영준* 남해곤
전남대학교 전기공학과

이광식 윤성훈
삼성중공업 기계사업본부

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.

요약

100 MW급 유류연소 드럼형 열병합발전소의 주증기온도 제어를 위한 비선형 process model based control (PMBC)을 개발하고 그 성능을 PID 알고리즘과 비교하였다. 비선형 PMBC에서는 프로세스의 메커니즘을 비교적 충실히 반영하는 모델이 필요한데, 사용된 모델은 first principle approach를 사용하여 개발된 것으로 제어기 성능 평가와 설계에 적합한 정교한 것이다.

비선형 PMBC는 비선형 피드백, feedforward, decoupling을 제공하고 분산제어에 적합하면서 모델링 오차에 민감하지 않은 장점이 있다. PMBC와 PID 제어의 성능을 부하증가와 연료의 열량변화등의 외란에 비교한 결과, PMBC가 PID에 비하여 속응성, 절대오차 적분치, 제어노력등에서 월등하게 우수한 것을 확인하였다.

1. 서론

기저부하로 운전되는 원자력 발전설비의 증가로 화력발전설비는 급격한 부하변동으로 부하추종 운전을 해야되고 더 나아가 일간/주간 기동정지등 운전 pattern의 변화를 필요로 하고 있다. 이와같이 화력발전에 가해지는 가혹한 운전조건은 프로세스 변수들을 과다하게 설정치로부터 離散시키고 제어입력의 변동이 심하여 설비의 피로현상을

가속시켜 수명을 단축시킨다. 특히 최종 열교환기의 출구온도 변화는 열교환기의 튜브는 물론 터빈과 파이프에 열 스트레스를 가하여 발전소 수명에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 제작자들은 최종 열교환기의 온도변화를 제한하고 있으며 주증기 온도제어는 매우 중요하다 하겠다. 여기에 최근의 에너지 절약 및 환경기준의 강화, 발전원가의 상승으로 인한 고효율 운전의 필요성, 투자비의 증가등은 화력발전의 보다 개선된 프로세스 제어를 필요로 하고 있다.

화력발전설비는 비선형 프로세스인데 제어는 선형제어기인 PID와 feedforward 신호에 의해 이루어지고 있어, 제어성능이 프로세스 및 제어기 정수의 변화에 민감한 영향을 받는 한계를 가지고 있다.

최근 비선형 프로세스 모델을 직접 사용하고, 현대제어 알고리즘을 그 일부로서 포용하며 실용화하기 쉬운 generic model control (GMC) 구조를 개발하고자 하는 노력이 있다.^[3] 이 process model based control (PMBC)은 모델의 오차와 제어기 정수의 변화에 민감하지 않으면서 양호한 제어특성을 보여주는데, distillation 제어^[6], 廢水의 pH 제어^[7], 유량제어등^[8] 성공적으로 응용되었다. Riggs등은^[4] McDonald등이 개발한 250 MW급 Cromby 2호기 모델에 주증기 온도제어용 PID, state variable control, PMBC를 적용하여 성능을 비교한 결과 PMBC가 가장 우수한 것으로 평가하였다. 그러나 Cromby 2호기는 이미 퇴역된 구형의 발전설비이고 모델도 초기의 것이어서 실용화를 위해선 보다 정교한 모델에 적용할 필요가 있다.

본 논문에서는 100 MW 드럼형 열병합발전소의 제어기 설계 및 성능평가를 위해 개발된 신뢰도 높은 모델에^[5] 주증기온도 제어를 위한 PMBC를 개발하고 PID 알고리즘과 비교하였다.

2. 프로세스 모델

시험대상으로 선정된 발전소는 삼성중공업이 제작한 100 MW급 유류연소 드럼형 열병합발전소로서, 모델의 지배방정식 유도에 사용한 법칙은 다음과 같다.

1. 물리법칙

- a. 질량 보존의 법칙
- b. 에너지 보존의 법칙
- c. 운동량 보존의 법칙

2. 열상태방정식
 - a. 물/증기의 열상태방정식 (steam tables)
 - b. 공기/연소가스의 열상태방정식
3. 열전달 법칙
 - a. 복사 열전달
 - b. 대류 열전달

위와같이 "first principle" approach에 의해 개발된 16차의 비선형 프로세스 모델은 정상상태와 과도상태에서 그 정확도를 현장의 데이터와 비교하여 검증된 것이다.^[5] 정상상태의 모델 검증은 드럼 수위를 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. 과도상태의 모델검증은 모든 제어루프를 페루프로 구성하고 발전기 출력을 변화시키거나 운전모드를 변화시키면서 각 주요 요소의 과도적 변화추이를 현장결과와 비교, 검증하였다. 그 결과 드럼 수위만이 simulation 결과가 현장 시험데이터보다 약간 수위가 크게 변동하나 그 외의 변수들은 만족스럽게 일치하여 모델의 정확성을 확인하였다.

3. Process Model Based Control

3.1. PMBC를 적용한 주증기온도 제어

문제를 간단히 하기 위해서 출력변수와 상태변수가 동일하고, 프로세스 모델이 다음과 같이 상미분방정식으로 기술된다고 하자.

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

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

Lee와 Sullivan은^[3] 프로세스 변수 y 를 현재 값 y_o 에서 y_{sp} 로 이동시키고자 할 때, GMC 제어법칙을

$$f(y_o, u, d_o, k) + K_1 (y_o - y_{sp}) + K_2 \int_0^t (y - y_{sp}) dt = 0 \quad (1)$$

로 정의하고, 이 GMC는 모델의 오차와 제어기 정수의 변화에 민감하지 않으면서 양호한 제어특성을 가짐을 보였다.

최종 과열기에 에너지 보존법칙을 적용하면

$$M_{fs} C_{pm} \frac{dT_{fso}}{dt} = Q_{fs} + W_{sso} H_{sso} + W_{sp} H_{sp} - (W_{sso} + W_{sp}) H_{fso} \quad (2)$$

$$Q_{fs} = K_{fs} W_g^{0.6} (T_{gavg} - T_{fso}) \quad (3)$$

Q_{fs} : 연소가스에서 최종과열기의 증기로 전달된 열유량

M_{fs} : 최종 과열기의 등가 질량

C_{pm} : 과열기 튜브금속 비열

T_{fso} : 최종 과열기 출구의 증기온도

T_{sso} : 2차 과열기 출구의 증기온도

T_{gavg} : 최종 과열기 연소가스의 평균온도

T_{fso} : 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 (2)에 GMC 제어법칙을 적용하면

$$\frac{Q_{fs} + W_{sso} H_{sso} + W_{sp} H_{sp} - (W_{sso} + W_{sp}) H_{fso}}{C_{pm} M_{fs}} + K_1 (T_{fso} - T_{sp}) + K_3 \frac{dT_{fso}}{dt} = 0 \quad (4)$$

여기서 열전달은 문제를 간단히 하기 위하여 식 (3)대신에 식(5)의 선형 열전달식을 사용하였다.

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

식 (4)의 GMC 제어법칙에서 온라인으로 열전달계수 h_T 를 계산하므로 프로세스와 모델간의 편차가 제거되어 적분항을 생략하고, 그대신 제어특성을 개선하기 위해서 미분항이 첨가되었다.

3.2. PMBC 제어기 정수의 조정

최종 과열기에서 정상상태 에너지 보존법칙을 이용해 열전달 계수를 구하면

$$h_C = \frac{Q_{fs}}{(T_{gavg} - T_{fsavg})} \quad (6)$$

여기서

$$Q_{fs} = (W_{ss0} + W_{sp}) H_{fs0} - W_{ss0} H_{ss0} - W_{sp} H_{sp} \quad (7)$$

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

$$h_T = f h_C + (1 - f) h_T \quad (8)$$

PMBC 제어기에서 조정되는 파라미터는 K_1, K_3 , 필터링 계수 f 이다.

그림 1은 50MW에서 75MW로 분당 7MW로 부하를 증가시킬 때, K_1 의 변화에 대한 절대오차 적분값 IAE의 크기를 보여주고, 그림 2는 K_1 을 최적값에 설정한 후 K_3 의 변화에 대한 IAE의 변동을 보여주고 있다.

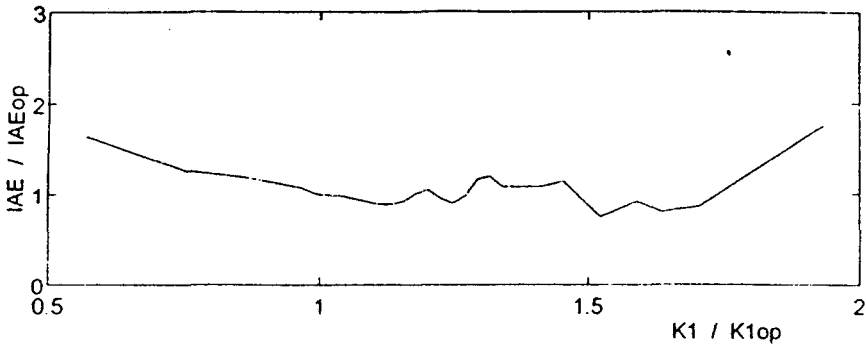


Fig. 1. Sensitivity to Tuning Gain K_1 in PMBC Algorithm

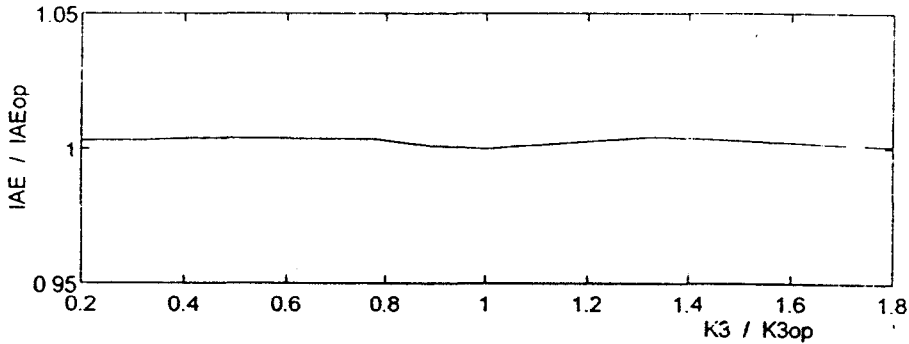


Fig. 2. Sensitivity to Tuning Gain K_3 in PMBC Algorithm

3.3. PMBC와 PID 제어성능 비교

PMBC와 PID제어기의 성능을 객관적으로 비교 평가하기 위해 simulation에서 PID 이득은 기존 발전소의 것을 이용했으며 PMBC의 이득은 그림 1과 2에서 IAE 지표를 최적으로 하는 K_{1opt} , K_{3opt} 로 결정하였다.

그림 3과 4는 각각 외란으로서 부하를 50MW에서 75MW로 분당 7MW로 증가시킬 경우와 부하변동없이 연료의 열량을 5% 감소시킬 경우에 PMBC와 PID 제어기를 simulation한 결과를 보여주고 있다. 평가지표로는 IAE 외에 자승오차 적분치 (ISE),

설정치로부터의 최대편차 (MD)를 사용하였는데 두 경우 모두 PMBC의 IAE, ISE는 PID의 2% 이하이고, PMBC의 MD 값은 PID의 7%이하로 PMBC의 성능이 월등히 우수함을 알 수 있다 .

그러나 PMBC는 성능평가 지표에서는 우수하나 작은 진폭으로 진동하는 경향이 있어 이의 개선이 필요하고 실용화를 위해선 보다 폭 넓은 범위의 외란에 대해서 시험하는 것이 필요하다 하겠다.

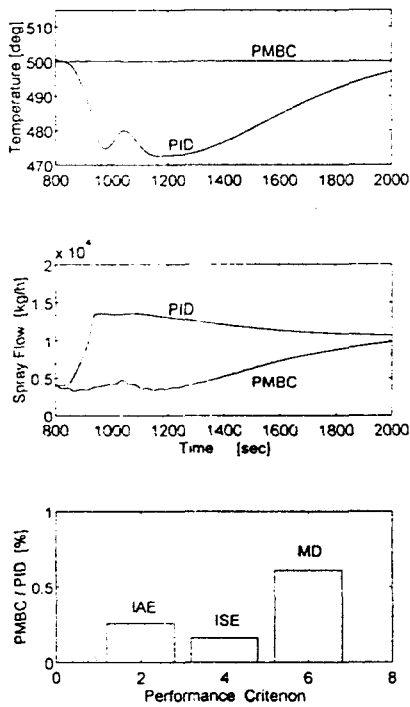


Fig. 3. Simulation Results of PID and PMBC for Ramp Load Increase

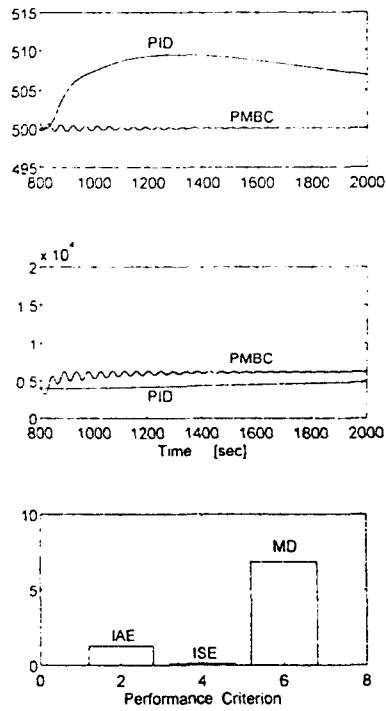


Fig. 4. Simulation Results of PID and PMBC for 5% Change in Fuel Heat Value

4. 결론

물리적 법칙에 의해 100 MW급 드럼형 열병합발전소의 비선형 모델을 개발하고 PMBC 주증기온도 제어기를 설계하여 그 성능을 시험하였다. 부하변동과 연료열량을 변화시켜 PMBC가 PID의 성능평가 지표를 비교한 결과 PMBC의 성능이 월등히 우수하였다. 또한 비선형 PMBC는 비선형 피드백, feedforward, decoupling을 제공하고 분산제어에 적합하면서 모델링 오차에 민감하지 않은 장점이 있다. 향후 연구과제로는 PMBC에서 사용한 모델구조를 개선하여 성능을 더욱 향상시키고, 실용화에 앞서 다양한 외란에 대해서 시험하여 신뢰도를 검증하며 다변수 제어에 확장 적용하는 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. Babcock and Wilcox, Modular Modeling System, A Code for The Dynamic Simulation of Fossil and Nuclear Power Plants, Computer Code Manual, March 1985
3. P. L. Lee and G. R. Sullivan, "Generic Model Control (GMC)", Computer and Chemical Engineering, No.12, pp.573, 1988
4. EPRI Final Report TR-100342, "Comparison of Advanced Steam Temperature Control Algorithms for Fossil Fuel Fired Utility Power Plants", Project 2710-13, MAY 1992
5. 남 해곤, 최 병환, 이 광식, 윤 성훈, "Power Plant Modeling and Simulation", 삼성중공업 과제완료 보고서 903B-378, 1994. 2.
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., Vol. 29, No. 7, 1990
8. R.R. Rhinehart and J.B. Riggs, " Process Control Through Nonlinear Modeling, Control, 1990. 7.