

## 발전용 보일러 시스템의 이상허용 및 과도상태의 유연한 제어에 관한 연구

권오규, 이영삼  
인하대학교 전자·전기·컴퓨터 공학부

### A Study on the Fault-Tolerant and Bumpless Switching Control for Boiler Systems in the Power Plant

Oh-Kyu Kwon and Young-Sam Lee  
School of Electrical and Computer Eng., Inha Univ.

#### Abstract

In this research a fault-tolerant and bumpless switching control is proposed for boiler systems used in the power plants. Firstly, three operating points are selected to control the nonlinear boiler through the full operational range, and the  $H_\infty$  loop shaping controller and the model-based predictive controller(MBPC) are designed. To prevent the windup and bump problems which are caused by the actuator saturation and the controller switching, an anti-windup and bumpless transfer technique is adopted to the  $H_\infty$  loop shaping controller. Also the constrained gain-scheduling technique is applied to MBPC to achieve the same objective. Secondly, the fault-tolerant control technique is proposed to continue the control action without stopping the boiler operation even in case of some faults. Through various simulation studies, the performances of the proposed control techniques are demonstrated.

#### 1. 서 론

발전용 보일러는 전력생산을 그 목적으로 한다. 전기는 그 특성상 저장이 불가능하기 때문에 발전소에서는 24시간 발전설비를 가동하여 전력을 공급하게 되는데, 시간이나 계절의 변화에 따라 그 변화가 심한 전력량의 요구에 관계없이 일률적으로 발전설비를 가동하는 것은 에너지 절약 측면과 계통의 효율적 운용 차원에서 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 전기적 부하변동에 따라 능동적으로 보일러를 제어하는 기법에 대한 필요성이 일찍이 대두되었다.

그러나 동작상태를 빠르게 바꾸게 되면 제어기 사이

의 충돌(Bump)에 의해 불안정한 과도상태를 유발할 수 있고 또한 복합적인 구동기 제약조건을 가지고 있는 보일러 시스템에서는 이를 제대로 고려하지 못한 제어기법을 적용할 경우 사고의 원인으로도 작용할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 동작점이 바뀌는 과도상태에서 충돌 없이 제어기를 유연하게 교체함으로써 비선형 보일러를 전 동작구간에 걸쳐서 제어하는 기법을 다룬다.

발전용 보일러 계통의 고장은 사고시 큰 피해를 유발하므로 대부분의 발전용 보일러는 각종 측정장치, 보호장치, 안전장치를 다중으로 설치하고 있으나 보일러의 운전중지가 잦으면 이로 인한 신뢰성과 경비의 낭비가 심하다. 따라서 이 연구에서는 계통의 이상이 발생하였을 때 능동적으로 대처하여 보일러의 운전중지 없이 제어를 수행하는 이상허용 제어에 대한 기법도 제시한다.

이 연구의 구성은 다음과 같다. 먼저 발전용 보일러의 동특성을 분석하고 동작점을 선정한다. 발전용 보일러 모델로서는 Åström[1]이 제안한 비선형 모델을 사용한다. 선정된 동작점에 대하여 연속형 제어기로는  $H_\infty$  루프형성 제어기[7]를, 그리고 이산형 제어기로는 모델 예측제어기[8]를 설계한다. 구동기가 지나는 제약조건과 제어기 교체시 발생하는 충돌현상을 고려해 주기 위해서  $H_\infty$  루프형성 제어기에는 고이득 되먹임법을 이용한 누적방지 무충돌전환 제어기를 설계한다. 이산형 제어기인 모델 예측제어기에는 2차계획법 풀이를 이용하여 구동기의 제약조건을 고려하고 동작구간의 변경에 대해서는 이득계획법을 적용한다. 마지막으로 이상검출 및 진단결과를 고려하여 제어기 입력을 보상함으로써 이상허용 제어를 수행하는 방법을 제시한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 비선형 보일러 모델

이 연구에서는 Åström[1]이 제안한 비선형 보일러 모

델을 사용한다. <그림 1>은 보일러 시스템의 입,출력 변수들을 보여주는 전체적인 개략도이다.

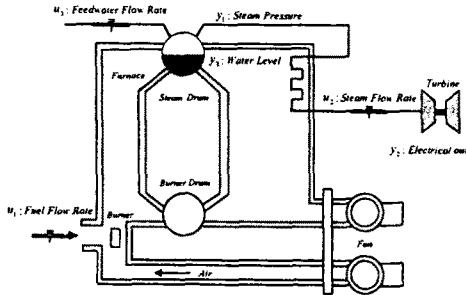


그림 1. 보일러 시스템의 개략도

그림에서 알 수 있듯이 보일러는 3개의 구동밸브를 조절함으로써 입력의 양을 결정하게 되고 요구되는 양만큼의 전기적 출력을 만들어 내는 것을 제어 목표로 한다. 전체적인 동특성은 4개의 상태변수를 가지는 비선형 상태방정식으로 나타낼 수 있는 데, 여기서 입력변수들은 다음과 같은 제약조건을 가진다.

$$\begin{aligned} |\dot{u}_1| &\leq 0.007/\text{sec} \\ -2/\text{sec} &\leq \dot{u}_2 \leq 0.02/\text{sec} \\ |\dot{u}_3| &\leq 0.05/\text{sec} \\ 0 &\leq u_1, u_2, u_3 \leq 1 \end{aligned}$$

보일러 시스템의 제어를 어렵게 만드는 요소는 바로 구동기 나타나는 복잡한 제약조건과 강한 비선형 동특성이다. 따라서 제어를 설계하는 경우 이에 대한 충분한 고려를 해주지 않을 경우 효과적인 제어를 기대할 수가 없게 된다. 본 연구에서는 제어기 교체를 통해서 이러한 비선형성을 극복하게 되는데, 이 과정에서 알맞은 동작점을 선정하는 것은 매우 중요하다. 특히 동작상태가 바뀌어 기존 동작점의 이동이 필요한 경우 불필요한 이동을 줄이고 동작상태를 최대한 반영할 수 있는 동작점들을 찾아낼 수 있도록 동특성 분석이 꼭 필요하다. 이 연구에서는 보일러의 동작상태를 충분히 반영할 수 있는 3개의 동작점을 선정하고 선정된 동작점에 대하여 각각  $H_\infty$  루프형성 제어기와 모델 예측제어기를 설계한다.

## 2.2 제어기 설계 및 적용

비선형 모델을 분석하여 선정된 3개의 동작점에 대하여  $H_\infty$  루프형성 제어기와 모델 예측제어기를 설계한다.

### $H_\infty$ 루프형성 제어기와 누적방지 무충돌전환

이 절에서는 2.1에서 선정된 3개의 동작점에 대하여

$H_\infty$  루프형성 제어기[7]를 설계한다. 루프형성 제어기는 표준형  $H_\infty$  제어기에 비해 설계과정이 체계적이고 제어기 계수를 명확한 식으로 나타낼 수 있는 장점을 가진 다변수 설계기법이다. 설계된 루프형성 제어기 자체는 선형 제어기로서 구동기 제약조건으로 인해 발생하는 비선형성과 플랜트 동특성 자체의 비선형성을 모두 고려하기 불가능하다. 구동기 제약조건이 있는 시스템에 단순한 선형 제어기만을 적용하게 되면 누적현상(Windup)이라는 성능 악화 현상이 일어나게 되는데 이 연구에서는 이러한 누적현상을 개선하기 위하여 고이득 되먹임 기법을 적용한다. <그림 2>는  $H_\infty$  루프형성 제어기에 고이득 되먹임을 적용한 누적방지 제어기의 구조를 보여준다.

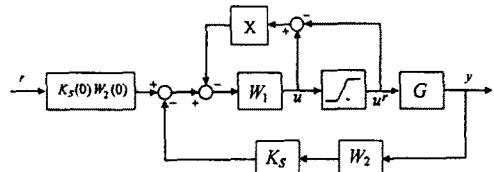


그림 2. 누적방지  $H_\infty$  루프형성 제어기

여기서 누적방지 제어기의 출력  $u$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = [I + W_1(s)X]^{-1}W_1(s)(e + Xu^r)$$

만약 되먹임 이득행렬이  $\|X\| \gg 1$ 을 만족할 경우  $u \approx u^r$ 이 성립하고 결과적으로 누적방지 효과를 거둘 수 있게 된다.

비선형 플랜트를 전구간에서 제어하기 위하여 동작점 변화에 따른 제어기의 교체가 필요한데 교체시 발생하는 제어기간의 충돌(Bump)현상은 고이득 되먹임 기법을 설계된 모든 제어기에 적용함으로써 최소로 줄일 수가 있게 된다. 최종적으로 구현된 누적방지 무충돌 전환 제어기의 개략도는 <그림 3>의 구조를 갖는다.

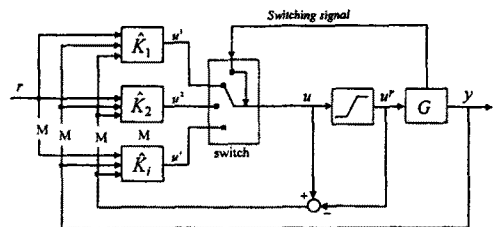


그림 3. 무충돌 전환 제어방식의 구현도

여기서  $\hat{K}_i$ 는  $H_\infty$  루프형성 제어기에 고이득 되먹임을 통해 누적방지 기능이 첨가된 최종 제어기를 뜻하며, 해당 동작점 부근에서 효과적인 제어를 수행할 수 있도록

설계되었다. 교체기(switch)는 출력변수를 감시하면서 동작상태가 크게 변화할 경우 제어기를 교체투입 명령을 내리고 이렇게 함으로써 전구간 제어를 이룰 수가 있다. 제어기 교체시 발생하는 충돌은 누적방지 제어기와 같은 동일구조를 채택함으로써 제거할 수 있게 된다. <그림 5>와 <그림 6>는 제시된 기법을 적용하였을 경우 누적방지 및 무충돌 전환에 의한 전구간 제어를 이룰 수 있음을 보여주고 있다.

#### 제약조건을 고려한 모델 예측제어기

이 절에는 역시 2.1절에서 선정된 3개의 동작점에 대하여 모델 예측제어기를 설계한다. 예측제어기는 시스템이 가지는 여러 가지 제약조건들을 효과적으로 제어할 수 있는 장점이 있는 제어기로서 이 연구에서는 보일러의 구동기에서 나타나는 변화를 및 크기 제약조건을 모두 고려하여 최적의 입력을 계산하기 위해 2차계획법을 풀게된다.

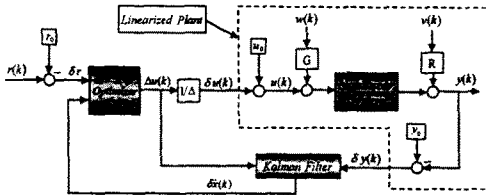


그림 4. 비선형 시스템에서 제약조건을 고려한 모델 예측 제어기의 블럭도

<그림 4>는 비선형 시스템에 제약조건을 고려한 예측제어기를 적용하기 위한 전체적인 개략도를 나타낸다. 여기서 제어기(Optimizer)는 2차계획법을 풀어냄으로써 최적 제어입력을 구동기로 보내주게 되고 결과적으로 제약조건으로 인한 성능악화를 크게 개선할 수 있다.

동작상태의 변화에 따라 전구간에 걸친 능동적 제어를 수행하기 위해 예측제어기에 이득계획법을 적용한다. 이 경우 이득 교체시 발생하는 충돌현상을 제거하기 위하여 제어기 입력과 상태 추정치에 다음과 같은 보정 과정을 거치게 된다.

$$\delta u(k-1)_{new} = \delta u(k-1)_{old} + (u^0_{old} - u^0_{new})$$

$$\delta \hat{x}(k-1)_{new} = \delta \hat{x}(k-1)_{old} + (x^0_{old} - x^0_{new})$$

여기서 첨자 old 와 new는 이득 교체 이전과 이후의 입력 및 상태추정치를 나타낸다. <그림 7>은 제안된 제어기를 적용하였을 때 전동작 구간에 걸쳐 보일러의 전기적 출력과 수위의 제어가 효과적으로 수행됨을 알 수 있다.

## 2.3 이상허용 제어

보일러 계통 중에 이상(Fault)의 발생부로서 제어밸브에서의 이상이 발생했을 때와 측정장치(Sensor)에 이상이 발생하였을 때 이상 검출 및 진단 결과를 고려하여 제어기를 재설계함으로써 이상허용 제어를 수행하는 과정을 예시한다. 이상허용 제어를 위해서는 정확하고 신속하게 이상 검출 뿐만 아니라 이상의 크기와 종류를 알아내 이 정보를 제어기내에 알려줘야 하므로 계산량이 적고 빠르게 응답할 수 있어야 가능하다. 따라서 이 연구에서는 이상검출 방법으로 예측제어기를 구성할 때 사용하는 칼만필터를 이용하여 이상검출을 한다. 이상검출 신호 발생 시 입력을 보상하기 위해서는 이상이 구동기 이상에 의한 것인지 아니면 측정장치 이상에 의한 것인지를 출력신호만으로는 판가름하기가 어렵다. 따라서, 구동기 이상과 측정장치 이상을 구별하고 진단하기 위해 2개의 편향 추정기를 사용한다. 구동기 이상이라는 가정하에 AFB(Actuator Fault Bias) 추정기를 설계하고, 측정장치 이상이라는 가정하에 SFB(Sensor Fault Bias) 추정기를 설계하는 방법으로 구동기 이상과 측정장치 이상을 구분한다.

구동기 이상은 제어밸브가 기계적 이상으로 인해 정상적인 동작을 하지 못함으로써 입력의 크기 및 변화율의 동작범위가 이상 발생 시점에서 제한된다고 가정하고, 측정장치 이상은 외란이나 잠음이 갑자기 증가하는 이상이나 측정장치의 이득변화에 의해 편향이 발생하는 이상을 가정하였다. 먼저, 구동기 이상은 보일러 계통에서 특히 중요하다고 판단되는 밸브가 닫힐 시에 이상으로 인해 제대로 닫히지 못함으로써 발생하는 이상을 고려하였다. 이상은 300초[sec]에 발생한 경우를 가상하여 모의실험을 한다. <그림 8>는 급수 밸브에 50%의 이상이 발생하였을 때 공칭제어기를 적용할 경우 수위는 성능이 크게 악화되지만 이상을 고려하여 제어기를 재설계한 경우에는 만족할 만한 성능을 보임을 나타내고 있다.

측정장치 이상의 경우는 드림 수위 측정장치의 측정치에 초당 0.0035[m]씩 증가하는 이상을 고려하였다. 이 경우의 모의실험 결과는 <그림 9>와 같다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 공칭제어기에 의한 드림 수위는 성능이 크게 악화됨을 알 수 있다. 하지만 추정된 편향을 고려한 이상허용 제어기를 적용하면 만족할 만한 성능을 보임으로써 이상허용 제어가 수행됨을 알 수 있다.

## 3. 결 론

이 연구에서는 비선형 보일러를 제어기 교체와 이득 계획법을 이용하여 전구간에 걸쳐 능동적으로 제어하는 기

법을 제안하였으며 보일러 제동의 이상상황 발생시 보일러의 운전을 정지하지 않고 제어할 수 있는 이상허용 제어기법을 제안하였다.

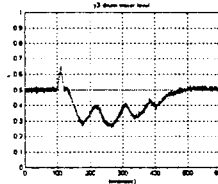
제안된 제어기법은 보일러를 제어하는 데 걸림돌이 되어왔던 구동기 제약조건을 효율적으로 고려하여 시스템의 안정성을 크게 향상시키는 것을 모의실험을 통해 확인하였으며 특히 전기의 사용량에 따라 전기적 출력을 전구간에 걸쳐 능동적으로 제어할 수 있음을 확인할 수 있었다.

또한 이 연구에서 제시된 이상진단법은 구동기의 이상뿐만 아니라 측정장치의 이상을 함께 고려할 수 있고, 속용성이 있어 범용적으로 어느 시스템이든간에 사용할 수 있는 방법으로서, 이러한 이상진단법과 고장 검출법을 이용하여 제어기를 재설계함으로써 고장허용 제어를 수행하는 방법을 제시하고 모의실험을 통해 그 타당성을 검토하였다.

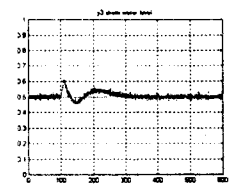
#### 4. 참고문헌

- [1] K. J. Åström and R. B. Bell. Dynamic models for boiler turbine-alternator units: data logs and parameter estimation for a 160MW unit, Report TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987.
- [2] P.M.Frank, Faults diagnosis in dynamical systems using analytical and knowledge-based redundancy-Tutorial paper, Automatica, vol. 29, no. 4, pp. 815-835, 1993
- [3] B. Friedland, Treatment of bias in recursive filtering, IEEE Transactions on Automatic Control, AC-14, 359-367, 1969
- [4] B. Friedland, Notes on Separate-Bias Estimation, IEEE Transactions on Automatic Control, AC-23, pp. 735-738, 1978
- [5] B. Freidland, Multidimensional maximum likelihood failure detection and estimation, IEEE Transactions on Automatic Control, AC-26, 567-570, 1981
- [6] R. A. Hyde and K. Glover, The application of scheduled  $H_\infty$  controllers to a VSTOL aircraft, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 38, no. 7, pp. 1021-1039, 1993.
- [7] D. McFarlane and K. Glover. A loop shaping design procedure using  $H_\infty$  synthesis, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. AC-37, no. 6, pp. 759-769, 1992
- [8] D. J. Wilkinson, A.J. Morris and M.T. Tham, C-constrained multivariable predictive control(a comparison with QDMC), Proc. of the American Control Conference, San Diego, California, U.S.

A , pp. 1620-1625, 1990

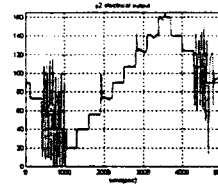


(a) 선형제어기만을 적용한 경우

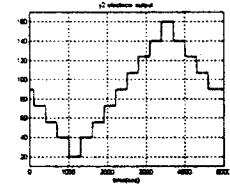


(b) 누적방지 제어기를 적용한 경우

<그림 5> 드럼 수위의 누적방지 제어

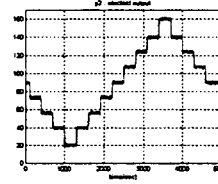


(a) 충동을 고려하지 않은 경우

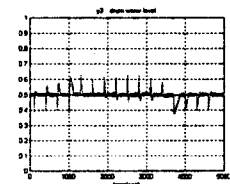


(b) 충동을 고려한 경우

<그림 6> 전기적 출력의 무충돌전환 제어

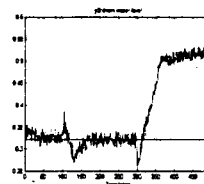


(a) 전기적 출력

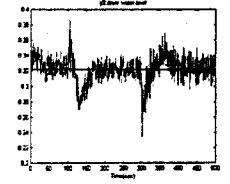


(b) 드럼 수위

<그림 7> 이득계획 예측제어의 성능

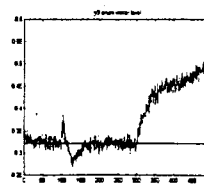


(a) 공칭제어기 응답

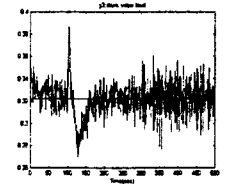


(b) 이상허용 제어기 응답

<그림 8> 구동기 이상 발생시의 제어기 성능



(a) 공칭제어기 응답



(b) 이상허용 제어기 응답

<그림 9> 센서이상 발생시의 제어기 성능