

화력발전소 보일러 드럼수위제어 시뮬레이션에 관한 연구

이주현, 이찬주, 마복렬 한국전력공사 전력연구원

The Simulation Study of Boiler Drum Level Controller in Thermal Power Plant

J.H.LEE*, C.J.LEE, B.R.Ma, Korea Electric Power Research Institute
(Tel: 042-865-5271; Fax: 042-865-5304; E-mail: jhlee@kepri.re.kr)

현재의 발전소 보일러 제어방식은 프로세스 성격에 따라 전체 제어루프의 상태변수들을 근간으로 세부적인 독립된 제어루프별로 제어를 시행하는 개별 루프를 채택하고 있다. 발전소에서 사용하는 PID제어 방식은 각 부시스템들의 상태변수, 출력변수가 다른 부시스템의 선행신호가 되거나 기준신호가 되어 피드백제어, 피드포워드 제어와 캐스캐이드 제어 등의 신호로 작용한다. 선행신호와 상태 전환 신호는 다른 부시스템의 상태변수를 측정함에 의하여 결정되며, 상호연결 함수는 경험에 의한 함수 설정에 의해 결정된다. 본 논문에서는 먼저 화력발전소 보일러 제어시스템을 플랜트 변수들 사이의 인과관계를 표현하는 신호흐름도의 보일러 모델과 실제 발전소에 적용되고 있는 드럼 수위 제어기에 대해 기술한다. 그리고 현장에서 취득한 운전데이터를 이용한 보일러 드럼수위 제어시스템의 모델링에 관한 내용에 대해 기술하고, 마지막으로 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 제어루프의 모의실험 결과를 통해 제어기의 설계와 제어루프의 효용성을 보이고자 한다.

1. 서 론

발전소 보일러에서 드럼의 수위가 높아지면 수분이 터빈으로 유입되어 터빈 블레이드를 손상시키며, 반대로 수위가 너무 낮아지면 보일러 튜브들을 손상시키므로 드럼수위 제어는 대단히 중요하다. 드럼 수위 제어루프는 정상운전 중에 드럼

수위가 일정한 설정치를 유지하도록 급수량, 드럼수위, 주증기량의 3요소를 이용하여 드럼수위를 제어하는 일종의 다중입력 단일출력(MISO) 시스템 제어 루프이다.

발전소등의 대형 공정플랜트에서 사용되고 있는 대부분의 상용 제어기는 PID 제어기이며, 일반적으로 드럼수위 제어도 두 개의 PI 제어기가 직렬

로 연결되어 있는 Cascade 제어루프에 의해서 이루어지고 있다. 드럼수위 제어상태는 제어기 파라미터의 값에 의해서 결정되므로, 제어기의 튜닝이 드럼 수위를 제어하는데 있어서 중요하며, 실제 발전 현장에서의 PID 제어기 튜닝은 많은 시간과 노력을 필요로하는 시행착오나 외국 튜닝 기술자에 의해 이루어지고 있는 실정이다.

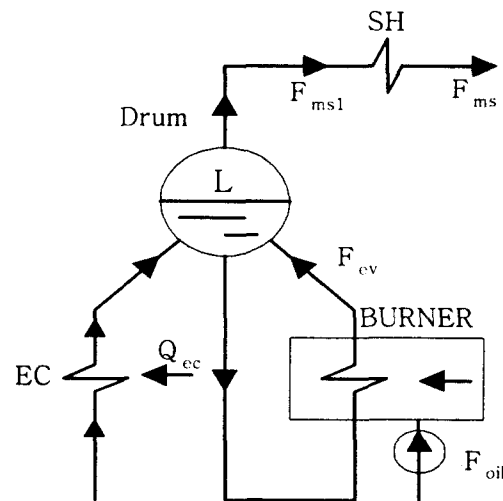
본 논문에서는 먼저 화력발전소 현장에서 취득한 운전데이터를 이용한 보일러 드럼수위 제어계통의 모델링에 관한 내용에 대해 기술하고, 컴퓨터 시물레이션에 의한 제어루프의 모의실험 결과를 통해 제어기의 설계와 제어루프의 효용성을 보이고자 한다. 2절에서는 대상 시스템인 보일러 드럼수위 모델에 대해서 기술하고, 3절에서는 드럼 수위 제어기, 4절에서는 Y화력발전소에서 취득한 운전데이터를 의한 시스템 모델링한 내용에 대해 살펴보고, 5절에서는 결론을 기술하고자 한다.

2. 대상 보일러 모델

대상 시스템인 Y화력발전소 보일러 플랜트의 모델은 변수들 사이의 인과 관계를 기본적인 계산 응답의 결합체로 표현하는 신호 흐름도를 이용한 Klefenz의 보일러 모델[1]를 기본으로 하여 현장의 취득된 운전데이터를 통해 운전중인 시스템의 입력 및 출력신호로부터 시스템을 모델링하였다. 일반적으로 보일러 모델은 제어기에 맞추어 여러 개의 서브 시스템으로 나눌 수 있는데 여기서는 드럼 수위 동특성에 대해서만 살펴보기로 하겠다.

수위 동특성에 관한 등가적 보일러는 (그림 1)

과 같다. 급수는 급수 펌프에 의해 절탄기로 공급되며 절탄기에서 예열된 후 드럼으로 공급된다. 그러면 드럼에 공급된 급수와 증발기를 거친 증기로 인해 드럼 내부는 물과 증기의 혼합체로서 증기 방울이 큰 부피를 차지하게 된다. 그런데 급수의 온도는 드럼 안에 있는 증기방울과 물의 혼합체보다 낮다. 따라서 급수율이 증가하는 초기에는 순간적으로 드럼내의 증기 방울이 응축되고 이 때문에 일시적인 수위 저하 현상(Shrink 현상)을 보인다. 이후 일정시간뒤에 수위는 다시 급수에 비례하는 증가를 보인다. 마찬가지로 연료량의 증가는 증기발생을 증가시켜 일시적으로는 증기방울이 많아져 수위가 상승하고(swell 현상), 점차 증발량에 의한 수위 감소가 나타나게 된다. 또 부하가 변화하면 드럼 내부의 압력이 변화하여 증기 기화에 영향을 주어 드럼수위가 조금 변화하였다가 점차로 부하 변화에 반비례하게 된다. 이러한 드럼 수위의 원인에 대한 결과의 일시적인 반대현상을, 'Shrink and Swell 현상'이라고 한다. 이러한 특성을 고려해서 신호 흐름도를 구성하면 (그림 2)와 같다[2].



F_{fw} : Feedback flow rate Q_{ev} : Evaporator heat

flux

F_{fwd} : Delayed feedwater flow rate

Rev : Evaporated rate L : Drum level

F_{dr} : Net feedwater flow rate into drum

F_{ms} : Main steam flow rate

F_{ms1} : Steam flow rate at SH1

그림 1. 드럼 수위 동특성에 대한 등가적 보일러

Fig 1. Equivalent boiler for drum level dynamics

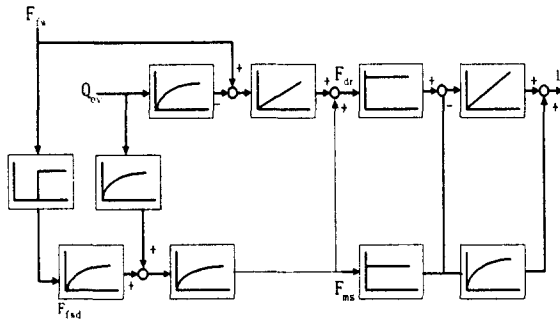


그림 2. 드럼 수위 동특성 신호 흐름도
fig 2. Signal flow diagram of drum level dynamics

3. 드럼수위 제어기

3.1 드럼수위 제어기

드럼수위 제어는 증기량, 급수량, 드럼수위를 제어기의 입력으로 이용하는 3요소 제어로서 보일러, 드럼에 보내는 급수를 제어 함으로써 이루어진다. 급수 제어의 기능은 유출되는 증기량과 같은 급수량을 공급하고, 드럼수위를 설정치에 일정하게 유지하는 것이다. 3요소 제어 구조에서는 드럼 수위를 외란에 관계없이 항상 설정치로 유지하는 것이 제어의 목적이다. 정상 운전 중에는 드럼의 중앙 이하 부분에는 물이 차 있고,

상부에는 증기가 차 있으나 만일 수위가 너무 높아지면 carry over 현상이 발생하며 반대로 너무 낮으면 드럼 하부의 과열 및 튜브의 손상을 초래하여 대사고를 유발하게 되므로 드럼 수위는 항상 정상으로 유지하여야 한다. [6]

드럼 수위 제어기의 구성은 (그림 3)과 같으며, PI 제어기가 직렬로 연결되어진 Cascade 제어기의 구조를 갖는다. (그림 3)에서 주증기량 (main steam flow)이 드럼 수위 제어에 있어서 외란으로 작용한다.

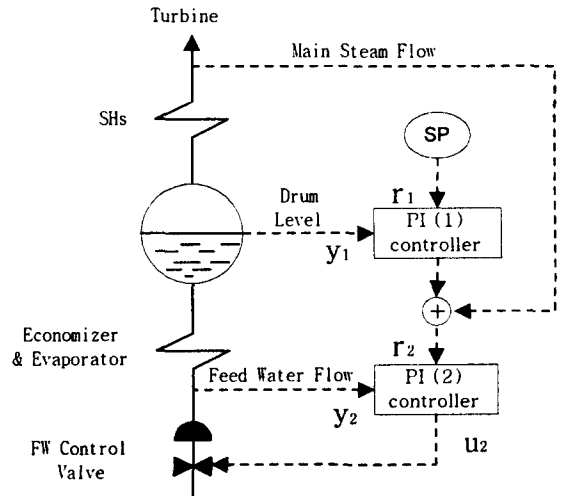


그림 3. 드럼 수위 제어기
Fig 3. Drum Level Controller

4. 운전데이터에 의한 시스템 모델링

4.1 현장 취득 운전데이터

모델링하고자 하는 구간은 발전기가 계통에 병입되어 출력이 150Mw에서 250Mw까지 증발하는 구간을 대상으로 하였다. 급수 밸브의 요구량 변화 및 급수유량의 변화를 통해 나타나는 드럼수위를

알아보기 위해 다음과 같은 현장의 실제 운전데이터를 취득하였다.

표 1. 취득한 현장 운전데이터

신 호 명	현장 신호범위	Range (0~100%)	제어카드 위치	비 고
Drum Level	-10~+10	-400~+400	WF-2 (7-9-4-17)	
Feedwater Flow	-10~+10	0~1000	WF-1 (7-7-7-17)	
F.W Flow Demand	-10~+10	0~100%	WF-2 (7-8-10-07)	
BFP Speed Demand	+10~-10	0~100%	WF-3 (7-9-2-17)	
BFP Disch. Flow	+10~-10	0~100%	WF-1 (7-7-3-07)	
Main Steam Flow	-10~+10	0~1000	WF-1 (7-8-2-07)	

취득장비는 Advantec사의 Adam5000 모델을 사용하여 1초주기로 하였다. 그리고 이들 데이터를 사용하여 모델의 계수를 추정하는 방법은 순환 최소 자승법(RLS : Recursive Least Square Algorithm)을 사용하였으며, 플랜트의 차수는 1차의 선형시스템으로 가정하였다. 1차 선형시스템에 대한 모델식은 다음과 같이 표현된다.

$$y(k) = a_1y(k-1) + b_0u(k-1)$$

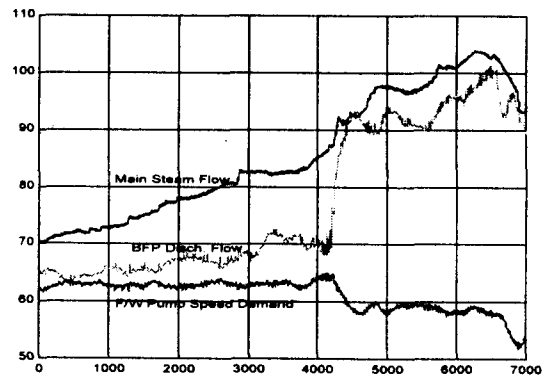
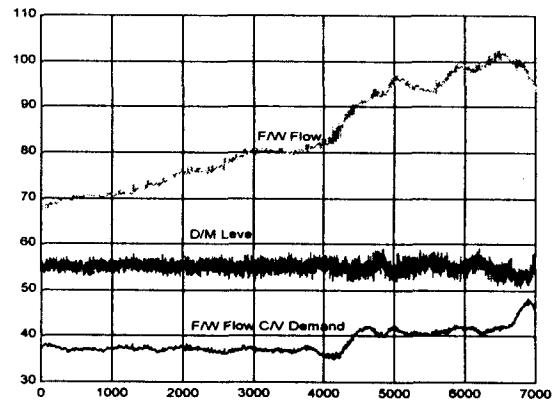
$$\hat{y}(k) = \hat{a}_1y(k-1) + \hat{b}_0u(k-1)$$

$$J(k) = \sum_{i=0}^k [y(i) - \hat{y}(i)]^2$$

여기서 a_1, b_0 는 실플랜트 계수이고, \hat{a}_1, \hat{b}_0 는 구하고자 하는 모델의 매개변수이다. $u(k), y(k)$ 는 k번째 순간의 실 플랜트의 입력과 출력이고, $\hat{y}(k)$ 는 모델의 출력이다. $J(k)$ 는 매개변수를 추정하기 위한 평가함수이다. 본 논문에서는 이 평가함수를 최소화하기 위해 사용한 계산은 MATLAB에서 제공하는 명령어를 사용하여 모델의 파라미터를 추정하였다[3][4].

4.2 운전데이터에 의한 실험내용

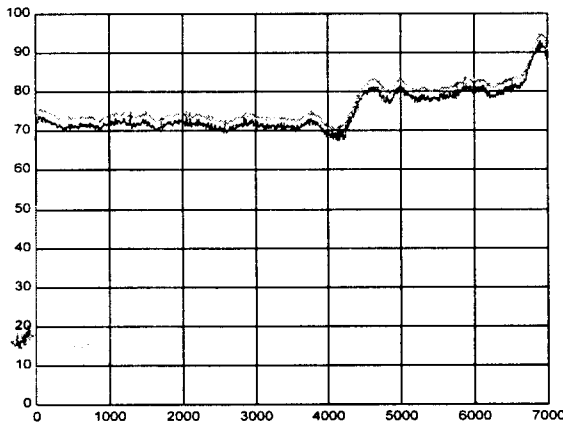
모의실험에서는 현장에서 취득한 제어대상 시스템의 입출력 데이터를 통해 모델의 파라미터를 추정하고, 이를 통해 시스템의 전달함수를 구했다. 또한 추정한 모델의 실험결과를 취득한 운전데이터를 사용하여 전달함수의 오차확인을 통해 모델을 검증하였다. 이를 플랜트의 모델로 이용하여 시물레이션에 필요한 제어기를 포함한 전체 시스템을 구성하고, 시물레이션을 통해 제어기의 최적 파라미터를 구했다. 모든 계산은 Matlab과 Simulink 그리고 Toolbox들을 이용하였으며, 샘플링 시간은 1초로 하였다.



(그림 4) 출력변화에 따른 드럼수위변화 그래프

4.3 운전데이터에 의한 실험결과

드럼수위 제어시스템의 전달함수를 구하는 과정에서 a_0, b_1 의 추정 파라미터값은 각각 $-0.9865, 0.0268$ 이며, 이를 통해 추정한 매개변수 \hat{a}_1, \hat{b}_0 은 각각 $0.2698, 0.1359$ 으로 (그림 5)에서 실제값과 추정값을 보여준다. (그림 5)에서 보면 실제값과 추정한 값과 약간의 오차가 있음을 볼 수 있는데, 이는 매개변수 추정시 하나의 값으로 정착되지 않아 특정구간의 매개변수값을 선택하여 사용한 결과에서 나온 오차와 모델식의 변환과정에서 나온 오차의 결과로 보인다.



(그림 5) 드럼수위 제어시스템 전달특성 추정그래프

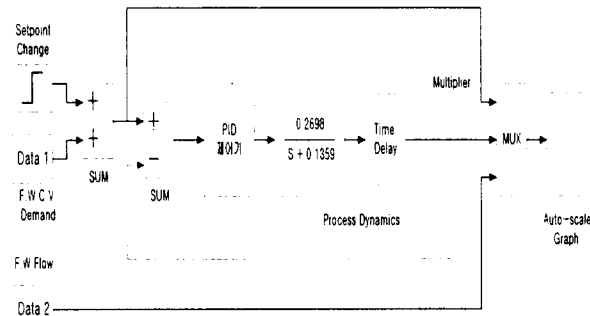
4.4 제어기 시물레이션 결과

여기에 사용되는 PID 제어기 알고리즘으로 이상형 PID 제어기를 선정하였으며, 전달함수 $G_c(s)$ 는 아래와 같다.

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

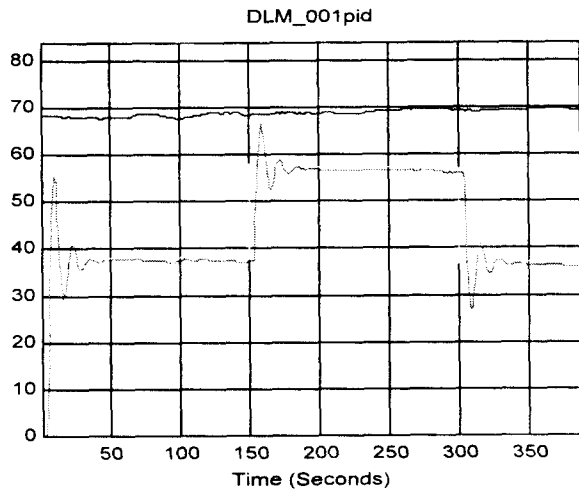
실제 현장에서 취득한 운전자료를 입력하여 모

의실험을 함으로써 프로세스 모델링 및 PID 파라미터 선정의 적정성을 검증할 수 있었다. 모의 실험을 위하여 (그림 7)과 같이 회로를 구성하였으며 Data1과 Data2는 현장에서 취득한 자료로써 대상발전소의 출력150~250Mw 변화시의 F.W Flow C/V Demand와 F.W Flow를 나타낸다.



(그림 7) 제어시스템 모의실험 블럭도

드럼수위 제어시스템의 모의실험 결과는 아래의 (그림 8)과 같으며, 그래프에 나타난 값들은 각각 급수제어 밸브의 요구량, 급수유량을 통한 드럼수위 및 설계된 PID 제어기를 모델링된 프로세스에 적용한 결과값을 나타낸다. 현장에서 취득된 데이터에 제어기의 외란에 해당하는 변화를 위해 요구량을 150ms에서 20% 상승시키고, 다시 300ms에서 20% 강하시켜 설정치 변화에 대한 제어기의 응답 특성을 살펴본 결과 양호한 추종 제어 상태를 유지함을 알 수 있었다.



(그림 8) 드럼수위 제어계통 모의실험 결과

이 실험을 통해 프로세스 모델링 및 PID 제어기 파라미터 설정이 대체적으로 양호하다는 것을 알 수 있으며, 향후 제어루프별 모델링 및 모의실험을 통해 제어기의 초기값 설정에 활용 가능할 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 Y화력발전소의 출력변화에 따른 운전데이터를 취득하고, 이를 이용하여 제어시스템을 모델링하였고, 모델링 결과를 이용한 모의실험을 통해 제어기의 파라미터를 선정하고, 프로세스에 적합한 제어기의 설계와 그 효용성을 확인하였다. 향후 좀더 정확한 프로세스의 지연시간 및 동특성에 대한 데이터가 확보된다면 타 제어루프에도 동일한 방법의 프로세스 모델링 및 모의실험을 통해 제어기 초기값 설정에 활용 가능할 것으로 생각되며, 이를 통해 제어시스템의 현장 적용 시 시운전 초기에 제어기 튜닝과정에서 발생할 수 있는 여러가지 문제점을 줄일 수 있을 것으로

기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Dr. Ing.Gunter Klefenz, "Automatic Control of Steam Power Plants" PP. 158-167, 1981
- [2] 김재선, "신호흐름도 모델을 이용한 화력발전소 드럼형 보일러 시뮬레이터의 개발에 관한 연구"
- [3] Lennart Ljung, "System Identification Toolbox for Use with MATLAB", The MATH WORKS Inc., 1993
- [4] 우주희 외, "운전데이터에 의한 가스터빈 발전소의 연료제어 시스템 모델링", Proceedings of the 13th KACC, pp. 2019-2022, 1998
- [5] 마복렬, 이주현, 이찬주 외. "발전소 보일러용 디지탈 분산제어 시스템 개발" 중간보고서. PP. 50-62. 1999.
- [6] "여수화력발전소 운전조작 설명서", 한국전력공사, 여수화력발전소, 1979