

국산개발 DCS시스템 현장 적용에 대한 연구

이 주 현, 이 광 훈
전력연구원 시스템통신연구소

An application of a domestically developed DCS system

Joo-Hyun Lee, Kwang Hoon-Lee
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

Abstract - As the modern industrial processes become more complex, it is getting more difficult to model and control the processes. The PID controller has been widely used in power plant process control, since its structure is simple and familiar to the field engineer. This paper describes the application of the PID controller developed DCS system in power plant.

1. 서 론

국가의 기간산업으로서 중요한 역할을 차지하는 전력산업은 사회의 발전과 더불어 증가되는 전력소비량과 양질의 전력을 안정적으로 공급하기 위해서 지속적으로 발전되고 있다. 전력수요에 대하여 발전소를 효율적으로 운용하는 것이 매우 중요하며, 이를 위해 오래전부터 경제적, 기술적, 안정적 기법이 결합되면서 보일러 제어시스템은 많은 발전을 가져왔다.

최근 다양한 현대 제어이론들이 등장하여 이를 이용한 제어기들이 개발되고 실제 산업체에서도 적용이 되고 있으나, 고전제어 이론을 기반으로 설계된 발전소 프로세스 제어에서는 아직도 복잡한 현대제어 개념의 제어기보다 여전히 신뢰성 및 경제성, 안정성 등을 이유로 PID 제어기가 널리 사용되고 있다. 또한 최근에는 마이크로 프로세서의 발달로 인해 분산제어 시스템(Distributed Control System)이 개발되어 전체 시스템을 서브시스템으로 나누어 제어가 이루어 지고 있으며, 입출력 기능블럭(Function Block)등을 사용하여 PID 제어루프를 구성하고 있다. 현재 발전소의 제어시스템이 고도의 신뢰성을 요구하고 있고, 국내에 관련기술의 취약성으로 인하여 DCS 시스템은 Bailey, ABB, Simens 등과 같은 선진외국의 시스템 기술에 의존도가 높은 실정이다. 그러나 최근 발전소 제어시스템의 국산화 노력으로 국내 독자기술로 DCS개발을 위한 기반이 조성되고, 일부 발전플랜트에 국산개발 DCS 시스템이 적용되어 운전됨은 다행한 일 이라 하겠다.

본 논문에서는 국산개발 DCS를 포함한 각 제작사별로 발전소에 적용된 DCS 시스템의 PID제어기 구현방법을 살펴보고, 디지털 필터의 종류, 미분동작에서 필터요소를 추가할 경우의 시뮬레이션 내용과 실제 발전플랜트 온도제어계통 적용을 통해 미분필터 또는 PV(Process Value) 필터 시상수에 대한 이해와 적절한 파라미터의 설정으로 시스템의 안정도를 높일 수 있음을 확인하고자 한다.

2. 본 론

2.1 PID 제어기 기본 알고리즘

PID 제어기는 사용목적에 따라 여러형태를 가지며, 구조에 따라 interactive 또는 noninteractive 제어기로 구분된다. 대표적인 PID 제어기를 전달함수 형태로 나타내면 다음과 같다.

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

$$U(s) = (K_p + \frac{1}{Ti \cdot s} + Td \cdot s)E(s) \quad (2)$$

$$U(s) = K_p(1 + \frac{1}{Ti \cdot s} + \frac{Td \cdot s}{1 + \frac{Td \cdot s}{N}})E(s) \quad (3)$$

식(1)은 interactive, 식(2)는 noninteractive PID 제어기의 대표적인 경우이며, 제어 파라미터 K_p , T_i , T_d 는 각각 비례이득, 적분시간, 미분시간이다. 또한 오차 신호를 미분형태로 피드백하는 항은 잡음신호와 같은 높은 주파수를 가지는 신호의 미분시 급격한 프로세스의 입력을 발생하므로 적당한 극점(Pole)을 갖는 식(3)의 형태를 가지기도 한다. [5]

2.2 미분필터가 첨가된 PID 제어기

제어시스템에 높은 주파수 성분이 포함되어 있으면 미분동작(Derivative)의 특성상 잡음신호가 증폭되어 좋은제어를 기대할 수 없다. 시스템에 따라 잡음의 형태는 다르므로 엄밀하게는 필터의 효율을 나타내는 방법을 시스템에 따라 변화시키는 것이 보다 좋은 제어를 기대할 수 있다. 그러나 실용적으로는 조정가능한 Parameter 수를 늘리면 조정이 복잡하게 되어 대부분 경험적으로 시스템에 적합하도록 필터 시상수의 값을 결정한다.

PID동작의 기본식은 위에 서술한 식(1)과 같이 표현되는데 여기에 미분동작의 필터요소를 고려하여 실용적으로 실제 현장에서 주로 사용하는 PID제어의 연산식은

$$U(s) = K_p(1 + \frac{1}{Ti \cdot s})(1 + Td \cdot s) \quad (6)$$

을 대부분 사용하고 있다. 식(6)에서 미분동작의 부작용을 고려한 실용적인 것은 식(7)과 같이 된다.

$$U(s) = K_p(1 + \frac{1}{Ti \cdot s}) \frac{1 + Td \cdot s}{1 + 0.1Td \cdot s} \quad (7)$$

고주파 영역의 노이즈에 대한 응답특성을 완화하고 프로세스의 안정도 개선을 위해 각종의 디지털 필터가 도입되어 사용되는데 다음과 같은 종류로 구분된다. [6]

2.2.1 1차 지연필터

디지털 필터로서 가장 일반적인 것은 연속계에 있어서 1차 지연필터를 모의한 것이다.

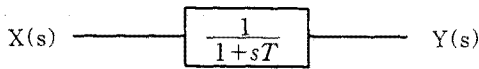
(그림 1)의 관계를 미분방정식으로 표현하면

$$T \frac{dy}{dt} + y = X \text{ 와 같고, 샘플링계에서는 근사적으로}$$

$$T(\frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta T}) + y_n = X_n$$

$$Y_n = \frac{\Delta T}{T + \Delta T} \cdot X_n + \frac{T}{T + \Delta T} \cdot Y_{n-1}$$

로 표현된다. 이와같이 디지털 필터를 통과함으로써 피크치는 $\frac{\Delta T}{(T + \Delta T)}$ 배로 완화된다.



(그림 1) 1차 지연필터

2.2.2 변화량 제한 필터

임펄스 잡음이 예상되는 경우에 선형의 필터를 도입하는 대신에 샘플링마다 데이터의 변화량에 제한을 가하는 방식이다. 수식적으로는 다음과 같이 표현된다.

$$Y_n = X_n \text{ for } |X_n - Y_{n-1}| < K$$

$$Y_n = \lim(X_n - Y_{n-1}) + Y_{n-1} \text{ for } |X_n - Y_{n-1}| > K$$

(단, K=1회마다의 변화량 제한치)

이 방법은 임펄스 잡음에 대해서는 유효하지만 실제 프로세스 변량이 급변한 경우에는 필터출력이 지연될 우려가 있다.

2.2.3 이동평균 필터

주기적으로 외란이 가해지는 경우에는 이동평균 필터가 유효하다. 수식적으로는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_n = \frac{X_n + X_{n-1} + \dots + X_{n-m+1}}{m}$$

디지털 제어시스템에서 프로세스의 실제 변동을 평활화 하기 위해서 필터의 이용은 유용한 것이지만, 잡음을 평활화하기 위해서 필터의 이용은 신중을 기해야 한다.

2.3 제작사별 필터 시상수 적용사례

미분동작은 예러 또는 프로세스 값의 변화율에 따라 작용하기 때문에 프로세스의 안정도 개선을 위해 미분필터 또는 PV(Process Value) 필터 시상수가 첨가된 PID 제어기로 제어시스템을 구현하고 있으나 각기 시스템 제작사별로 조금씩 방법을 달리하고 있다.

2.3.1 Infi-90 System (Bailey사)

PID 알고리즘의 기본식은

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

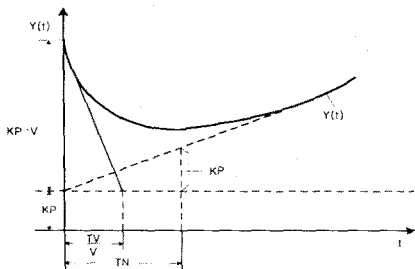
Bailey사의 PID 제어기를 보면 a와 Ta가 결합되어서 미분필터의 시상수를 이루고 있다. 이값은 10에서 20까지의 조정범위를 가지고 있으나 실제 현장에서는 대부분 고정값으로 10으로 설정하여 운영하고 있다.

2.3.2 Teleperm-M System (Simens사)

PID 알고리즘의 기본식은

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{TN} \cdot \frac{1}{s} + \frac{TV \cdot s}{1 + \frac{TV}{V} \cdot s} \right) E(s)$$

여기서 K_p 는 P값, TN은 I값, TV는 D값에 해당하고, Time Lag Constant에 해당하는 값은 TV/V 이다. (그림2)의 Step response Graph에서 보면 TV/V 값의



(그림 2) Step response Graph

변경에 따라 미분동작인 D Action 자체에 영향을 미치게 되어 TV/V 값이 크면 클수록 잡음에 대한 출력은 완화된 것을 확인할 수 있다.

2.3.3 Master P-3000 System (국산)

PID 알고리즘의 기본식은

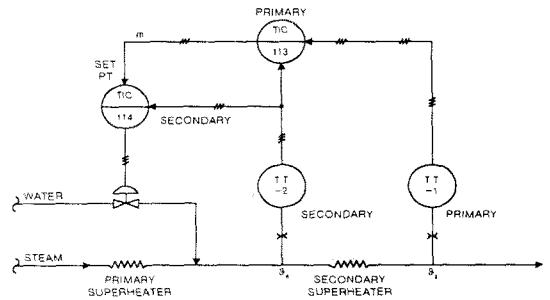
$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{Ti \cdot s} + Td \cdot s \right) E(s)$$

여기서 $E(s)$ 는 실제치(PV)와 설정치(SV)와의 편차 신호로 정동작일 경우 실제치(PV)-설정치(SV) 값으로 표현된다. 국산 DCS 시스템은 PV(Process Value)의 필터시상수인(PV-TC)를 적용하여 입력되는 PV의 값에 1차 지연필터를 통과하게 함으로서 잡음에 대하여 출력값을 완화시키는 역할을 한다.

2.4 발전소 제어시스템 적용

2.4.1 대상 보일러 모델

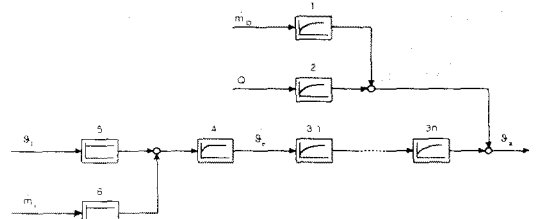
화력발전소 보일러 모델은 제어기에 맞추어 여러개의 서브시스템으로 나누어 질 수 있는데 여기서는 과열기(Superheater)의 온도 동특성에 대해서만 살펴보기로 하겠다. 국산개발 DCS 시스템의 PID제어기를 적용한 여러 회로중에서 미분동작이 사용된 주증기 온도제어 계통의 Control scheme은 (그림 3)과 같다.



(그림3) Control scheme for steam temp. control

발전소에서 과열기(Superheater)는 드럼으로부터 유입되는 포화증기의 수분을 과열증기(Superheated Steam)로 만든다. 이 과정에서 터빈의 열용량 감소와 저압단에서 습분에 의한 부식을 방지하고, 보일러의 효율향상과 과열기 관의 과열을 방지하기 위해서 증기의 온도를 일정하게 유지해야 한다. 증기의 온도를 제어하는 방법에는 여러 가지가 있겠지만 발전소에서는 과열기의 입구나 출구측에 과열저감기(Desuperheater)를 설치하여 급수를 과열증기에 분사시켜 증기의 온도를 일정한 범위의 온도로 유지하고 있다. 이러한 특성을 고려해서 모델의 신호 흐름도를 구성하면 (그림4)와 같다. [1]

여기서 m_L : Main Steam flow, Q : Heating
 θ_e : S/H Inlet Temp., θ_a : S/H Outlet
 θ_1 : Main Steam Temp. m_E : Spray wat

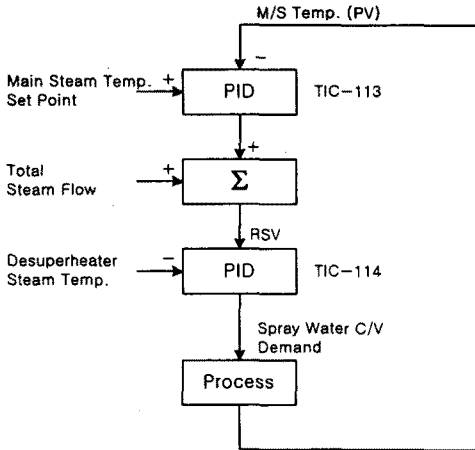


(그림4) Flow diagram of a steam temp. controlled system (Superheater)

2.4.2 주증기 온도제어루프

복제주화력발전소 보일러 주증기 온도제어계통은 전달 함수가 크므로 미분동작을 사용한 Cascade Control 로 제어로직은 (그림5)와 같다.

과열증기의 온도제어는 1차과열기와 2차과열기 사이에 있는 과열저감기에 급수 분무제어밸브를 제어함으로써 일정히 온도를 유지하도록 되어있다. 주증기 온도검출기에서 검출된 온도는 1차 PID제어기(TIC-113)로 들어가 수동 설정된 설정치와 비교되어 편차출력을 발생하게 된다. 여기서 나온 출력신호는 TOTAL 증기유량 신호와 합산되어 과열저감기(2차 PID제어기)의 설정치가 되고, 과열저감기 출구 증기온도 신호와 비교되어 진다음 그 편차 출력으로서 과열저감기 분무 제어밸브를 제어하게 된다.



(그림5) Main Steam Temp. Control Loop

2.4.3 Simulation 및 현장 시운전 결과

본 논문에서 대상발전소로 적용된 복제주화력 발전소 제어시스템은 Fuji 제작사 PLA Model의 아날로그 제어 시스템으로 PID 알고리즘은 다음과 같다.

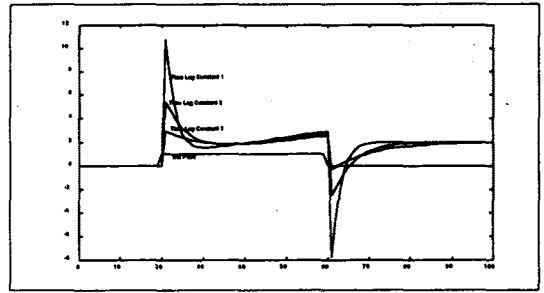
$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot s}\right) (1 + T_D \cdot s) E(s)$$

이에 대해 현장에 적용된 국산개발 DCS 시스템의 PID 알고리즘은 $U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s\right) E(s)$ 으로 기존의 아날로그 제어시스템에 적용하기에는 PID파라미터 값의 일부변환이 필요하다.

$$K_p = \frac{T_I + T_D}{T_I} \cdot K_F, \quad T_d = \frac{T_I T_D}{T_I + T_D}$$

$$T_i = T_I + T_D$$

또한 아날로그 제어시스템에서와 다르게 입력 PV필터 시상수 적용에 대한 검토가 필요한데 국산개발 DCS 시스템은 제작사별 적용사례에서 살펴 보았듯이 1차 지연 필터를 사용하는 형태를 이루고 있다. (그림6)은 필터시상수 변경에 따른 PID 제어기 출력의 변화를 시뮬레이션 한 내용으로 Time Lag Constant 1, 2, 3으로 변경했을 때 Set point 변화에 따라 나타나는 출력의 변화를 도시한 Graph이다.

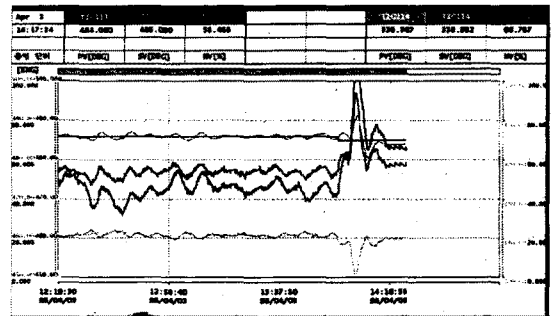


(그림6) PV필터 시상수 변경에 따른 출력(Simulation)

시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 바탕으로 현장 실제통에 적용하였으며, PV입력 필터 시상수의 변경에 따른 제어상태를 나타낸 Trend 화면을 (그림7)에 나타내었다.

이때 사용된 제어계통의 변수들은 다음과 같다.

	TIC-113(1차)	TIC-114(2차)	비 고
Set point	485	339	℃
P / I / D	15/180/60	50/60/30	Sec.
PV필터 시상수	7	7	



(그림7) 주증기 온도제어계통 Trend화면

3. 결 론

본 논문에서는 국산개발된 DCS를 복제주화력발전소 제어시스템에 적용한 결과를 토대로 PID제어기 구현방법을 살펴보고, 디지털 필터의 종류, 각 제작사별 미분 필터 시상수적용 방법을 살펴보았다. 적절한 미분필터 시상수 선정과 파라미터 조정으로 제어시스템의 성능향상에 도움이 되리라 기대한다.

(참 고 문 헌)

- (1) Dr. Ing.Gunter Klefenz, "Automatic Control of Power Plants" PP. 158-167, 1981
- (2) Bailey, "Infi-90 Function Code Application Manu 156-158, 1993
- (3) Simens, "Teleperm-M Automation System AS System Software Manu" PP.403-408, 1992
- (4) LG산전, "Master P-3000 System Function Block M PP. 42-46, 1996
- (5) 이찬주 외, "발전소에 도입된 PID 제어기의 고찰 및 분석" '97하계학술대회, PP. 648-650, 1997. 7
- (6) 윤명현 외, "월성원전 프로세스 최적제어를 위한 자동동조 시스템 개발" 최종보고서, 전력연구원, PP. 9-11, 1997. 11
- (7) 요소기술과정 "계측제어 기술", 한국산업기술센터, PP.106-126, 1996