

보일러 터빈 시스템의 견실성에 관한연구

이 시곤, 김은기, 권옥현
서울대학교 제어계측공학과

A Study on the Robust Control of the Boiler-Turbine

See Gon Lee, Kim Un Gi, Woon Hyun Kwon
Dept of Control and Instr. Seoul National Univ.

Abstract

This paper presents a feasibility study related to the design of a linear multivariable compensator for a model of boiler-turbine system. The nonlinear dynamics are linearized at a operating condition. At the operating point an LQG/LTR compensator is designed. Simulations are included to illustrate the usefulness of this linear multivariable control law.

1. 서론

최근에 들어서 LQG/LTR 방법을 사용하여 선형 다변수 시스템들에 대한 제어기 설계 방법 들이 많이 제시되고 있다 [1],[2],[3],[4].

본 논문에서는 LQG/LTR 방법을 이용하여 보일러-터빈의 다변수 제어기를 구성하고 그 성능을 분석한다. 보일러-터빈의 최적 운전을 위해서는 일정한 수증기압과 전기적 출력이 필요하다. 사용된 보일러-터빈의 모델식은 2 - 상태 3 - 입력 2 - 출력의 선형화된 견실성 회복 LQG/LTR 방법으로써 시뮬레이션을 통하여 추적 능력 및 외란 제거 능력을 보이고 계수 변화에 대하여 견실한 성능을 유지함을 보인다.

2. 보일러-터빈 모델

(1) 기본 모델

모델식은 K.J.Astrom and K.Eklund의 연구를

참고로하였다 [5],[6]. 사용된 플랜트의 사양은 다음과 같다.

등유 연소

정격 전력 : 160 Mw

정격 부하에서 수증기 흐름 : 140 Kg/sec

드럼 수증기 압력 : 140 Kg/sec

초가열된 수증기 온도 : 535 도

드럼 체적 : 40 m³

다운 카머 (downcomers) 체적 : 11 m³

라이저 (riser) 체적 : 38 m³

동작점 에서 시스템내의 물 질량 : 40,000 Kg

동작점 에서 시스템내의 수증기 질량 : 2,000 Kg

피드 워트 온도 : 300 도

모델의 입력은 연료 밸브 위치 U1 (0 - 1), 제어 밸브 위치 U2 (0 - 1) 피드 워트 밸브 위치 U3 (0 - 1)이고, 상태 변수는 드럼내의 압력 P, 전기적 출력 P0, 시스템내의 유체 밀도 Pf 이고 출력은 P, P0, 드럼 수위 Xw 이다.그림 1 은 제어할려는 보일러-터빈의 개략도 이며 각 모델식은 다음과 같다.

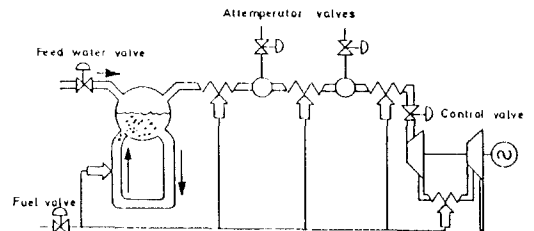


그림 1 보일러-터빈의 개략도

$$\frac{dP}{dt} = -0.0018 * U2 * P (9/8) + 0.9 * U1 - 0.15 * U3 \text{ 식 (2.1)}$$

$$\frac{dP0}{dt} = \{ (0.73 * U2 - 0.16) * P (9/8) - P0 \} / 10 \dots \text{식 (2.2)}$$

$$Ws = (1.1 * U2 - 0.19) * p \dots \text{식 (2.3)}$$

$$\frac{dPf}{dt} = (141 * U3 - Ws) / Vt \dots \text{식 (2.4)}$$

$$Ps = Cs1 * P + Cs2 \dots \text{식 (2.5)}$$

$$Acs = (1 / Pf - Vw) / (1 / Ps - Vw) \dots \text{식 (2.6)}$$

$$Xw = 50 * (Vw * Vt * Pf + 60 * Acs + 0.05 * Ws - 65.5) \dots \text{식 (2.7)}$$

Ws : 수증기 흐름 Pf : 시스템내 유체 밀도

Ps : 수증기 밀도 Acs : 스팀량

Cs1: 0.8 Cs2: -25.6

Vt : 85 Vw : 0.001538

시스템내의 에너지 변화율은 드럼내의 압력 변화율과 같다면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{에너지 변화율} = ka * \frac{dP}{dt}, \text{ 여기서}$$

P는 드럼내의 압력 ka는 비례 상수이다.

금속과 물의 온도변화에 따른 시간 지연은 드럼내의 압력 변화에 비해 무시된다. 그리고, 연료에서 공급 되는 열량은 다음

(a),(b),(c) 에 사용된다.

(a) 입수 되는 피드 워트를 에코노마이저 (economizer) 출력 온도에서 포화 온도 까지 높인다.

(b) 포화수를 수증기화 한다.

(c) 물, 금속, 수증기의 에너지를 높인다.

이런 가정에서 다음과 같은 에너지 평형식이 성립한다.

$$ef = (hf - hw) * qfw + hfg * qe + ka * \frac{dP}{dt} \dots \text{식 (2.8)}$$

여기서, ef는 연료에 의해 공급되는 열량 (KWS), qfw는 피드 워트 흐름 속도 (Kg/sec), qe는 수증기화 속도 (Kg/sec)이다. 다시 식 (2.8) 을 다시 정리 하면 식 (2.9) 와 같이 되며 상태 방정식 식 (2.1) 이 나오게 된다.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{kc}{(1 + K)} * (kb * ef - r * qfw - qs) \dots \text{식 (2.9)}$$

드럼 수위는 다음 두가지 요소에 영향을 받는다.

(a) 피드 워트 흐름 과 수증기화 속도의 차.

(b) 수위 아래에서 수증기 생성 변화에 따른 수위차

이 가정 에서 식 (2.3) - (2.7) 이 만들어 진다.

전기적 출력측에서 본 에너지 평형식은 다음 과 같이 표시된다.

$$P0 = kt * (qs * hs - qs * ho) \dots \text{식 (2.10)}$$

여기서, hs는 터빈으로 들어오는 엔탈피이고 ho 는 터빈에서 나가는 엔탈피이다.

동작점에서 터빈으로 들어오는 수증기의 엔탈피는 수증기 압력의 선형 함수이고 나가는 수증기의 엔탈피는 상수라고 가정하면 식 (2.11) 이 성립한다.

$$P0 = kt1 * qs * (p + kt2) \dots \text{식 (2.11)}$$

이 식을 다시 일차 미분 방정식으로 표시하면 식 (2.12) 이 된다.

$$\frac{dP0}{dt} = (kt1 * qs * (P + kt2) - p0) / tc1 \dots \text{식 (2.12)}$$

이 식은 터빈내의 에너지 손실이 전부 전기적 출력이 된다는 가정하고 상태 방정식 식 (2.2) 가된다.

(2) 선형화 모델

모델의 선형화는 Taylor's series 를 사용하여 비선형 상태 방정식을 선형화 한다.

$$x = f(x, y, u) \xrightarrow{\text{truncated Taylor's series}} y = g(x, y, u)$$

$$x = A x + B u$$

$$y = C x + D u$$

$$A = \frac{\delta f}{\delta x} \Bigg|_{\substack{x0 \\ u0 \\ y0}} \quad B = \frac{\delta f}{\delta u} \Bigg|_{\substack{x0 \\ u0 \\ y0}}$$

$$C = \frac{\delta f}{\delta x} \begin{vmatrix} x_0 \\ u_0 \\ y_0 \end{vmatrix} \quad D = \frac{\delta f}{\delta u} \begin{vmatrix} x_0 \\ u_0 \\ y_0 \end{vmatrix}$$

$$x_0 = \begin{bmatrix} 108 \\ 67 \\ 428 \end{bmatrix} \quad y_0 = \begin{bmatrix} 108 \\ 67 \\ 0. \end{bmatrix}$$

$$u_0 = \begin{bmatrix} 0.34 \\ 0.69 \\ 0.44 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.001424 & 0 & 0 \\ 0.0395 & -0.1 & 0 \\ -0.006694 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.9 & -0.349 & -0.15 \\ 0 & 14.155 & 0 \\ 0 & -0.0233 & 165.88 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.00233 & 0 & 0.0054 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.52 \end{bmatrix}$$

3. 선형 제어기의 설계

설계 사양은 성능 요구 즉, 보일러-터빈의 모델 불확성과 외란 제거에 따른다. 특히 발전소 안정 운전을 위해서는 부하 증기압과 드럼 수위가 외란 발생시 빨리 설정치가 되게 하는 것이 중요하다.

(1) 설계 사양

설계된 선형 제어기가 $K(s)$ 이고 동작점에서의 선형 모델의 전달 함수가 $G(s)$ 일 때 $Y(s)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$Y(s) = G(s)K(s)[I+G(s)K(s)]^{-1} r(s) + [I+G(s)K(s)]^{-1} d(s) + G(s)K(s)[I+G(s)K(s)]^{-1} n(s)$$

..... 식 (3.1)

식 (3.1) 에서 좋은 명령 추종과 외란 제거를 위해서는 $G(s)K(s)$ 가 커야 하므로 외란 영향이 큰 주파수 구간에서는 $\sigma_{\min}[G(j\omega)K(j\omega)]$ 가 커야 한다. 그리고 잡음 제거를 위해서는 $G(s)K(s)$ 가 작아야 하므로 $\sigma_{\max}[G(j\omega)K(j\omega)]$ 가 잡음 영향이 큰 주파수 구역에서는 작아야 한다. 동시에 이 주파수 구간에서 모델링 오차에 대하여 견실하도록 설계되어야 한다[7].

추적 능력과 견실성을 고려하여 결정된 설계 요건은 그림 2 와 같다.

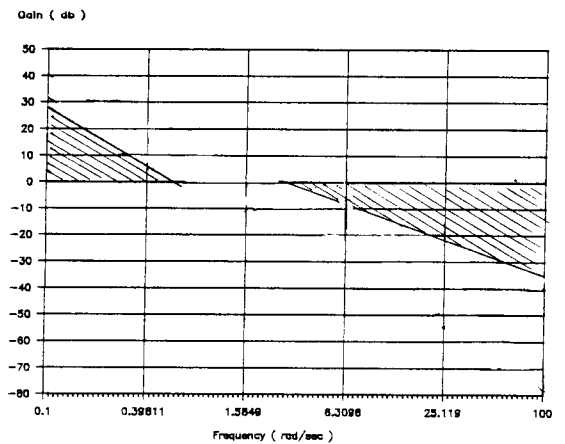


그림 2 주파수 영역 설계 사양

측정 잡음 $n(s)$ 와 모델링 되지 않은 동특성에 의한 교란의 영향은 고주파 ($\omega > 20$ rad/sec) 에서 커지고 외란 $d(s)$ 는 저주파 ($\omega < 0.5$ rad/sec) 에서 영향을 미치므로 저주파에서 성능을 좋게하기 위해서는 루프 전달 행렬의 특이치가 큰값이 되도록 하고 고주파에서는 작아 지도록 해야한다. 그러므로 $\sigma_1[G(j\omega)K(j\omega)]$ 는 그림 2 와 같은 사양을 만족 해야 한다.

(2) LQG/LTR 제어기 설계

(2.2) 절에서 주어진 선형 시스템을 분리 시키면 다음과 같이 된다.

$$\dot{u} = Ba * u_a \text{ 로 정의 하면}$$

$$\dot{x}a = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Ba \end{bmatrix} ua \dots\dots\dots \text{식 (3.2)}$$

$$y = \begin{bmatrix} C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix}$$

여기서, $\sigma_{\min} [C(sI-A)^{-1}B+D] Ba/s \Big|_{s=j\omega} \cong 1$

이 되고 가능한 $|\sigma_{\max} - \sigma_{\min}|$ 가 최솟아 되도록 Ba 행렬을 잡는 것이 중요하며 이것은 설계 사양을 만족하게 한다. 이때 시스템은 (A,B,C) 가 관측, 가제어 이면 분리된 시스템 역시 가관측, 가제어 시스템이다. 이것을 시행 착오를 해서 구하면 다음의 행렬을 구할 수 있다.

$$Qc = \begin{bmatrix} C' \\ D' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C & D \end{bmatrix}$$

$$Rc = \text{diag} \{1,100,100\}$$

$$Ba = \text{diag} \{1,1,5\}$$

여기서 구한 LQ 의 전달 함수 특이치 제적은 그림 3-1 과 같다.

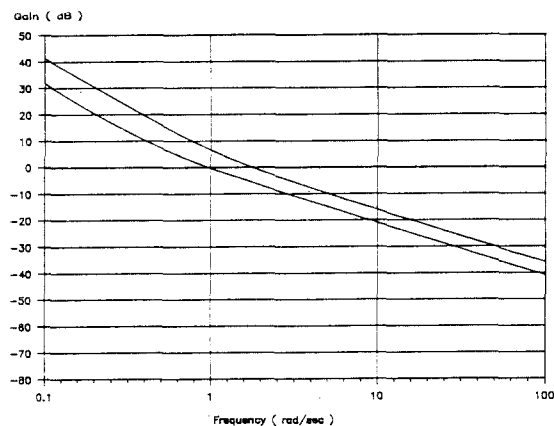


그림 3.1 LQ 의 특이치 제적

LQ 에서 Qc, Rc, Ba 를 조정 하여 구한 K 로 LQ 조정기의

루프 전달 행렬은

$$T1 = K(sI-A)^{-1}B \dots\dots\dots \text{식 (3.3)}$$

이 된다. 입력 절단점에서 건실성 회복 조건은 Doyle 과 Stein 이 구하였다[8]. [8] 에서 제안된 LTR 설계를 하면 LQG 의 건실성이

LQ 의 건실성과 점진적으로 같아 진다. 이를 위해 Qf, Rf 을 다음의 행렬로 둔다.

$$Qf = q^2 * \text{diag} \{ 0, 0, 0, 1, 1, 25 \}$$

$$Rf = I$$

LQG/LTR 루프 전달 행렬은 식 3.4 와 같이 나타난다.

$$T2 = K[(sI-A)^{-1}+BKc+KfC]^{-1}FC(sI-A)B \dots\dots\dots \text{식 (3.4)}$$

Qf 에서 q 를 점차 크게 하면 T2가 T1을 점진적으로 같아져서 건실성이 회복된다. q 를 100 으로하여 LQG/LTR 설계를 하면 T2(jw) 의 특이치는 w 값에따라 그림 3.2 와 같은 형태가 되며 이것은 그림 3.1 과 비슷하다.

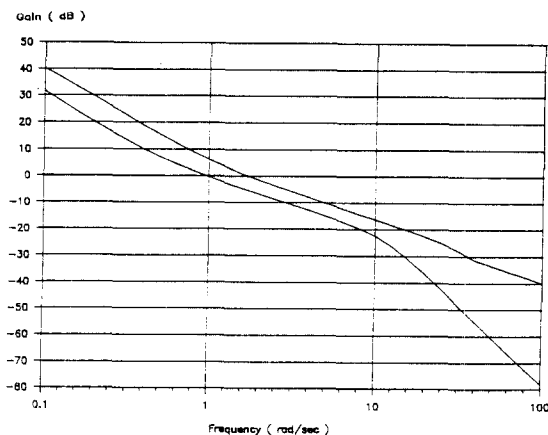


그림 3.2 LQG/LTR의 특이치 제적

4. 시뮬레이션 결과

LQG/LTR 제어기 설계 후 실제로 보일러-터빈에서 심각한 문제들을 시뮬레이션한 결과를 추적 능력과 외란에 대하여 분석 하면 그림 4, 5 와 같다. 그림 4 는 상태 변수들의 추적 능력을 나타낸 것인데 수증기압과 부하는 추적 능력이 우수 하지만 유체 밀도는 큰 폭으로 진동하며 추적한다. 그림 5 은 각 출력에 따른 외란의 영향을 나타낸 것이다. 이때 외란은 크기가 1 인

계단형이며 다소간 차는 있으나 비슷한 형태임을 알 수 있다. 외란의 종류에는 시스템내의 손실에 따른 수증기압의 변화 그림 (5-1), 부하의 갑작스런 변화 (그림 5-2) 그리고 드럼내의 갑작스런 수위 변화 (그림 5-3) 로 들 수 있다.

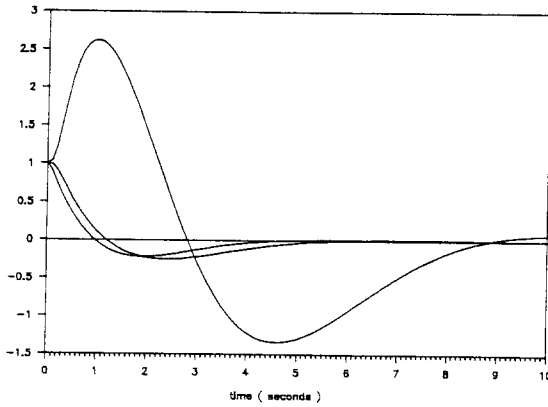


그림 4 각 상태 변수들의 추적 능력

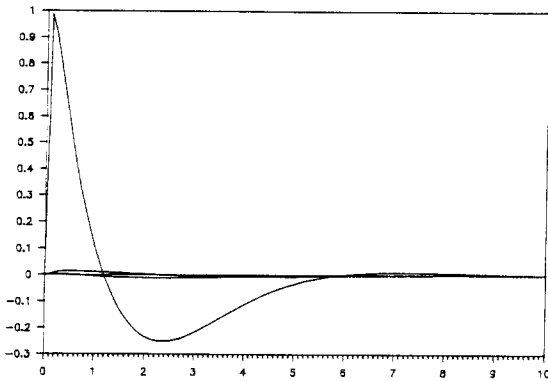


그림 5.1 수증기압에 외란이 생겼을 경우

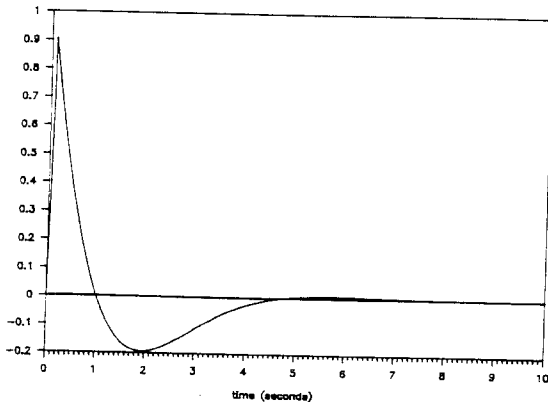


그림 5.2 부하에 외란이 생겼을 경우

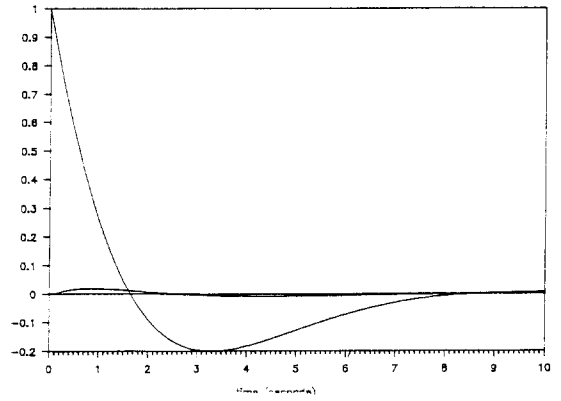


그림 5.3 드럼 수위에 외란이 생겼을 경우

5. 결론

다변수 시스템의 파라미터 변동이나 외란이 존재할 때에도 모델 추종을 원활히 하고 설정치를 충실히 추적하도록 설계 하였다. 본 논문의 특징은 행렬 A 가 singular 이고 출력이 입력의 함수인 드럼형 보일러-터빈에 대한 제어를 설계하여 설계 사양을 만족하는 것을 보였다. 시뮬레이션 결과 보일러-터빈이 느린 시스템 이므로 각 외란에 따른 반응은 우수하게 나타난다.

앞으로의 연구과제는 다른 설계 방법들 (H-infinite , Predictive Control) 과 비교하여 최적의 제어를 설계 하는 것이다.

참고 문헌

1. G. Stein and J. Doyle, "Multivariable Feedback Design: concepts for a Classical Modern Synthesis," IEEE Trans. on Auto. Control, Vol. AC-26, Feb. 1981
2. G. Stein and M. Athans, "The LQG/LTR Procedure for Multivariable Feedback Control Design," IEEE Trans. on Auto. control, Vol. AC-32, Feb. 1987
3. P. Kapaouris and M. Athans, "Gain-Scheduled Multivariable control for The GE-21 Turbofan engine using The LQG/LTR methodology,"
4. S. M. Chan and M. Athans, "Applications of Robustness Theory to power system method," IEEE Trans. on Auto. control, Vol. AC-29, Jan. 1984
5. K. J. Astrom and K. Eklund, "A simple nonlinear drum boiler model," I.J.C, Vol. 22, 1975
6. K. J. Astrom and K. Eklund, "A simplified model of a drum boiler-turbine unit," I.J.C, Vol. 16, 1972
7. J. C. Doyle, "Analysis of feedback system with structured uncertainties," IEE Proc.-Part D, Vol. 129, Nov.1982
8. J. C. Doyle and G. Stein, "Robustness with observers," IEEE Trans. Auto. Control, Vol. AC-24, Aug. 1979