

## 발전소에 도입된 PID 제어기의 고찰 및 분석

이찬주, 김응석  
한국전력공사 전력연구원

### A Survey and Analysis of the PID controller installed in Power Plant

Chan-Ju Lee, Eung-Seok Kim  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 현재 우리나라 발전소에는 ABB(Asea Brown Bover), Bailey, Westinghouse와 같은 여러 외국 제작사의 분산제어시스템(DCS)이 도입되어 운전되고 있다. 발전소의 만족할 만한 운전성능을 얻기 위해 구성된 제어루프에 가장 널리 이용되고 있는 PID제어기의 기본개념은 이상형 PID제어기와 동일하지만 제작사별로 구현하는 방법에 있어서 다소의 차이가 있다. 본 논문에서는 먼저 제작사에서 제공한 PID 제어블럭의 알고리즘을 비교한다. 이들 중에서 가장 많이 이용되는 직렬형 PID제어기를 Ziegler-Nichols 주파수응답법에 의해 산출된 파라미터보다 직렬형으로 변환된 파라미터를 사용하면 응답특성이 개선되고, 미분동작에서 미분필터 요소를 추가할 경우 프로세스의 안정도를 개선할 수 있다는 것을 컴퓨터 모의실험을 통하여 검증한다.

#### 1. 서 론

발전설비에 적용되는 제어방식은 크게 순차제어(Sequence Control)와 궤환제어(Feedback Control)로 나눌 수 있다. 순차제어는 여러 가지의 On/Off 신호를 요구조건에 따라 순차적으로 입출력하는 것으로 발전소의 기동이나 정지시에 주로 사용하는 방법이다. 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 필요한 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 축소될 수 있다. 비록 PID 제어에서 최적의 PID이득을 구하는 것이 어렵다고 하지만 측정불가한 부하 외란에 대해 양호하게 조정된 PID제어기는 다른 제어 알고리즘에 비해서 좋은 알고리즘을 보여주고

있다.[2] 또한 최근에는 마이크로프로세서의 발달로 인해 발전소 제어는 분산제어시스템(Distributed Control System)의 사용자 인터페이스를 통해 입출력 기능블럭(Function Block), PID 기능블럭 등을 사용하여 제어루프를 구성하고 있다. 현재 우리나라 발전소 제어시스템에 DCS를 공급하는 외국 제작사에는 ABB, Bailey, Westing house 등이 있다. 본 논문에서는 이들 제작사에서 제공하는 PID 기능블럭의 특성을 조사하고, 이들이 이상적인 PID 제어기 구조와 어떤 차이점을 가지는지 분석한 후 산업에서 가장 많이 이용되고 있는 직렬형 PID에 대해서 컴퓨터 모의 실험을 통하여 알아보고자 한다. 또한 시스템의 안정도는 개선되지만 고주파 영역의 노이즈에 대한 증폭작용으로 인해 발전 현장에서 거의 이용되지 않고 있는 미분동작에서 미분필터 요소를 추가할 경우 프로세스의 안정도를 개선할 수 있다는 것을 컴퓨터 모의실험을 통하여 검증한다.

#### 2. 제작사별 PID 제어기 비교 분석

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

대부분의 PID제어기 알고리즘은 이상형, 직렬형, 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 이 알고리즘을 그대로 사용하지는 않고 있다.

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

e : 오차(설정치 - 제어량), u : 제어기 출력  
K : 이득, Ti : 적분시간, Td : 미분시간

### 2.1.2 직렬형 알고리즘

현장 제어에서 가장 널리 이용되는 제어기 알고리즘인 직렬형 알고리즘은 식(2)로 표현되어진다.

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

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

$$K = \left( \frac{Ti' + Td'}{Ti''} \right) K'$$

$$Ti = \left( \frac{Ti' + Td'}{Ti''} \right) Ti'$$

$$Td = \left( \frac{Ti'}{Ti'' + Td'} \right) Td' \quad (3)$$

$Ti > 4 Td$  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.

$$K' = \frac{K}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 - 4 \frac{Td}{Ti}} \right]$$

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

$$Td' = \frac{Ti}{2} \left[ 1 - \sqrt{1 - 4 \frac{Td}{Ti}} \right]$$

### 2.1.3 병렬형 알고리즘

식(5)에 의해 표현되어지는 병렬형 알고리즘은 적분시간과 미분시간이 비례이득에 독립적이라는 것을 제외하고는 이상적인 제어기와 거의 같다고 볼 수 있다.

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

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

### 2.2.1 PID 제어기 알고리즘

현재 발전소에 적용되고 있는 DCS의 제작사별 PID제어 알고리즘을 분류하면 다음과 같다.

○ ABB (직렬형)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K \left[ 1 + \frac{1}{Ti \cdot s} \right] \left[ \frac{1 + Td \cdot s}{1 + T_1 \cdot s} \right] \quad (7)$$

$T_1$  = 지연시간

○ Bailey (직렬형, 병렬형)

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

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

○ Westinghouse (병렬형)

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

### 2.2.2 모의 실험에서 이용할 모델과 파라미터

본 절에서는 제어계의 응답속도에 따라 모델링된 두가지 프로세스 모델을 선정하고, Relay 피드백을

이용하여 프로세스의 임계진폭과 임계주기를 구하고, Ziegler-Nichols 주파수응답법에 의해 PID제어기에 적용할 파라미터 값을 구하고자 한다. 컴퓨터 모의 실험에서 이용되어질 프로세스 모델은 다음과 같다.

프로세스 1 : 빠른 응답을 갖는 프로세스

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

프로세스 2 : 느린 응답을 갖는 프로세스

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

두 경우의 프로세스에 대하여 relay 피드백에 의한 프로세스 응답으로 부터 임계진폭과 주기를 구하기 위하여 Matlab을 사용하여 컴퓨터 모의 실험을 하였다. 횡축의 시간단위는 [초]이며, 종축은 프로세스의 출력을 의미한다.

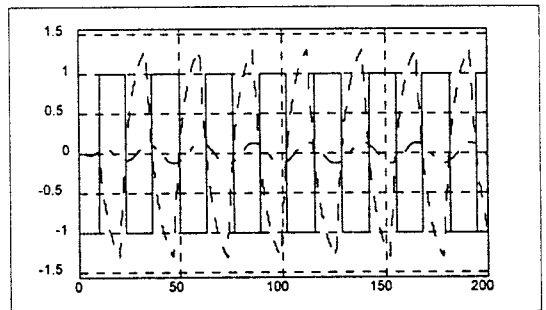


그림 1. relay 피드백에 의한 프로세스 응답

임계주기를  $tc$ 라 하고, 프로세스 출력의 진동 신호의 크기를  $a$ , 인가되는 relay 크기를  $d$ 라 하면 프로세스에 따른 그 값들은 표 1과 같다.

표 1. 모델에 따른 임계 진폭 및 임계 주기

	$tc$	$a$	$d$
프로세스 1	27.1	1.32	1
프로세스 2	26.0	0.135	1

제어계통의 임계주기( $tc$ )는 [그림1]의 값에 따라 결정되고 임계이득( $kc$ )은 진동 신호 진폭( $a$ )을 아래의 식에 대입하여 산출할 수 있다.

$$kc = \frac{4d}{\pi a}$$

산출된  $tc$ ,  $kc$ 를 Ziegler-Nichols 주파수응답법에 적용하면 표 2의 PID 파라미터를 구할 수 있다.

표 2. Ziegler-Nichols법에 의한 PID 파라미터

	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

## 2.3 모의실험

앞 절에서 구한 PID제어기 파라미터를 이상형

PID제어기와 제작사별 PID제어기에 적용하여 컴퓨터 모의 실험을 통해 제어 특성을 비교하고자 한다.

제작사의 직렬형 PID제어기를 Ziegler-Nichols 주파수응답법에 의해 산출된 파라미터와 식(4)를 이용하여 직렬형으로 변환된 파라미터를 컴퓨터 모의 실험을 통해 비교하고자 한다. 또한, 직렬형 PID 제어기 파라미터에 미분요소 필터링 요소를 추가한 PID제어기에 대해서도 알아보하고자 한다.

### 2.3.1 직렬형 PID제어기 튜닝

제작사에서 제공한 직렬형 PID제어기 파라미터를 느린응답을 갖는 프로세스에 적용하여 컴퓨터 모의 실험 결과는 그림 2와 같다

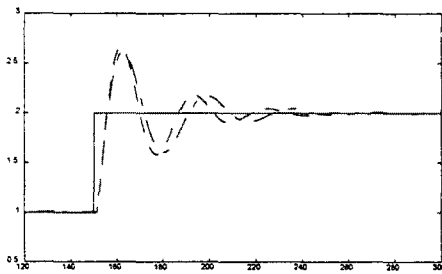


그림 2. 직렬형 PID제어기( $K':3.4$ ,  $Ti':7.8$ ,  $Td':5.2$ )의 프로세스 2의 응답(-:K,Ti,Td,-:K',Ti',Td')

이와 같이 Ziegler-Nichols 주파수응답법에 의해 산출된 파라미터( $K$ ,  $Ti$ ,  $Td$ )를 직접 적용하는 것 보다 직렬형 알고리즘으로 변환된 파라미터( $K'$ ,  $Ti'$ ,  $Td'$ )를 적용하는 것이 이상형 PID제어기와 같은 안정된 응답을 보인다.

### 2.3.2 미분필터가 첨가된 직렬형 PID제어기

미분 동작은 에러 또는 프로세스 값의 변화율에 따라 작용하기 때문에 설정치의 급작스러운 변화나 노이즈에 덜 민감하게 작용하도록 하기 위해서 필터를 이용한다. 그리고 많은 제어기가 실제로 미분 동작에 필터를 이용하고 있다. 식 (8)의 Bailey의 PID제어기를 보면  $\alpha$ 와  $Td$ 가 결합되어서 미분필터의 시상수를 이루고 있다.

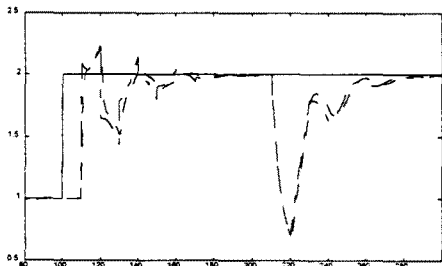


그림 3. 미분 필터에 의한 응답특성(프로세스 1,  $K':0.35$ ,  $Ti':8.23$ ,  $Td':5.37$ , -:  $\alpha=0.12$ , -:  $\alpha=0$ )

프로세스 1에 대해서 직렬형 PID 제어기에 미분 필터를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대해 설정치 응답과 부하의란 응답을 컴퓨터 모의 실험을 통해서 본 결과는 그림 3과 같다.  $\alpha$ 값은 0.03에서 1.0의 값을 가질 수 있는데 보통 0.1에서 0.125 사이의 값을 갖는다. 부하의란은 설정치 응답의 정상상태에서 -1의 일정한 값을 주었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 설정치 응답과 부하의란 응답에서 모두 오버슈트, 에러의 크기 적분값에서 좋은 응답을 가진다. 실제 현장에서는 미분 동작은 거의 이용하지 않고 있는 실정이다. 그러나 미분 동작의 사용은 필터에 대한 이해와 적절한 파라미터 설정으로 시스템의 안정도를 높일 수 있음을 알 수 있다.

## 3. 결 론

발전소 제어에서 주종을 이루고 있는 PID제어기를 형태별, 제작사별로 정리하였으며, 제어기를 튜닝하는데 있어서 간과하기 쉬운 이상적인 PID제어기와 직렬형 PID 제어기, 병렬형 PID 제어기에 대한 관계를 정리하였다. 또한 두가지 프로세스 모델을 선정하고, 직렬형 PID 제어기에 대해서 Ziegler-Nichols 방법으로 구한 PID 제어기 파라미터와 관계식을 이용하여 변형된 파라미터를 컴퓨터 모의 실험을 통해 각각에 대해서 응답을 비교하였다. 또한 미분필터 상수를 이용하여 발전 현장에서 거의 이용하고 있지 않은 미분동작을 효과적으로 사용할 수 있음을 알았다. 발전소 제어시스템의 성능은 PID 파라미터의 값에 의해 결정 되어지는데, PID제어기 형태에 따라 PID 파라미터 튜닝 값을 적절히 선정함으로써 발전설비의 최적 제어를 통한 안정적 운전에 도움이 되리라 기대한다.

### [참 고 문 헌]

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