

시간지연이 큰 미지의 시스템에 대한 최적 P.I.D 제어기 설계

Design of Optimal P.I.D Controller For Unknown Long Time Delayed System

박 익 수 ^{*}, 문 병 희 ^{*}

^{*} 전력연구원 기술센터 자동제어그룹 (Tel: (042)865-5604 ; Fax:(042)865-5104)

Abstract : This paper presents an off-line P.I.D parameter estimation method during normal operation in power plant. The process parameters are estimated using the recursive least square method. The controller parameters are estimated on the basis of desired characteristics of the dynamic model of the closed-loop control.

Keywords : Off-line P.I.D parameters, Recursive least square method

1. 서 론

대규모의 열교환기로 볼 수있는 화력발전소 Boiler는 전형적인 Non-linear, multivariable system 의 예이고 Boiler 에서의 Controller는 보령화력 3호기부터 시간지연이 큰 Steam temp. control system 에 한하여 Observer를 이용한 State control의 Modern control 방식과 기존의 PID control 방식을 선택하도록 설계되어 있으나 아직 PID 제어에 익숙하고 그 Parameter tuning을 잘만하면 제어의 quality면에서 별로 손색이 없는 등의 이유로 PID 제어를 선호하고 있기 때문에 발전소의 제어는 PID 제어가 전부라고 보아도 된다.

그러나 제어 대상인 Boiler의 dynamics는 시간경과와 더불어 계속 변화하고 있으므로 이론적으로는 꾸준히 PID parameter를 tuning 해 주어야 하나 Boiler 자체가 Non-linear 특성을 가지고 있기 때문에 어느 특정한 부하에서 최적제어가 되도록 Setting한 값이 다른 부하에서는 그 값이 바뀌게 되는 등의 이유로 실제로 어떤 값으로 Tuning을 하여야 할 것인가는 현장에서 중요한 사항에 속한다.

그러나 Test signal (impulse, step, ramp, sine등)에 의한 Process response로부터 Ziegler-Nichols Tuning method를 적용하는 것은 실제적으로 운전상의 제약 때문에 어려움이 있고 특히 시간지연이 큰 시스템에서는 긴 시간동안 시스템을 수동운전 하여야 하는 등의 이유로 더욱 제약이 따른다. 따라서 여기서는 시간지연이 큰 온도제어 시스템을 정상적으로 자동 운전 하면서 그 상태에서의 최적 Parameter를 계산하여 제시해주는 방식에 대하여 기술한다.

2. STRUCTURE OF ANALYSIS

일반적으로 화력발전소에는 조작변수(Manipulated variables)로 Main steam flow, Feed water flow, Fuel flow, Air flow, Spray flow, Gas recirculation flow의 6개가 있고, 제어변수(Controlled variable)로는 Generator output, Main steam pressure, Main steam temperature, Exhaust gas oxygen density, Reheater steam temperature의 5개가 있는 Multi-input, Multi-output 시스템이다.

이러한 Large scale 시스템의 Dynamics model을 구현하는 기본적인 생각은 주로 이론적인 접근방법과 통계학적으로 접근하는 두가지 방식이 있다. 이론적인 접근 방법에서는 Process내의 에너지와 질량의 평형을 나타내는 편미분 방정식을 세우고 이것을 적당한 가정아래서 선형화 한다는 것이다. 통계학적인 접근방법으로는 정상적인 운전 상태에서 얻은 Plant data로부터 통계적인 Model을 세우는 것이다. 적절한 통계적 Model을 사용하면 Process와 Noise의 특성을 같이 수용할 수 있게 된다.

여기서는 통계적인 접근 방법으로서의 기본적인 Model은 Large-scale multi-input, multi-output 시스템에 비교적 정확한 Auto-regressive moving average (ARMA) model 로 한다. ARMA model은 State space form을 구현하는데 간단하고 이렇게 State equation이 얻어지면 정통적인 Linear controller design 방법으로 PID parameter를 계산한다.

다음 그림 1은 Off-line 상태에서 이루어 지는 자료 취득과 그 Data로부터 Model identification을 수행

하고 최적의 PID parameter를 도출하는 과정을 나타낸 것이다.

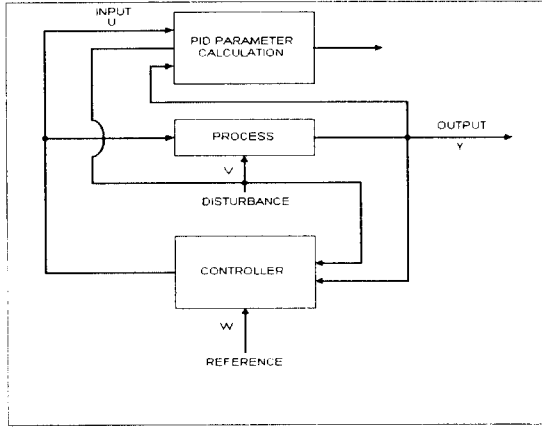


그림 1. 최적 PID parameter estimation 절차
Fig. 1. Optimal PID parameter estimation process

3. SYSTEM IDENTIFICATION

온도제어 시스템에 스텝입력을 인가하여 그 응답특성을 보면 2nd order 시스템에서 적절한 Time constant를 선정함에 따라 시스템 특성과 잘 맞출 수 있으므로 일반적으로 Process를 second-order DARMA Model

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2}, B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2}$$

$$y(k) + a_1y(k-1) + a_2y(k-2) = b_1u(k-1) + b_2u(k-2)$$

로 Modelling 하면

$y(k) = \phi(k)\theta + n(k)$ 의 simple form 으로 나타낼 수 있다.

$$\text{여기서 } \theta = [-a_1, -a_2, b_1, b_2]^T$$

$$\phi(k) = [y(k-1), y(k-2), u(k-1), u(k-2)]$$

$$\varepsilon(k) = y(k) - \hat{y}(k) = y(k) - \phi(k)\theta$$

$y(k)$: measured variable $\hat{y}(k)$: estimated variable
Model parameter를 estimation하기 위하여 Recursive Least Square Method를 이용한다.

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + K(k)[y_{k+1} - \phi_{k+1}^T \hat{\theta}(k)]$$

$$K(k) = P(k+1) \phi_{k+1}^T \\ = P(k) \phi_{k+1}^T [I + \phi_{k+1} P(k) \phi_{k+1}^T]^{-1}$$

$$P(k+1) = [I - K(k)\phi_{k+1}^T]P(k) \text{에서}$$

Initial value를 결정하기 위하여

$$\phi = \begin{bmatrix} -y(2) & -y(1) & u(2) & u(1) \\ -y(3) & -y(2) & u(3) & u(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -y(k-1) & -y(k-2) & u(k-1) & u(k-2) \end{bmatrix}$$

로부터 $P(k) = [\phi_{(k)}^T \phi_{(k)}]^{-1}$ 를 구하고 반복하여 Model parameter를 estimation 한다. 이제 Process에 미지의 Time delay d가 있다고 할 때

$$H(z^{-1}) = \frac{z^{-d}(b_1z^{-1} + b_2z^{-2})}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}}$$

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t)$$

로 되고 여기서 d를 결정하기 위하여, 위에서 반복적으로 Estimation 하는 과정에서

$$|\hat{b}_1| < 0.15 |\hat{b}_2| \text{의 조건이 되면}$$

$d = d_{pri} + 1$ 로 Delay time을 증가 시키고 수정된 Model로 다시 Estimation 하는 과정을 반복 하여 $|\hat{b}_1| < 0.15 |\hat{b}_2|$ 의 조건이 해소 될 때까지 Delay time을 증가시킨 마지막 값이 Process delay time이고 이 수치는 Normalized discrete time으로 환산된 것이므로 Real delay time = $d \times T_s$ 이다. 또 위 시스템이 Stable 하기 위하여는 $a_2 > \frac{1}{4} a_1^2$ 과 $0 < a_2 < 1$ 을 동시에 만족하여야 한다.

4. PID Controller Design

일반적으로 산업체에 실용되고 있는 PID controller는

$$H_{PID}(S) = K \left[1 + \frac{1}{T_i S} + \frac{T_d S}{1 + \frac{T_d}{N} S} \right]$$

와 같고 위식을 Backward difference approximation을 사용하여 Discretization 하면

$$H_{PID}(q^{-1}) = \frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})}$$

$$= K \left[1 + \frac{T_s}{T_i(1-q^{-1})} + \frac{\frac{NT_d}{T_d + NT_s}(1-q^{-1})}{1 - \frac{T_d}{T_d + NT_s} q^{-1}} \right]$$

$$\frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} = \frac{r_0 + r_1 q^{-1} + r_2 q^{-2}}{(1-q^{-1})(1+s_1 q^{-1})}$$

위 식으로부터

$$K = \frac{r_0 s_1 - r_1 - (2 + S_1)r_2}{(1 + S_1)^2}, \quad T_i = T_s \frac{K(1 + S_1)}{r_0 + r_1 + r_2}$$

$$T_d = T_s \frac{S_1^2 r_0 - S_1 r_1 + r_2}{K(1 + S_1)^3}, \quad \frac{T_d}{N} = \frac{-S_1 T_s}{(1 + S_1)}$$

r_0, r_1, r_2, s_1 를 구하기 위하여

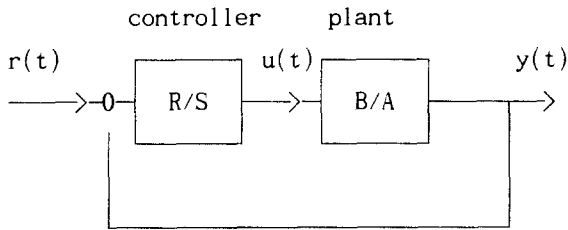


그림 2. 전형적인 폐회로 제어시스템
Fig. 2. Typical closed-loop system

와 같은 간략화된 시스템 구조에서

$$\begin{aligned} \frac{y}{r} &= \frac{B(q^{-1})R(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1})} \\ &= \frac{B(q^{-1})R(q^{-1})}{P(q^{-1})} = \frac{B(q^{-1})R(q^{-1})}{1 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2}} \end{aligned}$$

Controller + Plan를 포함하여 Desired Closed-loop performance가 되도록 p_1, p_2 는 결정되고 Plant model estimation을 통하여 a_1, a_2, b_1, b_2 이 결정되므로

$$\text{문제}는 \frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} = \frac{r_0 + r_1 q^{-1} + r_2 q^{-2}}{(1 - q^{-1})(1 + s_1 q^{-1})} \text{의}$$

r_0, r_1, r_2, s_1 을 구하는것이다.

$$\begin{aligned} A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1}) &= 1 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2} \\ (1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2})(1 - q^{-1})(1 + s_1 q^{-1}) &+ \\ (b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2})(r_0 + r_1 q^{-1} + r_2 q^{-2}) & \\ = 1 + (b_1 r_0 + s_1 + a_1 - 1)q^{-1} + [b_2 r_0 + b_1 r_1 + & \\ s_1(a_1 - 1) + a_2 - a_1]q^{-2} + [b_2 r_1 + b_1 r_2 + s_1(a_2 & \\ - a_1) - a_2]q^{-3} + [b_2 r_0 + b_1 r_1 + s_1(a_1 - 1) + a_2 - a_1]q^{-4} & \end{aligned}$$

위 식으로부터 s_1, r_0, r_1, r_2 을 구하면

$$s_1 = \frac{(p_2 - a_2 + a_1)b_1 b_2^2 - (p_1 - a_1 + 1)b_2^3 - a_2 b_1^2 b_2}{(a_1 - 1)b_1 b_2^2 - b_2^3 - (a_2 - a_1)b_1^2 b_2 - a_2 b_1^3}$$

$$\begin{aligned} r_0 &= \frac{1}{D} [[p_1(a_1 - 1) - p_2 + a_1 - 1 - a_1^2 + a_2]b_2^2 + \\ a_2(a_1 - 1 - p_1)b_1^2 &+ [p_1(a_1 - a_2) + a_1 - a_1^2 + a_1 a_2]b_1 b_2 \\ r_1 &= \frac{1}{D} [[p_2(a_1 - a_2) + p_1 a_2 + (a_1 - a_2)^2]b_1 b_2 + \\ (a_2^2 - p_2 a_2 - a_1 a_2)b_1^2 &+ [p_1(a_2 - a_1) - a_1 + a_1^2 - a_1 a_2]b_2^2 \\ r_2 &= \frac{1}{D} [(p_2 - a_2 + a_1)a_2 b_1 b_2 - (p_1 - a_1 + 1)a_2 b_2^2 - a_2^2 b_1^2] \end{aligned}$$

여기서

$$D = (a_1 - 1)b_1 b_2^2 - b_2^3 - (a_2 - a_1)b_1^2 b_2 - a_2 b_1^3$$

Zero order hold를 갖는 Second order system

$$H(S) = \frac{1 - e^{-ST_s}}{s} \frac{w_0^2}{w_0^2 + 2\zeta w_0 s + s^2}$$

의 Pulse transfer function은

$$H(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}}$$

$$b_1 = 1 - e^{-aT_s} \left(\cos wT_s + \frac{a \sin wT_s}{w} \right)$$

$$b_2 = e^{-2aT_s} + e^{-aT_s} \left(\frac{a \sin wT_s}{w} - \cos wT_s \right)$$

$$p_1 = -2e^{-aT_s} \cos wT_s \quad p_2 = (e^{-aT_s})^2$$

$$a = \zeta w_0, \quad w = w_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$$

5. REAL PROCESS에 적용 실험

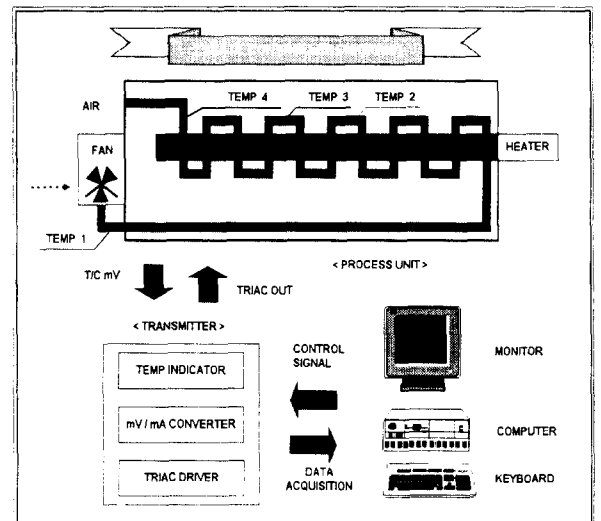


그림 3. 실험에 사용된 온도 제어시스템
Fig. 3. Temperature control system

그림 3은 본 논문에서 검토된 내용을 Simulation 에 의하지 않고 실 Process에서 그 결과를 입증하기 위하여 사용된 실험실 규모의 온도 제어 시스템이다. 본 장비는 통풍계통의 Vane를 조정함에 따라 Delay time을 가변 시킬 수 있으므로 계속적으로 Process특성을 바꾸어 가며 실험을 하였고 여기서는 대표적인 예를 하나만 들기로 한다.

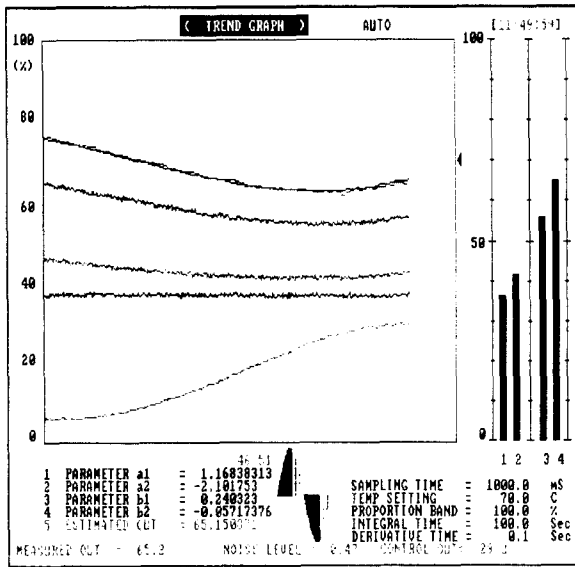


그림 4. CRT에 Display된 실험결과
Fig. 4. Experiment result displayed in CRT

맨위의 곡선이 제어대상인 출구 공기의 온도이고 맨 아래 곡선은 Heater에 공급되는 전원 1 Cycle의 전기각도 $0^\circ - 360^\circ$ 를 Triac trigger 위치에 따라 0 - 100%로 Linearize 한 출력 곡선이다. 이 때 사용된 제어계통의 변수들은 다음과 같다.

- Set point : 70°C
- Proportional band : 100 %
- Integral time : 100 sec
- Derivative time : 0.1 sec

이교 Process identification 에 의하여 Estimate된

$$a_1 = 1.16838 \quad a_2 = -2.101753$$

$$b_1 = 0.240323 \quad b_2 = -0.251273$$

Delay time = 10.34 min 이고

위의 값으로부터 Estimate 된 Output temp. 곡선은 Real temp. 곡선과 분간이 안될만큼 잘 추정되고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

발전소의 온도제어는 Boiler tube 자체는 물론 Turbine 의 수명에 직접적인 영향을 줄 뿐만 아니라 Boiler 온도 제어의 능력에 따라 발전소에서 담당하는 최대부하변화량이 제한되는 중요한 Control loop이다. 여기서는 Test signal에 의하지 않고 자동운전하면서 장시간에 걸쳐 취득한 Data로부터 현재의 PID parameter를 추정하여 알려주고 최적의 값을 제시해주는 방법을 실험장비를 통하여 검증하였으며 앞으로는 Feed-forward, Cascade, Interaction 시스템 등의 Large scale system으로 확대할 계획이다.

참고문헌

- [1] I. D. Landau, "System identification and control design," pp. 179 - 183, 1990
- [2] K. J. Astrom, "Intelligent Tuning and Adaptive Control," pp. 21 -61, 1992.
- [3] C. J. Harris, "Self-Tuning and Adaptive Control," pp. 249 - 278, 1981
- [4] F. G. Shinskey, "Process control system," pp. 85 - 136, 1979