

시간지연을 가진 발전소 제어시스템의 자동동조를 위한 System Identification 방법

System Identification Method for the Auto-tuning of Power Plant Control System with Time Delay

윤명현, 신창훈*, 박익수*

*한국전력공사 전력연구원 (Tel: 042-865-5751, Fax: 042-865-5104, E-mail: yoon@kepri.re.kr)

Abstract Most control systems of power plants are using classical PID controllers for their process control. In order to get the desired control performances, the correct tuning of PID controllers is very important. Sometimes, it is necessary to retune PID controllers after the change of system operating condition and system design change, etc. Commercial auto-tuning controllers such as relay feedback controller can be used for this purpose. However, using these controllers to the safety-critical systems of nuclear power plants may be cause of unsafe operation, because they are using test signals for tuning. A new system identification auto-tuning method without using test signal has been developed in this paper. This method uses process input/output signals for system identification of unknown control process. From the model information of control process which was obtained from system identification approach, the optimal PID parameters can be calculated. The method can be used in the safety-critical systems because it is not using test signals during system modeling process.

Keywords Closed loop control, PID control, System identification, Auto-tuning, Dominant pole design

1. 서 론

화력 또는 원자력발전소의 제어시스템은 크게 수위, 압력, 유량, 온도 제어시스템으로 나눌 수 있다. 이들 제어시스템들은 대부분 비례-적분-미분 (PID) 제어방식에 의해 제어되고 있으며, 발전소 시운전 당시 설정된 제어 파라미터들에 의해 운전되고 있다. 현재 운전중인 발전소의 제어시스템들의 일부는 장시간 운전후 운전조건, 운전방식, 설계의 변경, 설비의 노후화등으로 제어 파라미터 설정치를 변경해야 할 필요성이 있다. 이들 제어 파라미터 보정을 위해 상용화된 자동동조 제어기들이 있으나, 이 제어기들은 확인용 신호를 발생시켜 그 응답으로부터 프로세스의 모델을 구하고 제어 파라미터를 계산하는 방법을 사용한다. 이러한 확인용 신호를 사용할 경우, 특히 안전성이 중요시 되는 원자력발전소의 중요 시스템에는 사용하기 곤란하다.

지금까지 이러한 목적을 위해 많은 자동동조 방법들이 개발되었고 일부 상용화된 자동동조 제어기들이 있으나, 대부분 다음과 같은 절차에 의해 자동동조 과정을 수행한다. 먼저 프로세스의 dynamics 모델을 결정하고 그 모델로부터 제어기의 제어 파라미터를 주어진 설계방법에 따라 계산하여 제어기의 제어 파라미터를 보정해 주는 방법이다. 프로세스 모델링 과정은 크게 확인용 신호를 사용하는 방법과 확인용 신호를 사용하지 않고 운전 중인 상태에서 모델을 구하는 방법이 있다. 확인용 신호를 사용하는 방법에는 1943년 Ziegler와 Nichols가 제시

한 단위계단응답 계산법과 임계이득 및 임계주파수를 이용한 계산법이 있다[8]. 1984년도에 Astrom과 Hagglund는 릴레이를 이용하여 프로세스의 임계 이득 (ultimate gain)과 임계 주파수 (ultimate frequency)를 구함으로써 프로세스의 모델정보를 결정하는 방법을 제시하였다[1]. 확인용 신호를 사용하지 않는 방법에는 1992년에 Melo와 Fiedly에 의해 개발된 방법과[5] 1995년에 Sung과 Lee가 제시한 방법[6] 등이 있다. 이렇게 결정된 모델정보로부터 PID 제어 파라미터를 계산하는 방법에는 Ziegler-Nichols 계산식[8], 1984년 Astrom과 Hagglund가 제안한 이득여유 및 위상여유 설정 계산식[1], 최근에 Zhuang 등이 최적제어 이론을 도입하여 만든 ISTE 최적 파라미터 계산식[7] 등이 있다.

본 논문에서는 발전소의 제어시스템 자동동조를 위해 확인용 신호를 사용하지 않는 system identification을 이용한 방법을 개발하였다. 이 방법은 운전중인 시스템의 입력 및 출력신호로부터 least square 방법으로 프로세스를 모델링하고, 우세극점 설계방법으로 원하는 제어성능을 결정한 뒤 PID 파라미터를 계산한다. 이 방법은 확인용 신호를 사용하지 않기 때문에 운전중인 시스템에 과도상태를 유발하지 않고 제어기를 tuning할 수 있으며, 또한 원하는 제어성능을 얻을 수 있도록 제어기를 설계할 수 있다. 따라서 안전성을 위해 확인용 신호를 사용하기 곤란한 원자력발전소 제어시스템등의 자동동조에 유용하게 사용할 수 있다.

2. System identification 자동동조 방법

본 논문에서 제안한 system identification을 이용한 새로운 자동동조 방법을 그림 1에 나타내었다. 제어 대상 프로세스는 프로세스의 입출력 신호로부터 모델링되고 이것으로부터 최적의 제어 파라미터를 계산한다. 이 방법에서 최적 PID 파라미터를 계산하는 과정은 다음의 4단계로 나눌 수 있다.

- 1) 제어 프로세스의 입출력 신호로부터 프로세스의 모델 결정 (system identification)
- 2) 제어 시스템의 성능 기준 결정
- 3) 디지털 PID 제어기 파라미터 계산
- 4) 아날로그 PID 제어기 파라미터 계산

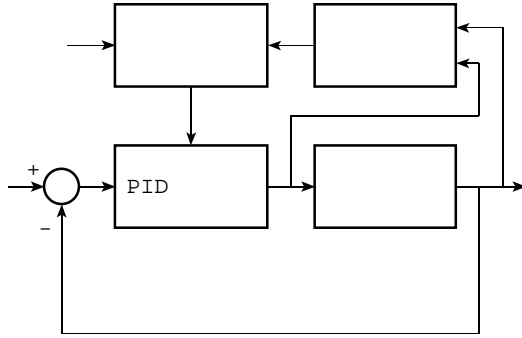


그림 1. 자동동조를 위한 system identification 방법
Fig. 1. System identification auto-tuning method

2.1 프로세스 모델링과 System identification

프로세스의 연속시간 전달함수 $H(s)$ 를 샘플링 시간 T_s 보다 작은 시간지연을 갖는 일차 또는 이차 전달함수로 모델링하면, 이 프로세스의 이산시간 전달함수는 다음과 같은 이차 펄스 전달함수로 나타낼 수 있다[3].

$$H(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (1)$$

원하는 최적의 PID 파라미터를 구하기 위해 먼저 식 (1)의 프로세스 모델을 결정해야 한다. 이 프로세스의 모델 파라미터 (a_1, a_2, b_1, b_2)는 다음의 objective function을 최소화 하는 least square 방법을 사용하여 구한다.

$$J = \sum_{k=0}^{n-1} \{y(k) - y_m(k)\}^2 \quad (2)$$

여기서 $y(k)$ 는 실제 제어시스템이 운전중인 상태에서 측정된 프로세스 출력신호이고, $x(k)$ 가 제어기 출력신호이면 $y_m(k)$ 는 다음의 식을 만족하는 프로세스 모델식이다.

$$y_m(k) = b_1 x(k-1) + b_2 x(k-2) - a_1 y_m(k-1) - a_2 y_m(k-2) \quad (3)$$

식 (2)의 비선형 최소화 문제는 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 이용한 MATLAB으로 풀었다[4].

2.2 제어기 성능 기준 결정

그림 1과 같은 PID 제어기를 가진 프로세스 제어시스템에서 PID 제어기의 전달함수 $H_{PID}(s)$ 는 다음과 같다.

$$H_{PID}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + \frac{T_D}{N} s} \right) \quad (4)$$

여기서 K_P 는 비례이득, T_I 는 미분시간, T_D 는 적분시간, T_D/N 는 적분동작의 filtering 효과이다.

연속시간 PID 제어기를 디지털 제어기로 바꾸는 여러 가지 근사방법중에서 backward difference 근사식을 사용하면 s 는 $(1 - z^{-1})/T_s$ 로 근사된다. 이 근사식을 사용하여 $H_{PID}(s)$ 의 펄스 전달함수를 계산하면 다음과 같다.

$$H_{PID}(s) = K_P \left[1 + \frac{T_s}{T_I} \frac{1}{1 - z^{-1}} + (1 - z^{-1}) \frac{NT_D}{T_D + NT_s} \left(1 - \frac{T_D}{T_D + NT_s} z^{-1} \right) \right] \quad (5)$$

식 (5)의 분자, 분모를 $H_{PID}(z^{-1}) = R(z^{-1})/S(z^{-1})$ 로 나타내면 분자, 분모의 polynomial은 다음과 같다.

$$R(z^{-1}) = r_0 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2} \quad (6)$$

$$S(z^{-1}) = (1 - z^{-1})(1 + s_1 z^{-1}) \quad (7)$$

여기서

$$r_0 = K_P \left(1 + \frac{T_s}{T_I} - N s_1 \right) \quad (8)$$

$$r_1 = K_P \left[s_1 \left(1 + \frac{T_s}{T_I} + 2N \right) - 1 \right] \quad (9)$$

$$r_2 = -K_P s_1 (1 + N) \quad (10)$$

$$s_1 = -\frac{T_D}{T_D + NT_s} \quad (11)$$

이다. 연속시간 PID 제어기와 마찬가지로 디지털 PID 제어기도 4개의 파라미터 (r_0, r_1, r_2, s_1)를 가진다.

이 시스템의 제어성능은 전체 제어시스템의 폐루프 전달함수의 분모 polynomial, $P(z^{-1})$ 의 근에 의해 결정된다. System identification 방법으로 구한 제어 프로세스를 $H(z^{-1}) = B(z^{-1})/A(z^{-1})$ 로 나타내면 $P(z^{-1})$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P(z^{-1}) &= A(z^{-1})S(z^{-1}) + B(z^{-1})R(z^{-1}) \\ &= (1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2})(1 - z^{-1}) \\ &\quad (1 + s_1 z^{-1}) + (b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}) \\ &\quad (r_0 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2}) \end{aligned} \quad (12)$$

전체 제어시스템이 원하는 제어성능을 갖도록 하기 위해 식 (12)의 특성식이 다음과 같은 근을 갖도록 제어기를 설계한다. 즉 식 (12)의 4차 시스템에서 2개의 우세

극점들이 relative damping ζ 와 natural frequency ω_0 를 갖고, 나머지 2개의 real 극점들은 $-\alpha\zeta\omega_0$ 가 되도록 하면, $P(z^{-1})$ 는 다음과 같다.

$$P(z^{-1}) = (1 - p_0 z^{-1})^2 (1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}) \quad (13)$$

여기서 p_0, p_1, p_2 를 ω_0 와 ζ 를 이용해서 나타내면 다음과 같다.

$$p_0 = \exp(-\alpha\zeta\omega_0 T_s) \quad (14)$$

$$p_1 = -2 \exp(-\zeta\omega_0 T_s) \cos(\omega T_s) \quad (15)$$

$$p_2 = \exp(-2\zeta\omega_0 T_s) \quad (16)$$

여기서 $\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$ 이다. 극점 $-\alpha\zeta\omega_0$ 가 ζ, ω_0 에 의해 결정되는 우세극점에서 충분히 떨어지도록 α 를 충분히 크게하면 이 시스템의 제어성능은 ζ, ω_0 에 의해서만 결정된다[2].

PID 제어기의 제어 파라미터들은 식 (12)와 (13)을 풀어서 구할 수 있다. 즉 식 (12)와 (13)은 연속시간 전달함수와 이산시간 전달함수의 상관관계를 나타내는 것으로 프로세스가 결정되면 원하는 시스템 성능에 대한 PID 파라미터 값을 계산할 수 있다.

2.3 디지털 PID 파라미터 계산

식 (13)에서 원하는 제어성능을 갖도록 $P(z^{-1})$ 가 결정되면, 식 (12)와 (13)의 계수를 비교하여 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & 1 \\ b_2 & b_1 & 0 & a_1 - 1 \\ 0 & b_2 & b_1 & a_2 - a_1 \\ 0 & 0 & b_2 & -a_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ r_2 \\ s_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 - 2p_0 - a_1 + 1 \\ p_2 - 2p_0 p_1 + p_0^2 - a_2 + a_1 \\ p_0^2 p_1 - 2p_0 p_2 + a_2 \\ p_0^2 p_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 (17)에서 (a_1, a_2, b_1, b_2) 는 system identification에서 결정되고, p_0, p_1, p_2 는 원하는 제어성능을 갖도록 주어지는 값이므로, 디지털 PID 파라미터 (r_0, r_1, r_2, s_1) 는 4차 선형 방정식 (17)을 풀어서 구할 수 있다.

2.4 아날로그 PID 파라미터 계산

식 (17)에서 (r_0, r_1, r_2, s_1) 가 결정되면 식 (8)~(11)로부터 연속시간 PID 제어기 파라미터를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K_P = \frac{r_0 s_1 - r_1 - (2 + s_1)r_2}{(1 + s_1)^2} \quad (18)$$

$$T_I = T_s \frac{K_P(1 + s_1)}{r_0 + r_1 + r_2} \quad (19)$$

$$T_D = T_s \frac{s_1^2 r_0 - s_1 r_1 + r_2}{K_P(1 + s_1)^3} \quad (20)$$

$$\frac{T_D}{N} = -\frac{s_1 T_s}{1 + s_1} \quad (21)$$

즉, 제어 프로세스의 모델이 결정되면, 우세극점 설계방법에 의해 식 (17)로부터 디지털 제어기 파라미터 (r_0, r_1, r_2, s_1) 가 계산되고, 이것으로부터 식 (18)~(21)을 이용하여 아날로그 제어기 파라미터 (K_P, T_I, T_D, N) 를 계산할 수 있다.

3. 모의실험

앞 절에서 개발된 자동동조 방법을 다음과 같은 두가지 모델에 대해서 최적의 PID 파라미터를 계산하고 relay feedback을 이용한 Ziegler-Nichols 방법에 의한 제어성능과 비교하였다.

$$H_1(s) = \frac{\exp(-0.1s)}{s^2 + 2s + 1} \quad (22)$$

$$H_2(s) = \frac{\exp(-0.2s)}{(s+1)^3} \quad (23)$$

식 (22)와 (23)은 모의실험을 위해 임의로 선정한 모델식이며, 지연시간이 샘플링 시간보다 작고 2차이하의 프로세스로 모델링한 제안된 자동동조 방법의 타당성을 조사하기 위해 지연시간이 서로 다른 2차 및 3차 모델을 선정하였다. 모든 계산은 MATLAB과 SIMULINK 그리고 그 Toolbox들을 이용하였으며 샘플링시간은 0.1초로 계산하였다.

위의 두 식에 대해서 Ziegler-Nichols 방법으로 계산한 PID 파라미터의 값은 표 1과 같다. 그림 2는 이 방법에 의한 step 응답이며, 이 응답으로부터 식 (2)의 objective function을 사용하여 프로세스 모델의 파라미터 (a_1, a_2, b_1, b_2) 를 계산한 결과는 $H_1(s)$ 와 $H_2(s)$ 각각 $(-1.7764, 0.7852, -0.0031, 0.0118)$ 와 $(-1.8962, 0.8998, -0.0134, 0.017)$ 이다.

Sytem identification 방법에 의해 결정된 프로세스 모델에 대해서 $(\zeta, \omega_0, \alpha)$ 를 $H_1(s)$ 와 $H_2(s)$ 각각 (0.7, 1.6, 6)과 (0.8, 0.8, 6)으로 주고 식 (18)~(21)을 이용하여 PID 제어 파라미터를 계산하였다. 계산된 결과를 표 2에 보였다. 본 논문에서 제안된 방법으로 계산한 새로운 PID 파라미터에 의한 step 응답과 Ziegler-Nichols 방법에 의

표 1. Ziegler-Nichols 방법으로 계산한 PID 값
Table 1. PID parameters by Ziegler-Nichols method

| | K_P | T_I | T_D |
|----------|-------|-------|-------|
| $H_1(s)$ | 10.91 | 0.80 | 0.19 |
| $H_2(s)$ | 2.83 | 2.25 | 0.54 |

한 step 응답을 그림 3에 비교하였다. $H_1(s)$ 와 $H_2(s)$ 두 경우 모두에 대해서 Ziegler-Nichols 방법에 비해 제안된 방법으로 제어할 경우 overshoot도 줄어들고 더 빨리 설정치에 안정되어, 더욱 향상된 제어성능을 보임을 알 수 있다.

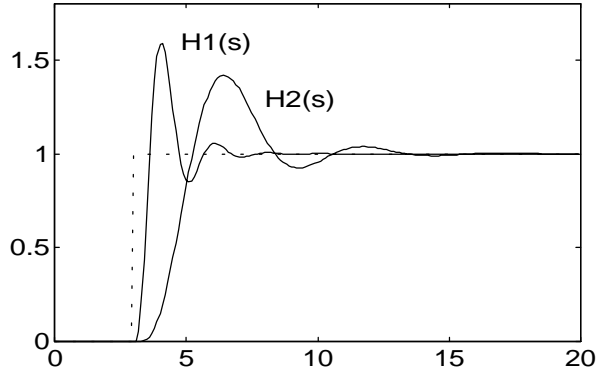
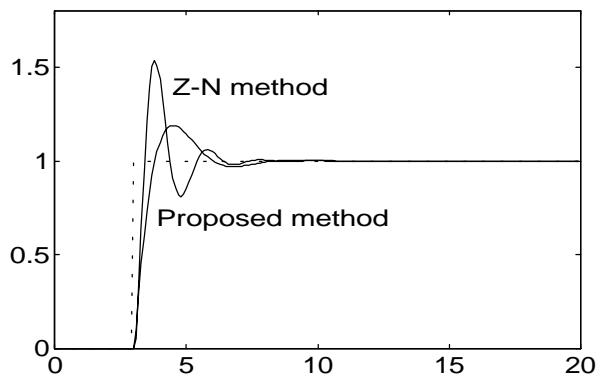
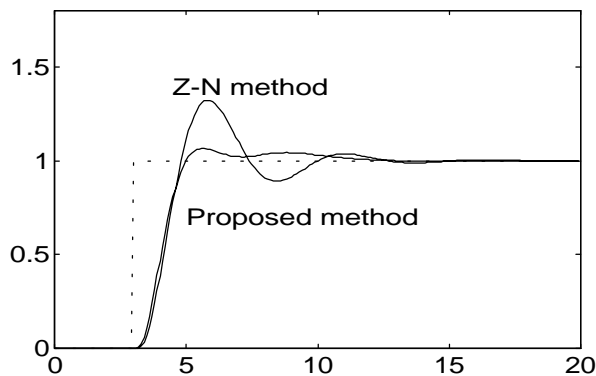


그림 2. Ziegler-Nichols 방법에 의한 step 응답
Fig. 2. Step responses by Ziegler-Nichols method



(a) $H_1(s)$



(b) $H_2(s)$

그림 3. 제안된 방법과 Ziegler-Nichols 방법의 step 응답 비교

Fig. 3. Comparison of step responses of proposed and Ziegler-Nichols methods

표 2. 제안된 방법으로 계산한 PID 값

Table 2. PID parameters by proposed method

| | K_P | T_I | T_D | T_D/N |
|----------|--------|--------|--------|---------|
| $H_1(s)$ | 4.7764 | 0.9640 | 0.3870 | 0.0007 |
| $H_2(s)$ | 2.2352 | 2.0188 | 1.0311 | 0.0073 |

4. 결론

본 논문에서는 발전소의 프로세스 제어시스템 자동동조를 위해 확인용 신호를 사용하지 않는 system identification을 이용한 방법을 개발하였다. 이 방법은 운전중인 시스템의 입력 및 출력신호로부터 least square 방법으로 제어 대상 프로세스를 모델링하고, 우세극점 설계방법으로 원하는 제어성능을 결정한 뒤, 디지털 및 아날로그 PID 파라미터를 계산한다. 이 방법은 확인용 신호를 사용하지 않기 때문에 운전중인 시스템에 과도상태를 유발하지 않고 제어를 tuning할 수 있으며, 또한 원하는 제어성능을 얻을 수 있도록 제어를 설계할 수 있다. 따라서 안전성을 위해 확인용 신호를 사용하기 곤란한 원자력발전소 제어시스템등의 자동동조에 유용하게 사용할 수 있다.

참고문헌

- [1] K. J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of simple regulator with specifications on phase and amplitude margins," *Automatica*, vol. 20, pp. 645-651, 1984
- [2] K. J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of PID Controllers," Instrument Society of America, 1988
- [3] I. D. Landau, "System Identification and Control Design," Prentice-Hall, 1990
- [4] L. Ljung, "System Identification Toolbox for Use with MATLAB," The Mathworks, Inc., 1993
- [5] D. L. Melo and J. C. Friedly, "On-line, closed-loop identification of multivariable systems," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 31, pp. 274, 1992
- [6] S. W. Sung and I. Lee, "On-line Process identification method and automatic tuning of PID controllers," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1995
- [7] M. Zhuang and D. P. Atherton, "Automatic tuning of optimum PID controllers," *IEEE Proceedings*, vol. 140, 1993
- [8] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum setting for automatic controllers," *Trans. ASME*, vol. 65, pp. 433-444, 1943