

화력발전소 보일러 분산제어시스템에 적용된 PID제어기의 성능 분석

이찬주, 이주현
한국전력공사 전력연구원

An analysis of the PID controller applied to DCS for boiler in thermal power plant

Lee Chan-Ju, Lee Joo-Hyun
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 화력발전소 제어는 디지털 분산제어시스템에 의해서 이루어지고 보일러의 각종 프로세스는 대부분 PID제어기에 의해 제어되므로 PID제어기의 최적 조정은 보일러 프로세스의 안정적 운전에 가장 중요한 요소라고 볼수 있다. 이러한 PID제어기는 분산제어시스템 제작사에 따라 구현방법을 달리하고 있으므로 PID제어기의 최적조정을 위해서는 구현된 PID제어기의 알고리즘을 이해하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 먼저 화력발전소 보일러 디지털 분산제어시스템의 국산화 개발품에 채용된 PID제어기와 화력발전소에서 사용 중인 주요 외국 제작사별 PID제어기의 알고리즘에 대하여 기술한다. 임의의 모델링된 프로세스에 대하여 릴레이 퍼드백을 이용하여 임계진폭과 임계주기를 구하고 Ziegler-Nichols 주파수응답법을 이용하여 적합한 PID제어기 파라미터를 산출한 후 각각의 PID제어기에 산출된 파라미터를 적용 시뮬레이션하여 PID제어기들의 성능을 비교 분석하고자 한다.

파수응답법을 이용하여 적합한 PID제어기 파라미터를 산출한 후 각각의 PID제어기에 산출된 파라미터를 적용하여 모의실험 함으로써 PID제어기들의 성능을 비교 분석하고자 한다.

2. PID제어기 알고리즘 비교

PID제어기는 제작사에 따라 각기 다른 알고리즘을 사용한다. 그러므로 알고리즘을 이해하고 시스템의 특성에 따라 적절히 적용하여야 최적의 제어 상태를 유지할 수 있다.

2.1 PID 제어기 기본 알고리즘

일반적으로 PID제어기 알고리즘은 이상형, 직렬형 및 병렬형 세가지 형태로 구분되며, 제작사 나름대로의 파라미터를 추가하여 현장에 적용된다.

2.1.1 이상형 알고리즘

보통 문헌에서 인용되는 이상형 알고리즘은 식(1)과 같다. 그러나 대부분의 현장 제어기들은 이상형 알고리즘을 그대로 사용하지는 않고 있다.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K \left[1 + \frac{1}{Ti \cdot s} + Td \cdot s \right] \quad (1)$$

$U(s)$: 제어기 출력
 $E(s)$: 오차=설정치-제어량 at Reverse Mode
 K : 이득, Ti : 적분시간, Td : 미분시간
 s : 라플라스 연산자

2.1.2 직렬형 알고리즘

현장 제어에서 가장 널리 이용되는 제어기 알고리즘으로 아래의 식(2)와 같다.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K' \left[1 + \frac{1}{Ti' \cdot s} \right] [1 + Td' \cdot s] \quad (2)$$

직렬형 알고리즘의 각 파라미터를 식(1)의 이상형 알고리즘과 비교하여 관계식을 구하면 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} K &= \left(\frac{-Ti' + Td'}{Ti} \right) K' \\ Ti &= \left(\frac{Ti' + Td'}{Ti'} \right) Ti' \\ Td &= \left(\frac{Ti'}{Ti' + Td'} \right) Td' \end{aligned} \quad (3)$$

$Ti > 4 Td$ 일 때 식(3)은 식(4)로 변환되며, 이상적인 PID제어기에 근거해 구한 튜닝값과 같은 효과를 낼 수 있는 PID 파라미터를 다음 관계식에 의해 찾을 수 있다.

$$\begin{aligned} K' &= \frac{K}{2} \left[1 + \sqrt{1 - 4 \frac{Td}{Ti}} \right] \\ Ti' &= \frac{Ti}{2} \left[1 + \sqrt{1 - 4 \frac{Td}{Ti}} \right] \\ Td' &= \frac{Ti}{2} \left[1 - \sqrt{1 - 4 \frac{Td}{Ti}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

1. 서 론

일반적으로 프로세스에 적용되는 제어방식을 순차제어(Sequence Control)와 궤환제어(Feedback Control)로 나눌 수 있다. 순차제어는 여러 가지의 On/Off신호를 요구조건에 따라 순차적으로 입출력하는 것으로 화력발전소의 경우 설비나 기기의 기동, 정지 또는 보호회로에 주로 사용한다. 그리고 궤환제어는 발전소의 운전 중에 주로 사용되며 발전설비가 부하에 탄력적으로 응답할 수 있도록 여러 가지 입력 센서로부터 신호를 받아 적절한 제어 알고리즘을 사용하여 밸브나 펌프같은 구동기에 적절한 제어 동작을 취하도록 한다. 이 궤환제어에 이용되는 제어 알고리즘은 여러가지가 있는데 현재까지 가장 널리 사용되는 것으로 PID 제어기법을 들 수 있다. 최근의 일부 연구에서는 현재까지의 모든 진보된 주요한 궤환제어 알고리즘은 수학적으로 PID 알고리즘의 어떤 형태로 축소하여 활용하기도 한다. 비록 PID 제어에서 최적의 PID 파라미터를 구하는 것이 어렵다고 하지만 측정 불가능 부하 외란에 대해 양호하게 조정된 PID제어기는 다른 제어 알고리즘에 비해서 좋은 알고리즘을 보여주고 있다. [3] 또한 최근에는 마이크로프로세서의 발달로 인해 발전소 제어는 분산제어시스템(Distributed Control System)의 사용자 인터페이스를 통해 입출력 기능블럭(Function Block), PID 기능블럭 등을 사용하여 제어루프를 구성, 활용할 수 있다. 현재 우리나라 발전소에 적용된 분산제어시스템은 대부분 ABB(Asea Brown Boveri), Bailey, Westinghouse, Siemens 등 외국 제작사에 의존하고 있으나, 국산 분산제어시스템의 발전소 적용을 위한 연구개발이 진행되고 있고 적용 준비 단계에 있다. 본 논문에서는 먼저 화력발전소 보일러 디지털 분산제어시스템의 국산화 개발품에 채용된 PID제어기와 화력발전소에서 사용 중인 주요 외국 제작사별 PID제어기의 알고리즘에 대하여 살펴보고자 한다. 임의의 모델링된 프로세스에 대하여 릴레이 퍼드백을 이용하여 임계진폭과 임계주기를 구하고 Ziegler-Nichols 주

2.1.3 병렬형 알고리즘

병렬형 알고리즘은 적분시간과 미분시간이 비례이득에 독립적이라는 것을 제외하고는 이상적인 제어기와 거의 동일한 알고리즘을 가지며 식(5)와 같다.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K'' + \frac{1}{Ti'' \cdot s} + Td'' \cdot s \quad (5)$$

병렬형 알고리즘의 각 파라미터를 식(1)의 이상형 알고리즘과 비교하여 관계식을 구하면 식(6)과 같다.

$$K'' = K, \quad Ti'' = Ti/K, \quad Td'' = Td \cdot K \quad (6)$$

2.2 제작사별 PID 제어기 비교

현재 발전소에 주로 적용되고 있는 분산제어시스템의 제작사별 PID제어기 알고리즘을 형태에 따라 분류하면 다음과 같다. [3],[4],[5],[6]

○ ABB (직렬형)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K \left[1 + \frac{1}{Ti \cdot s} \right] \left[\frac{1 + Td \cdot s}{1 + T1 \cdot s} \right] \quad (7)$$

$T1$: 지연시간

○ Bailey (직렬형, 병렬형)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K \left[1 + \frac{1}{Ti \cdot s} \right] \left[\frac{1 + Td \cdot s}{1 + Td \cdot a \cdot s} \right] \quad (8)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K + \frac{1}{Ti \cdot s} + \frac{Td \cdot s}{1 + Td \cdot a \cdot s} \quad (9)$$

a : 상수, $Td \cdot a$: 미분필터 시상수

○ Westinghouse (병렬형)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K + \frac{1}{Ti \cdot s} + \frac{Td \cdot s}{1 + Td \cdot s} \quad (10)$$

○ 국산 제작사(측정치미분선행형)

$$U(s) = K \left\{ \left(1 + \frac{1}{Ti \cdot s} \right) E(s) + \frac{Td \cdot s}{1 + \frac{1}{8} Td \cdot s} PV \right\} \quad (11)$$

PV : 측정치(Process Value)

3 모의실험

본 절에서는 모의실험에 이용할 프로세스 모델을 선정하여 릴레이 피드백에 의해 프로세스의 임계진폭과 임계주기를 구하고, Ziegler-Nichols 주파수응답법에 의해 PID제어기에 적용할 파라미터 값을 산출하여 Matlab과 Simulink를 이용한 모의 실험으로 PID제어기의 성능을 비교하고자 한다.

3.1 모의 실험에서 이용할 모델과 파라미터

모의실험에 이용할 프로세스 모델로 프로세스의 응답속도에 따라 두 종류의 프로세스 모델을 선정하였다. 릴레이 피드백을 이용하여 프로세스의 임계진폭과 임계주기를 구하고, Ziegler-Nichols 주파수응답법에 의해 PID제어기에 적용할 파라미터 값을 구하고자 한다. 컴퓨터 모의 실험에는 아래와 같이 프로세스 모델을 사용하였다. [2]

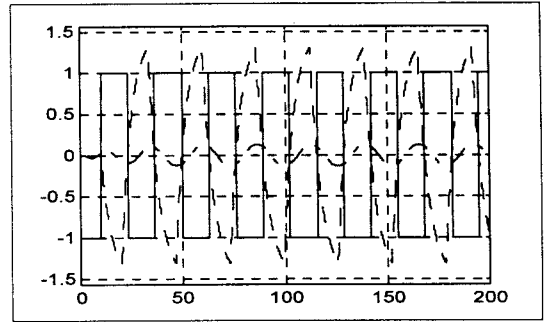
프로세스 1 : 빠른 응답을 갖는 프로세스

$$G_1(s) = \frac{1.5}{1+5s} e^{-10s} \quad (12)$$

프로세스 2 : 느린 응답을 갖는 프로세스

$$G_2(s) = \frac{2.5}{(1+20s)^2} e^{-1.5s} \quad (13)$$

두 경우의 프로세스에 대하여 릴레이 진폭을 1로 주고 프로세스 응답으로부터 임계진폭과 임계주기를 구하기 위한 Matlab 모의 실험 결과는 아래의 <그림1>과 같다. 여기에서 횡축은 시간단위[초]이며 종축은 프로세스의 출력을 의미한다.



<그림1> 릴레이 피드백에 의한 프로세스 응답

임계주기를 tc 라 하고, 프로세스 출력의 진동 신호의 진폭을 a , 인가되는 릴레이 진폭을 d 라 하면 프로세스 응답에 의해 구한 값들은 <표1>과 같다.

| 구분 | tc | a | d |
|--------|------|-------|-----|
| 프로세스 1 | 27.1 | 1.32 | 1 |
| 프로세스 2 | 26.0 | 0.135 | 1 |

<표1> 프로세스 모델에 따른 임계진폭 및 주기

제어계통의 임계주기(tc)는 <표1>의 값에 따라 결정되고 임계이득(kc)은 진동 신호 진폭(a)을 아래의 식(14)에 대입하여 산출할 수 있다.

$$kc = \frac{4d}{\pi a} \quad (14)$$

산출된 tc , kc 를 Ziegler-Nichols 주파수응답법에 적용하면 <표2>의 PID 파라미터를 구할 수 있다.

| 구분 | 비례이득 ($K=0.6kc$) | 적분시간 ($Ti=0.5tc$) | 미분시간 ($Td=0.12tc$) |
|-------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| 프로세스1 | 0.58 | 13.6 | 3.25 |
| 프로세스2 | 5.66 | 13.0 | 3.12 |

<표2> Ziegler-Nichols법으로 산출한 PID파라미터

3.2 모의실험

앞 절에서 구한 PID제어기 파라미터를 이상형, 병렬형 및 국산 제작사의 PID제어기에 적용하여 컴퓨터 모의 실험을 통해 제어 특성을 비교하고 미분선행형 PID제어기의 미분필터 시상수 변경에 따른 제어 상태를 비교하여 보았다.

3.2.1 PID제어기 특성 비교

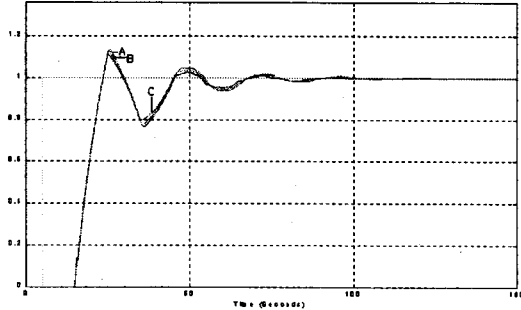
PID제어기 파라미터를 이상형, 병렬형 및 국산 제작사의 PID제어기에 적용하여 컴퓨터 모의 실험을 통해 제어 특성을 비교하였다. 병렬형의 경우 PID 파라미터를 식(6)에 의해 산출된 값을 적용하였고, 국산 제작사의 PID제어기는 형태상 이상형 PID제어기의 변형이라 볼 수 있으므로 Ziegler-Nichols 주파수응답법에 의해 산출된 값을 그대로 적용하였다. 적용된 각각의 PID 파라미터는 <표3>과 같다.

| 구분 | 비례이득 | 적분시간 | 미분시간 |
|--------------|------|-----------|-----------|
| 이상형 | 0.58 | 13.6 | 3.25 |
| 병렬형 | 0.58 | 13.6/0.58 | 13.6×0.58 |
| 측정치 미분선행형 | 0.58 | 13.6 | 3.26 |

<표3> PID제어기 형태에 따른 파라미터 적용

그리고 병렬형과 측정치 미분선행형 PID제어기의 미분

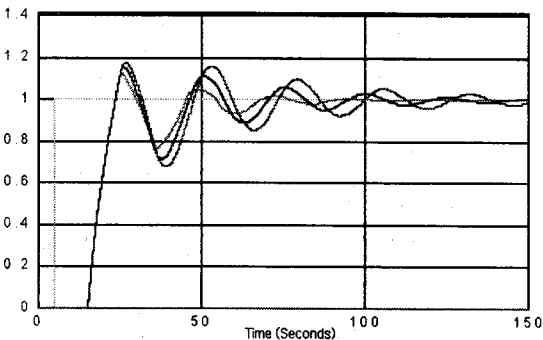
필터 시상수(α)는 일반적으로 사용하는 값인 0.125를 적용하여 실험하였다. 상기의 PID 파라미터와 미분필터 시상수를 적용하여 Matlab과 Simulink로 모의실험한 결과는 <그림2>와 같다. 세가지 형태의 PID제어 알고리즘에 Ziegler-Nichols 주파수응답법에 의해 산출된 파라미터를 적용하면 거의 동일한 제어 특성을 가짐을 알 수 있다. 여기에서 A는 측정치 미분선행형, B는 병렬형, C는 이상형 PID제어를 나타낸다.



<그림2> PID제어기 형태별 제어 특성

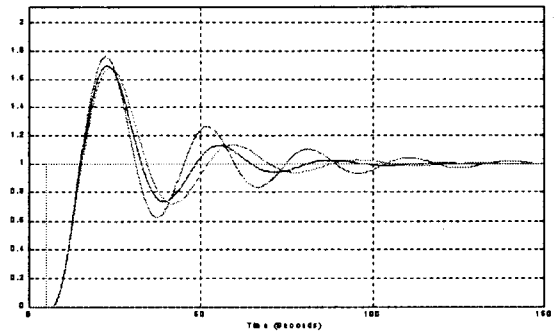
3.2.2 측정치 미분 선행형 PID제어기 분석

미분 동작은 에러 또는 프로세스 값의 변화율에 따라 작용하기 때문에 설정치의 급작스러운 변화나 노이즈에 너무 민감하게 작용하지 않도록 하기 위해서 필터를 이용한다. 그리고 많은 제어기가 실제로 미분 동작에 필터를 이용하고 있다. 일반적으로 미분필터가 첨가된 PID 제어기는 α 와 Td가 결합되어서 미분필터 시상수를 이루고 있으며[식(9), 식(11)] Bailey의 경우 오차에 대하여 미분필터를 적용하고 있으나 국산(L사)의 경우 측정치(PV)에 대하여 미분필터를 적용하고 있다. 이러한 측정치 미분선행형 PID제어기를 응답특성이 빠른 프로세스1과 응답특성이 느린 프로세스2에 대하여 미분필터 시상수를 변경하면서 컴퓨터 모의 실험을 통해서 본 결과는 <그림3>, <그림4>와 같다. 본 실험에서는 α 값을 0.15, 0.5, 1.0으로 증가시키면서 변화상태를 관찰하였다. α 값은 0.03에서 1.0의 값을 가질 수 있는데 일반적으로 실용 제어기에서는 0.1에서 0.125사이의 값을 갖는다.[3]



<그림3> 측정치 미분선행형 PID제어기 특성
(빠른 응답특성의 프로세스에 적용)

빠른응답의 프로세스 적용 결과인 <그림3>에서 볼 수 있듯이 α 값의 증가함에 따라 설정치 변화에 대하여 출력값의 오버슈트가 커지고 정착시간이 길어져서 제어상태가 불안정하게 된다.



<그림4> 측정치 미분선행형 PID제어기 특성
(빠른 응답특성의 프로세스에 적용)

또한 느린응답의 프로세스 적용 결과인 <그림4>에서 볼 수 있듯이 α 값 변화는 제어기 출력에 동일한 영향을 미친다. 그러나 빠른 응답의 프로세스 적용 결과에 비하여 진폭의 감쇄율이 향상됨을 알 수 있다. 실제 현장에서는 미분 동작은 거의 이용하지 않고 있으나 미분필터 시상수에 대하여 이해하고 파라미터를 적절히 설정함으로써 시스템의 안정도를 높일 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

제작사에 따라 구현 방법을 달리하는 PID제어기의 알고리즘을 이해하고 프로세스의 특성에 따라 적절히 적용하여야 최적의 제어상태를 유지할 수 있다. 본 논문에서는 발전소 제어에서 주종을 이루고 있는 PID제어기를 형태별, 제작사별로 정리하였으며 제어기를 튜닝하는데 있어서 간과하기 쉬운 이상형, 직렬형 및 병렬형과 향상된 기능을 부가시킨 실용 PID제어기에 대한 관계를 정리하였다. 두가지 프로세스 모델에 따라 외국 제작사의 미분필터가 첨가된 병렬형 PID제어기와 국산 디지털 분산제어시스템에 구현된 측정치 미분선행형 PID제어기의 알고리즘을 Ziegler-Nichols의 주파수응답법으로 산출된 PID제어기 파라미터와의 관계식을 이용하여 모의실험함으로써 성능을 비교, 분석하였다. 그리고 측정치 미분선행형 PID제어기의 미분필터 시상수가 느린응답의 프로세스 제어의 안전성을 향상시키는데 효과가 있다는 것을 알 수 있었다. 향후 실제 보일러 프로세스 모델에 적용하여 실험함으로써 제어시스템 설치시 PID제어기 파라미터 초기값 선정에 활용할 수 있으리라 본다.

(참 고 문 헌)

- [1] 이찬주, 김용석, "발전소에 도입된 PID 제어기의 고찰 및 분석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B권, pp. 648~650, 1997
- [2] Karl Johan Aström and Tore Hägglund "Automatic Tuning of PID Controllers", ISA (Instrument Society of America), pp. 54~56, 1988
- [3] Gregory K. McMillan "Tuning and Control Loop Performance", Third Edition ISA, pp. 375~393, 1994
- [4] "월성원전 프로세스 최적제어를 위한 자동동조 시스템 개발", 중간보고서, 전력연구원, pp 77~79, 88~91, 1996
- [5] ABB(Asea Brown Boveri) "Procontrol P Binary control, analog control, signal conditioning Function Blocks" pp 55~ 56, 1995
- [6] Bailey "Infi-90 Function Code Application Manual" pp. 156-8, 1993
- [7] Westinghouse "WDPF Control System Function Code Application Manual" pp. 3-176