

운전데이터를 이용한 보일러 연소공기용 제어기 설계 및 시뮬레이션

이찬주, 이주현 한국전력공사 전력연구원

The design and simulatoion of PID controller for primary air applied to operating data

C.J.LEE*, J.H.LEE**, Korea Electric Power Research Institute
(Tel: 042-865-5272; Fax: 042-865-5204; E-mail: young@kepri.re.kr)

PID 제어기를 이용한 피드백 제어가 공정 제어에 도입된 이래로 PID 제어 알고리즘 및 적정 파라미터 계산에 대한 연구가 계속 진행되어 왔다. 일반적으로 PID 제어기 파라미터는 제어대상 프로세스의 1차 시간지연 모델로 근사화 하여 계산하는 방법과 임계이득 및 임계주파수를 구하여 계산하는 방법이 있다. 본 논문에서는 먼저 발전플랜트의 변수들 사이의 인과관계를 표현하는 신호흐름도와 현장에서 취득한 데이터를 이용한 보일러 온도제어 계통의 모델링 및 제어기의 구성에 관하여 기술하고자 한다. 이러한 현장 운전 데이터에 의해 산출된 프로세스 모델을 이용하여 임계이득 및 임계주파수에 의한 PI 제어기의 적정 파라미터를 구하고, PI 제어기에 현장 데이터를 입력하여 컴퓨터 시뮬레이션 함으로써 프로세스 모델 및 PI 제어기의 성능을 검증하고자 한다.

1. 서론

최근 발전설비의 자동화 범위가 점차 확대되면서 발전소 운전의 핵심적인 역할을 담당하는 제어시스템의 중요성이 한층 더 강조되고 있다. 현재의 발전소 보일러 제어방식은 프로세스 성격에 따라 전체 제어루프의 상태변수들을 근간으로 세부적인 독립된 제어루프별로 제어를 시행하는 개별 루프를 채택하고 있다. 개별 제어루프간의 상

호 연결 시스템은 현재로는 상태회환으로 보완된 이득 조정과 함수 발생기 $f(x)$ 를 사용하며, 이때 최적 이득 조정이 되어 있지 않으면 개별 루프의 안정도 뿐만 아니라, 전체 제어루프의 안정도에 도 영향을 미친다. 제어기의 최적 이득 조정은 상호 연결된 출력 신호가 개별 루프에서는 오차 신호로 인식되므로 실제 오차가 발생하는 시간 지연과 크기가 고려된 가운데 조정 되어야 한다.

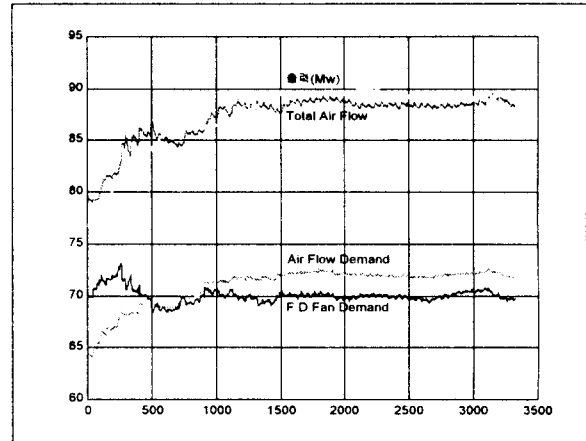
이는 대상 프로세스의 분명한 성격 규명에 의해서만 가능하며, 대상 시스템의 구조, 시간지연, 다른 루프와의 연관성 등이 고려된 최적 이득 조정이 이루어져야 한다. 현재 발전소에서 사용하는 PID제어 방식은 각 부시스템들의 상태변수, 출력변수가 다른 부시스템의 선행신호가 되거나 기준신호가 되어 피드백제어, 피드포워드 제어와 캐스캐이드 제어 등의 신호로 작용한다. 선행신호와 상태 궤환 신호는 다른 부시스템의 상태변수를 측정함에 의하여 결정되며, 상호연결 함수는 경험에 의한 함수 설정에 의해 결정된다.

본 논문에서는 화력발전소 보일러 제어시스템에 관하여 기술하고, 발전플랜트의 변수들 사이의 인과관계를 표현하는 신호흐름도와 현장에서 취득한 데이터를 이용한 보일러 온도제어 계통의 모델링 및 제어기의 구성에 관하여 기술하고, 컴퓨터 시물레이션에 의한 제어루프의 모의실험 결과를 통해 제어기의 설계와 제어루프의 효용성을 보이고자 한다.

2. 보일러 연소공기 제어 프로세스 모델링

2.1 모델링에 필요한 운전데이터 파악

공기유량 제어시스템과 관련된 운전데이터로는 보일러 및 공기유량 요구신호, 총합 공기유량 신호(Total Air Flow), 강압 송풍기 요구신호(Forced Draft Fan Demand), 총합 연료유량호를 들수 있다. 공기유량 제어시스템에서도 온도제어 시스템과 마찬가지로 단위변환을 통한 현장데이터는 <그림 1>과 같이 나타낼 수 있다.



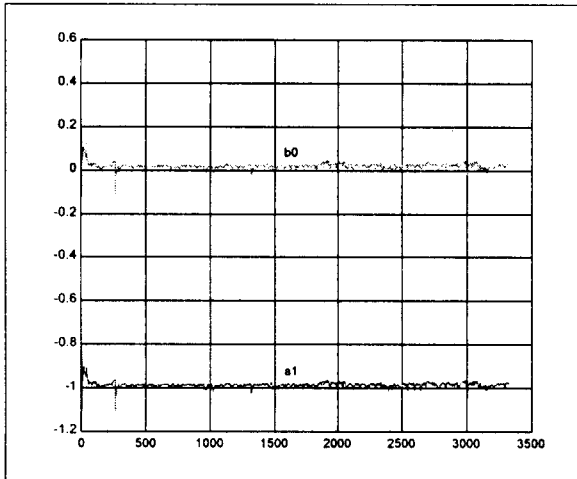
<그림 1> 공기유량 제어계통 현장 취득 데이터

2.2 연소공기 제어 계통 전달함수 모델링

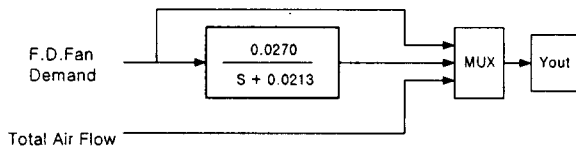
- 두 대의 강압송풍기에 의해 불어 넣어진 공기는 공기예열기를 거쳐 보일러 연소실로 들어가고, 버너에서 연소가스가 되어 보일러를 통과하며 열을 전달하고 외부로 빠져 나간다.
- 공기유량 제어기의 제어신호에 의해 강압송풍기 댐퍼의 각도를 변화시켜 입구 공기유량을 제어하게 되며, 이득은 제어신호의 변화에 의한 정상상태에서의 댐퍼 각도의 변화량이 된다.
- 공급되는 공기의 양은 연소효율을 보장하기 위해 연료량보다 일정비율 만큼 초과해서 공급하며, 보일러의 보호를 위해 연료가 공급되지 않아도 최소한의 공기량(30%)을 공급한다.

2.3 시물레이션 결과

발전기 출력이 150~250Mw로 변화할 때 공기유량 제어계통의 전달함수를 구하기 위해 RLS 알고리즘을 적용한 결과는 <그림 2>, <그림 3>과 같다.

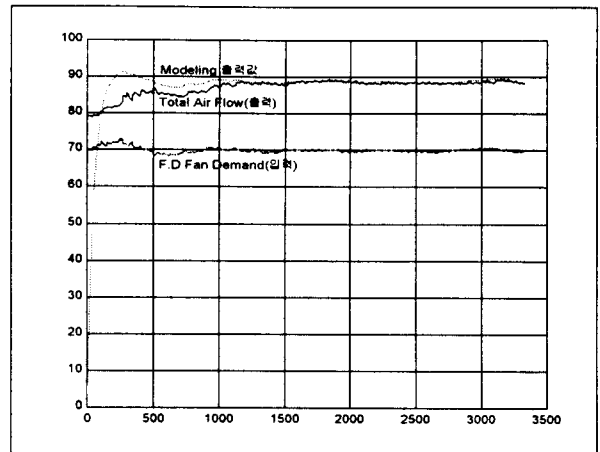


〈그림 2〉 파라미터 추정 결과값

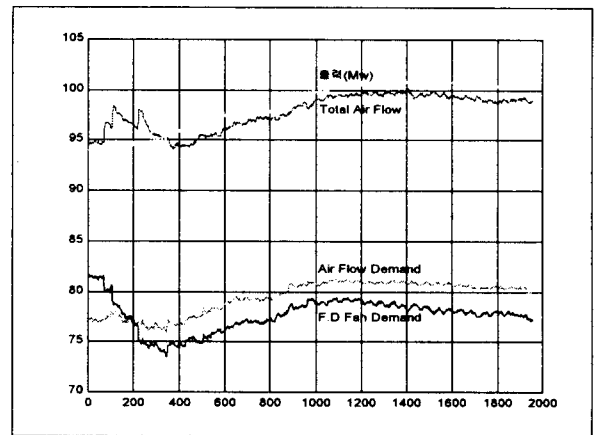


〈그림 3〉 연소용 공기 전달특성 모델 추정 결과

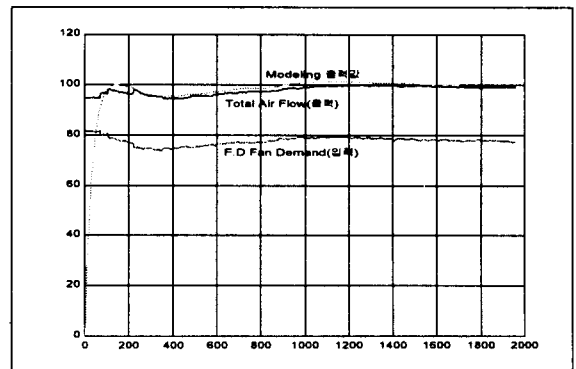
여기서 a_0, b_1 의 추정 파라미터 값은 각각 $-0.9789, 0.0267$ 이고, 이를 통해 추정한 매개변수 \hat{a}_1, \hat{b}_0 은 각각 $0.0270, 0.0213$ 이며, 〈그림 4〉에 실제값과 추정값을 보여준다. 동일한 방법으로 출력 250~280Mw로 변화할 때의 취득데이터는 〈그림 5〉와 같으며, a_0, b_1 의 추정 파라미터값과 매개변수를 통한 실제값과 추정값은 〈그림 6〉과 같다.



〈그림 4〉 공기유량 전달특성 추정 그래프



〈그림 5〉 공기유량 제어시스템 취득 데이터 (출력250~280Mw)



〈그림 6〉 공기유량 전달특성 추정 그래프 (출력250~280Mw)

- RLS 알고리즘으로 파라미터를 추정한 결과 매 시간 마다의 측정값이 다르게 나오며, 이들 값 중 평탄한 부분의 추정값을 사용한 시뮬레이션

결과를 <그림 6>에서 보여주고 있다. 결과 그래프에서 보면 일부 구간에서 약간의 오차를 보여주고 있으나, 전체 추종하는 특성은 실제값과 거의 유사한 특성을 보여주고 있다.

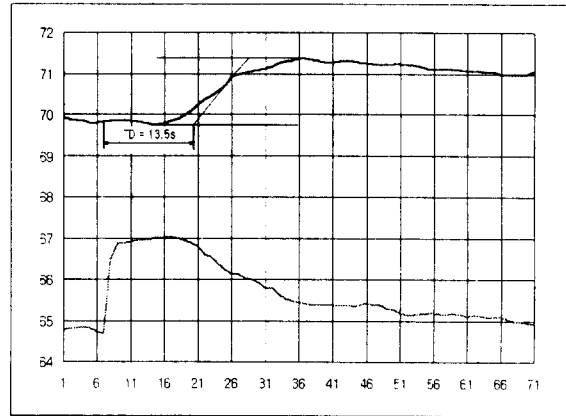
3. PI제어기 설계 및 모의 실험

PID 제어기를 이용한 피드백 제어가 공정 제어에 도입된 이래로 PID 제어 알고리즘 및 적정 파라미터 계산에 대한 연구가 계속 진행되어 왔다. 일반적으로 PID 제어기 파라미터는 제어대상 프로세스의 1차 시간지연 모델로 근사화 하여 계산하는 방법과 임계이득 및 임계주파수를 구하여 계산하는 방법이 있다. 본 절에서는 현장 운전 데이터에 의해 산출된 프로세스 모델을 이용하여 임계이득 및 임계주파수에 의한 PI 제어기의 적정 파라미터를 구하고 현장 데이터를 입력하여 모의 실험함으로써 프로세스 모델 및 PI 제어기의 성능을 검증하고자 한다.

3-1 릴레이 피드백 실험

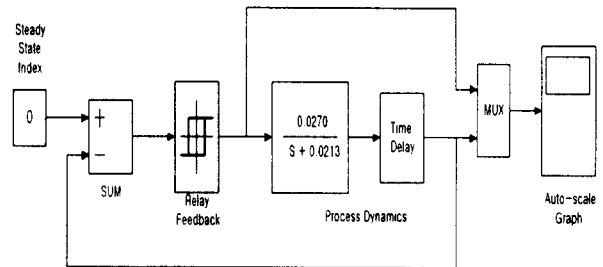
릴레이 피드백을 이용한 PID 제어기 자동동조 알고리즘은 1984년 Åström과 Hägglund에 의해 제안되었다. 보일러 연소공기 제어루프의 프로세스 모델에 릴레이 피드백을 이용하여 임계이득과 임계주파수를 구한다. FDF Vane Demand의 화가 가장 큰 구간에 대한 총 연소공기량의 변화 상태를 분석하여 <그림7>의 곡선을 얻을 수 있었고 여기에서 프로세스 시간지연(=13.5초)을 하였다. 릴레이 피드백에 이용된 보일러 연소공기 계통의 시간지연을 고려한 프로세스 전달함수는 아래와 같다.

$$G(s) = \frac{0.0270}{s+0.0323} \times e^{-13.5s}$$



<그림 7> 총 연소공기량 제어 프로세스 시간지연

상기의 전달함수를 이용하여 릴레이 입력에 대한 프로세스의 출력 변화로부터 출력 진폭(a)과 주기(Tc)를 측정하면, Nyquist 선도의 임계이득(Kc)과 임계주파수(ω_c)를 구할 수 있다. Matla과 Simulink를 사용하여 <그림 8>과 같이 회로 구성하여서 릴레이 피드백 실험을 하였다.

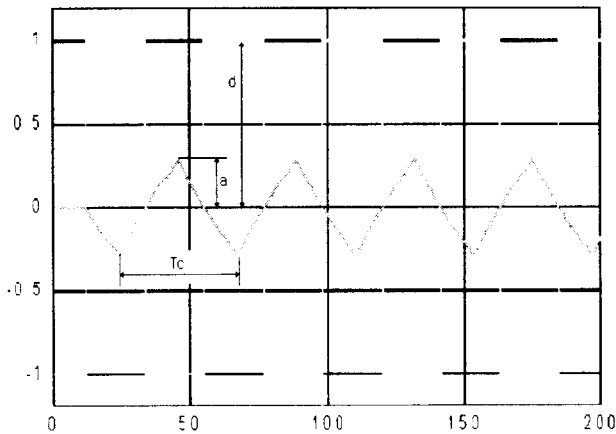


<그림 8> 릴레이 피드백 실험 블록선도

릴레이 피드백 실험으로 <그림 9>와 같은 프로세스 출력을 얻을 수 있었으며 여기에서 프로세스 출력 진폭(a)과 주기(Tc)를 측정하였다.

프로세스 출력 진폭(a) = 0.28

프로세스 출력 주기(Tc) = 43.43 sec



< 그림 9 > 릴레이 피드백 응답 곡선

또한 프로세스 출력의 진폭(a)과 주기(Tc)를 이용하여 아래의 산출식에 의해 임계이득(Kc)과 임계주파수(ω_c)를 산출하였다. 여기에서 d는 릴레이 피드백의 진폭의 크기로 그 값은 1이다.

$$\text{임계이득}(K_c) = \frac{4d}{\pi a} = 4.55$$

$$\text{임계주파수}(\omega_c) = 2\pi \frac{1}{T_c} = 0.15$$

3-2 PI 제어 파라미터 설정

Ziegler-Nichols는 1943년 PID 파라미터를 출하는 두 가지 방법을 제시하였다. 먼저 시스템의 단위계단응답을 관찰하여 그 응답곡선을 바탕으로 계산식을 유도하는 방법과 시스템의 임계이득과 임계주파수를 이용한 계산 방법을 제시하였다. 본 절에서는 Ziegler-Nichols의 임계이득 임계주파수를 이용하여 PI 제어기의 파라미터를 산출하는 방법에 대하여 살펴보고자 한다. 여기에 사용되는 PID 제어기 알고리즘으로 이상형 PID 제어기를 선정하였으며 전달함수 $G_c(s)$ 는 아래와 같다.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i} s + T_d s \right)$$

Ziegler-Nichols는 프로세스의 임계이득과 임계

주파수를 알면 아래의 <표1>의 계산식에 의해 PID 제어기의 파라미터를 산출할 수 있다고 제시하였다.

< 표 1 > 임계이득 및 임계주파수를 이용한 PID 파라미터 계산식

제어기형태	Kp	Ti	Td
P	0.5Kc	∞	0
PI	0.4Kc	0.8Tc	0
PID	0.6Kc	0.5Tc	0.12Tc

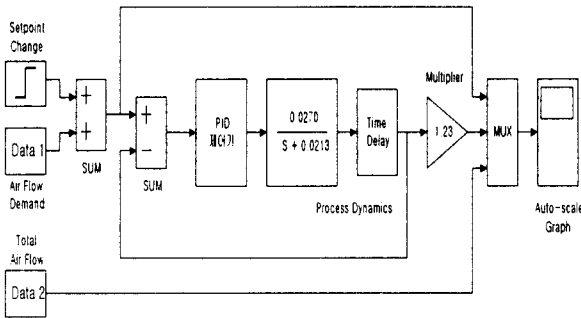
상기의 계산식으로부터 산출한 PI 제어기의 비례이득과 적분시간 파라미터는 다음과 같다.

$$\text{비례이득}(K_p) = 0.4K_c = 1.82$$

$$\text{적분시간}(T_i) = 0.8T_c = 34.75$$

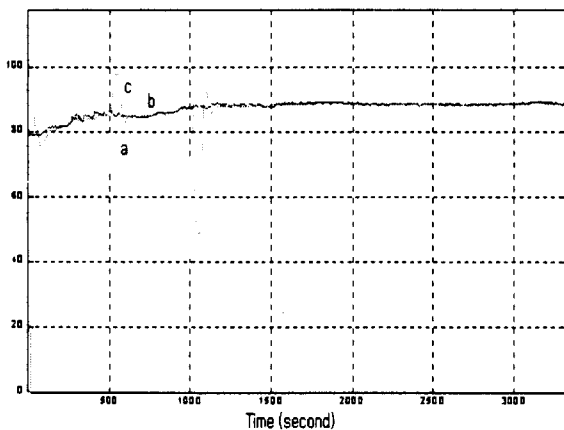
3-3. 모의 실험

Ziegler-Nichols의 주파수 응답법에 의해 산출된 PI 제어기 파라미터를 적용하고 실제 현장에서 취득한 운전자료를 입력하여 모의실험 함으로써 프로세스 모델링 및 PID 파라미터 선정의 적정성을 검증할 수 있다. 모의 실험을 위하여 <그림 10>과 같이 회로를 구성하였으며 Data1과 Data2는 현장에서 취득한 자료로써 대상발전소의 출력 150 ~ 250MW 변동 시의 Air Fl Demand와 Total Air Flow를 나타낸다. 그리 Total Air Flow와 프로세스 최종 출력값의 단위를 통일하기 위하여 프로세스 최종단을 1.23배 하였다.



〈 그림 10 〉 연소공기량 제어계통 모의실험 블럭도

연소공기량 제어 계통의 모의실험 결과는 아래의 〈그림 11〉과 같으며 여기에서 a는 연소공기 요구량, b는 총연소공기량, c는 설계된 PI 제어기를 모델링된 프로세스에 적용한 결과값을 나타낸다. 연소공기 요구량을 500ms에서 50ms동안 10% 상승시키고 1000ms에서 50ms동안 30% 하시켜 설정치 변화에 대한 제어기의 응답 특성을 살펴본 결과 오버슈트가 매우 적은 양호한 추종 제어 상태를 유지함을 알 수 있다.



〈그림 11〉 연소공기량 제어회로 모의실험 결과

4. 결론

본 논문에서는 여수화력 제1발전소의 출력변화에 따른 연소용 공기 운전데이터를 취득하고, 이를 이용하여 제어시스템을 모델링한 결과 전반적인 특성이 실제 운전데이터와 유사한 결과를

보여 주었다. 모델링 결과를 이용하여 제어기의 파라미터를 선정하여 모의실험 함으로써 프로세스에 적합한 모델링 및 제어기 설계를 검증하였다. 이 모의실험 결과를 통해 제어기의 현장 적용 시 초기값 설정에 활용 가능할 것이며 다른 제어 계통의 추가연구를 통해 안정된 보일러 제어시스템을 구축이 가능하리라 본다.

[참 고 문 헌]

- [1] Dr. Ing. Gunter Klefenz, "Automatic C of Steam Power Plants" pp.158-167, 1981
- [2] Lennart Ljung, "System Identific Toolbox for Use with MATLAB", The MAT WORKS Inc., 1993
- [3] 우주희, 김종안, 신윤오, "운전데이터에 의한 가스터빈 발전소의 연료제어 시스템 모델링", Proceedings of the 13th KACC, pp.2019-1998
- [4] 김재선, "신호흐름도 모델을 이용한 화력발전소 드럼형 보일러 시뮬레이터의 개발에 관한 연구", 1990
- [5] Karl Johan Aström and Tore Hägg "Automatic Tuning of PID Controllers", (Instrument Society of America), pp.54~56
- [6] Gregory K. McMillan "Tuning and Co Loop Performance", Third Edition ISA, pp. 393, 1994