

화력 발전소 보일러 드럼수위 제어기의 자동 동조

이주현, 주영호, 변승현
전력연구원, 전력연구원, 전력연구원

Auto-tuning of boiler drum level controller in Thermal Power Plant

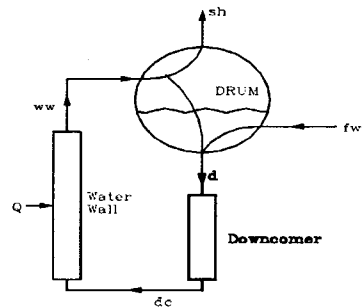
J.H.Lee, H.Y.Joo, H.S.Byun
KEPRI, KEPRI, KEPRI

Abstract - A drum level control is one of the most important control systems in thermal power plant. The control objective of drum level of boiler in thermal power plant is to maintain drum level at constant set-point regardless of disturbance such as main steam flow. The implemented drum level controller is the cascade PI controller. The important factor in drum level controller is the parameters of two PI controllers. The tuning of PI controller parameter is tedious and time-consuming job. In this paper, the relay feedback Ziegler - Nichols tuning method extended to auto-tune cascade PI drum level controller. Finally, the simulation result using boiler model in Power Plant shows the validity of auto-tuned cascade PI controller.

에 대해서 설명하고자 한다. 이를 바탕으로 시뮬레이터를 이용한 모의실험 결과를 통해 제어기 자동동조의 효용성을 살펴보고, 3절에서 결론을 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 대상발전소 드럼수위 계통의 모델



[그림 1] 드럼수위 계통의 모델

1. 서 론

화력발전소에서 중요한 제어시스템인 보일러 드럼수위 제어계통은 증기량의 계단변화에 대하여 일시적인 수축 팽창 현상이 제어를 역동작으로 행하게 하므로 기동 및 저 출력시에 제어가 매우 어려운 실정이다.

드럼 수위 제어 루프는 정상운전 중에 드럼수위가 일정한 설정치를 유지하도록 급수량, 드럼수위, 주증기량의 3요소를 이용하여 드럼수위를 제어하는 일종의 다중입력 단일출력(MISO) 시스템 제어 루프이다. 발전소에 적용되어지고 있는 드럼수위 제어기는 일반적으로 두 개의 PI 제어기가 직렬로 연결되어 있는 Cascade 제어루프에 의해서 이루어지고 있다. 드럼수위 제어상태는 제어기 파라미터의 값에 의해서 결정되므로, PI 제어기의 튜닝이 드럼수위를 제어하는데 있어서 중요하며, 실제 발전소 현장에서의 제어기 튜닝은 많은 시간과 노력을 필요로 하며, 시행착오나 외국 튜닝 기술자에 의해 이루어지고 있는 실정이다. PI 제어기의 튜닝 방법은 여러 가지가 있으나, Ziegler-Nichols의 임계이득과 임계주파수에 근거한 튜닝방법은 넓은 영역의 산업 프로세서에 대해서 PI 제어기의 파라미터의 좋은 설정치를 결정하는 꽤 정확한 경험적인 방법으로 알려져 있다.[1]

더욱이 드럼수위 제어기와 같은 Cascade 제어기는 두 개 이상의 제어기를 잘 튜닝하여야 제어 시스템의 성능을 얻을 수 있으므로 단일 루프에서의 PID 제어기보다도 튜닝이 훨씬 어렵고, 더 많은 시간과 노력을 필요로 한다.

본 논문에서는 임계이득과 임계 주파수에 근거한 Ziegler-Nichols 튜닝방법을 Cascade제어기에 확장 적용하여 드럼 수위 제어기를 튜닝하고자 하며, 제어기 튜닝의 효용성은 발전소 보일러를 열수력학적 모델로 개발된 시뮬레이터를 이용하여 보이고자 한다.

2절에서는 대상 발전소의 보일러 드럼수위 계통의 모델에 대해 기술하고, 드럼수위 제어기 및 자동동조 기법

에 대해서 설명하고자 한다. 이를 바탕으로 시뮬레이터를 이용한 모의실험 결과를 통해 제어기 자동동조의 효용성을 살펴보고, 3절에서 결론을 기술하고자 한다.

이 모델은 (그림 1)에 나타난 바와 같이 드럼, 강수관, 수냉벽의 열수력 현상을 포함하며, 액상과 기상이 열역학적으로 평형 상태에 있다는 가정에서 유도되었다. 강수관(dc)-수냉벽(ww)-드럼(dr)을 순환하는 유량은 강수관-수냉벽 유동의 밀도차 ($\rho_{dc} - \rho_{ww}$)에 의한 압력과 유동에 작용하는 마찰력의 균형으로부터 얻을 수 있다.

$$F_d = F_{dc} = F_{ww} = K\sqrt{\rho g H(\rho_{dc} - \rho_{ww}) / (f_{2p} / f_{1p})}$$

$$\frac{f_{2p}}{f_{1p}} = [1 + x(\frac{v}{v_f})][1 + x(\frac{\mu}{\mu_x})]^{-0.23}$$

여기서, H 는 드럼의 높이이며, f_{2p}/f_{1p} 는 단상 유동-이상유동의 마찰계수의 비이며 건도(x), 단상-이상의 비부피(v), 점도(μ)의 함수이다. 강수관 입구, 강수관, 수냉벽에서의 에너지 보존식은 다음과 같이 표현된다.

$$F_d h_d = F_{fw} h_{fw} + (F_d - F_{fw}) h_f$$

$$(\rho_{dc} V_{dc} + \delta t F_d) h_{dc}^{n+1} = \rho_{dc} V_{dc} h_{dc}^n + \delta t F_d h_d^n$$

$$(\rho_{ww} V_{ww} + \delta t F_d) h_{ww}^{n+1} = \rho_{ww} V_{ww} h_{ww}^n + \delta t F_d h_{dc}^n + \delta t Q$$

드럼내의 압력, 엔탈피를 지배하는 방정식은 드럼 자체의 무게를 고려하도록 탱크 모델을 변형하여 얻었다.

$$\left[\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial p} (1 + C_M \frac{\partial T}{\partial h}) + \frac{\partial v}{\partial h} (1 - \frac{C_M}{v} \frac{\partial T}{\partial p}) \right] V \frac{dp}{dt}$$

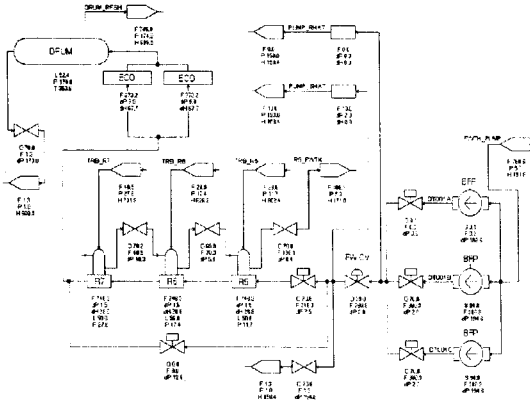
$$= -[v(1 + C_M \frac{\partial T}{\partial h}) - \frac{\partial v}{\partial h} h](F_{fw} - F_{sh}) - \frac{\partial v}{\partial h} (F_{fw} h_{fw}$$

$$- F_{sh} h_{sh} + F_d h_{wc} - F_d h_d) \quad (1)$$

$$(1 + C_M \frac{\partial T}{\partial h}) \rho_{dr} V_{dr} \frac{dh_{dr}}{dt} = -(F_{fw} - F_{sh}) h_{dr} + (F_{fw} h_{fw}$$

$$- F_{sh} h_{sh} + F_d h_{wc} - F_d h_d) + (1 - \frac{C_M}{v} \frac{\partial T}{\partial p}) V_{dr} \frac{dp}{dt} \quad (2)$$

여기서, C_M 은 드럼 자체의 질량과 비열을 드럼 내의 유체의 질량으로 나눈 상수이다. 드럼내의 액상부피는 식 (1)로부터 계산된 엔탈피와 식 (2)로부터 얻어진 압력에서의 포화 엔탈피로부터 환산될 수 있다. 수위는 수평원통이라고 가정된 드럼내에 차지하는 액상의 부피로부터 계산되었다.



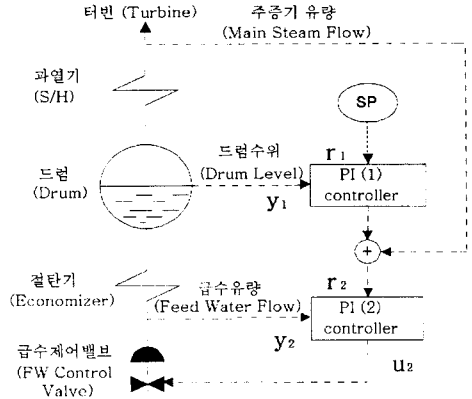
[그림 2] 화력발전소 급수계통 모델

2.2 드럼수위 제어기 자동동조

2.2.1 드럼수위 제어기

드럼수위 제어는 증기량, 급수량, 드럼수위를 제어기의 입력으로 이용하는 3요소 제어로서 보일러 드럼에 보내는 급수를 제어함으로써 이루어진다. 급수 제어의 기능은 유출되는 증기량과 같은 급수량을 공급하고, 드럼수위를 설정치에 일정하게 유지하는 것이다. 3요소 제어 구조에서는 드럼 수위를 외란에 관계없이 항상 설정치로 유지하는 것이 제어의 목적이다. 정상 운전 중에는 드럼의 중앙 이하 부분에는 물이 차 있고, 상부에는 증기가 차 있으나 만일 수위가 너무 높아지면 Carry over 현상이 발생하며 반대로 너무 낮으면 드럼 하부의 과열 및 튜브의 손상을 초래하여 대형 사고를 유발하게 되므로 드럼 수위는 항상 정상으로 유지하여야 한다. [5]

드럼 수위 제어기의 구성은 [그림 3]과 같으며, PI 제어기가 직렬로 연결되어진 Cascade 제어기의 구조를 갖는다. [그림 3]에서 주증기량 (main steam flow)이 드럼 수위 제어에 있어서 외란으로 작용한다.



[그림 3] 드럼 수위 제어기

2.2.2 자동 동조

Cascade 제어기의 튜닝은 내부 루프부터 개별적으로 행해진다. 개별 루프에서의 튜닝은 흔히 이용되고 있는 릴레이 피드백의 튜닝 방법을 이용한다. 이용하는 릴레이의 크기를 d , 진동 프로세스 출력 크기를 a , 임계 진동주기를 T_u 라 하면, 임계 이득 K_u 와 Ziegler-Nichols 방법에 의한 PI 제어기의 파라미터 값은 다음과 같이 구할 수 있다. [1]

$$K_u = \frac{4d}{\pi a}, \quad K_c = 0.45 K_u, \quad T_i = 0.85 T_u \quad (3)$$

본 논문에서는 Relay Feedback 자동 동조 기법을 Cascade 제어기를 동조하는데 확장했으며, Relay는 한번에 하나씩 내부 루프와 외부 루프를 동조한다. 자동 동조하는 순서를 나열하면 다음과 같다.

- 일단 매뉴얼로 시스템을 정상 상태로 올려 놓는다.
- 그 상태에서 일차 제어기 (PI (1))의 출력은 매뉴얼로 고정시킨 후 이차 제어기 (PI (2))의 파라미터 값을 구한다.
- 구한 PI(2)의 제어기 파라미터 값을 이차 루프에 적용하여 폐루프를 구성한 후, 일차 제어루프에 릴레이 피드백을 인가하여, 마찬가지로, 식 (3)에 의해 PI (1)의 파라미터 값을 구한다.

2.3 모의실험 및 결과

2.3.1 실험 내용

모의 실험에서는 이상적인 PI 제어기를 이용하였다.

$$u = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right]$$

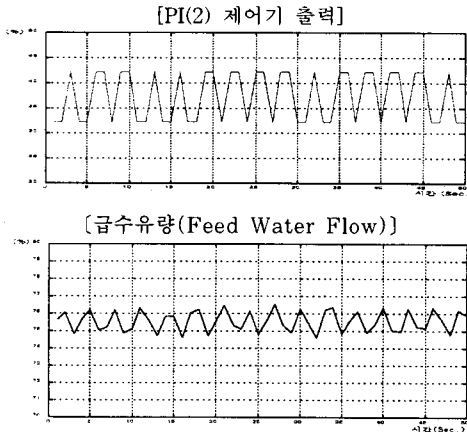
디지털 PI 제어기로의 구현은 적분항을 사다리꼴 합함의 형태로 근사화하고, 속도형 PI제어기를 채용하였다. [2]

$$\Delta u(k) = K_c \left[(e(k) - e(k-1)) + \frac{T}{2T_i} (e(k) + e(k-1)) \right]$$

위의 식에서 T 는 샘플링 타임이며, 모의 실험에서는 200ms를 샘플링 타임으로 이용하였다.

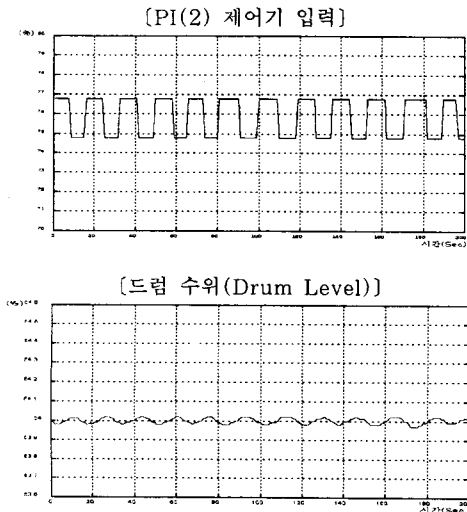
드럼형 보일러의 시뮬레이터를 대상으로 앞에서 기술한 자동 동조 순서에 따라 먼저 발전기 출력이 대응하는 증기유량을 72%에서 드럼수위 제어의 두 제어기를 매뉴얼로 놓아 정상 상태로 가져간 후 [그림 3]의 일차 제

여기 PI(1)을 매뉴얼로 놓은 후 이차 제어루프에 릴레이 피드백을 인가하여 얻은 결과는 [그림 4]와 같으며, PI(2)의 제어기 출력과 급수량을 각각 나타낸다.



[그림 4] 이차 루프에서의 릴레이 피드백

[그림 4]로부터 임계이득 $K_{c2}=5.95$ 과 임계주기 $T_{i2}=3.00$ 을 구할 수 있으며, 식 (1)로부터, $K_{c2}=2.68$, $T_{i2}=2.55$ 을 구할 수 있다.



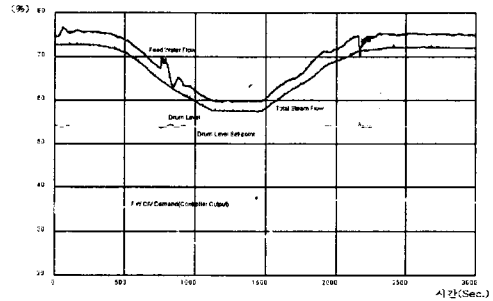
[그림 5] 일차 루프에서의 릴레이 피드백

[그림 4]로부터 구한 PI 파라미터 값을 PI(2)제어기에 적용한 후 이차 제어기를 자동으로 놓고, 일차 제어 루프에 릴레이 피드백을 인가하여 [그림 5]의 결과를 얻을 수 있다. [그림 5]는 PI(2) 제어기의 입력과 드럼 수위를 각각 나타낸다. [그림 5]로부터 임계 이득 $K_{c1}=10.19$ 와 임계 주기 $T_{i1}=20.00$ 를 구할 수 있으며, 식 (3)으로부터, $K_{c1}=4.58$, $T_{i1}=17.00$ 를 구할 수 있다.

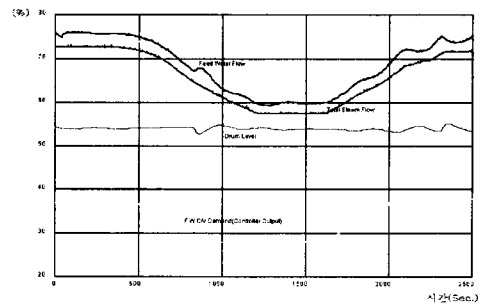
2.3.2 실험 결과

릴레이 피드백 실험을 통해서 구한 제어기 파라미터를 적용한 Cascade PI 제어기를 이용하여 출력에 대응하는 증기유량을 72%의 정상 운전 중에서 분당 3%의 하강율로 증기유량을 58%까지 내렸다가 다시 72%로 올렸을 경우의 드럼수위 제어 결과는 [그림 6]과 같으며, 출력의 급격한 증감발에도 드럼수위가 설정치와 거의 일

치하는 안정된 제어가 수행되고 있음을 확인할 수 있었으며, 이는 [그림 7]의 제어 파라미터 튜닝전(자기동조전)의 드럼 수위의 변동이 2% 이상의 변동폭이 있을 경우와 비교할때 훨씬 개선된 제어 파라미터를 구할 수 있었다.



[그림 6] 자동 동조후 모의실험 결과



[그림 7] 자동 동조전 모의실험 결과

3. 결 론

본 논문에서는 Cascade PI 제어기에 의해 제어되고 있는 드럼 수위 제어 루프에 대해서 릴레이 피드백에 의한 Ziegler-Nichols 튜닝 방법을 확장 적용하고, 화력 발전소 보일러의 열수력학적 모델로 개발된 시뮬레이터를 이용한 모의 실험을 통해 그 효용성을 보였으며, 보다 적절한 제어 파라미터의 선정을 통해 제어시스템의 발전소 현장 적용시 제어기 초기 튜닝 과정에서의 문제점을 상당 부분 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] C.C.Hang, K.J.Astrom, and W.K.Ho, "Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula", IEEE proceedings-D, Vol. 138, No. 2, March, 1991, pp111-118
- [2] Katsuhiko Ogata, "Discrete-Time Control Systems", Prentice-Hall International Editions, pp199-204, 1987
- [3] C.C.Hang, A.P.Loh, and U.V.Vasani, "Relay Feedback Auto-tuning of Cascade Controller", IEEE transactions on Control Systems technology, Vol 2, No 1, March, 1994, pp42-45
- [4] Dr. Ing.Gunter Klefenz, "Automatic Control of Steam Power Plants" PP. 158-167, 1981
- [5] "여수화력 발전소 운전 조작 설명서", 한국전력공사, 여수화력 발전소, 1985
- [6] Leva, A. "PID autotuning algorithm based on Relay Feedback", IEEE Proceedings, 1990.