

공정제어루프 최종 조작부의 동작특성에 관한 연구

김종안, 신윤오
한국전력공사 전력연구원

Control Valve Positioner and Its effect on a Gas Turbine MW Control

Kim Jong An, Shin Yoon Oh
KEPCO, KEPRI

Abstract - The control valve positioner is a high gain plain proportional controller which measures the valve stem position and compares it to its setpoint which is the primary controller output. The positioner in effect is the cascade slave of the primary controller. In order for a cascade slave to be effective, it must be fast enough compared to the speed of its set point change. This paper describes the positioner transfer function and its effect on the entire control loop characteristic based on the simulation results. The result showed that the control valve and positioner determined the gain and phase angle in the high frequency range, while the primary controller and process determined those of the low frequency range. We can also anticipate the combined characteristics in the whole frequency range when each element's frequency response is known.

1. 서 론

공정제어루프의 최종 조작단에는 공기식 제어밸브 또는 유압 서버기구 등이 널리 쓰이고 있다. 보통 공기식 제어밸브에는 포지셔너라는 밸브스텝(Stem) 위치제어기를 설치하여 제어루프의 성능을 향상시키고 있으며, 포지셔너 사용효과는 프로세스의 응답특성이 비교적 느린 공정에서 크게 된다. PID 제어기와 포지셔너 관계는 캐스케이드 제어 구조를 형성하며, 상위 PID 제어기와 포지셔너를 적절히 튜닝하여 전체 제어루프의 응답특성이 제어 목적에 맞게 나타나도록 해야 한다. 본 논문에서는 국내 한 가스터빈 발전기의 출력제어에 사용되고 있는 포지셔너가 달린 공기식 제어밸브 모델링하여 제어루프 최종 단에 위치하는 제어밸브 동작특성이 전체 제어루프에 미치는 영향을 관찰한 결과를 기술하였다.

2. 본 론

제어밸브는 기계 구조상 상당한 값의 시간지연과 시상수를 갖게된다. 그러므로 시간지연과 시상수를 최소화시키기 위해 밸브 포지셔너를 사용한다. 밸브 포지셔너는 기본적으로 상당히 높은 이득(Gain)을 갖는 P 동작 제어기로 볼 수있으며, 밸브 스텝의 위치를 피이드백 받아 설정치(상위 제어기의 출력신호)와 비교하여 스텝의 위치를 정확하게 제어하는 것이 본래 사용 목적이다. 그 외에도 밸브 스텝의 동작속도 향상, 밸브의 특성곡선 수정보완

등 중요한 기능을 가지고 있다.

2.1 제어밸브의 전달함수

그림1은 본 논문의 고찰 대상인 가스터빈의 출력제어(또는 연료제어)에 사용하는 제어밸브(Control Valve) 포지셔너의 블록선도를 전달함수로 나타낸 것이며,

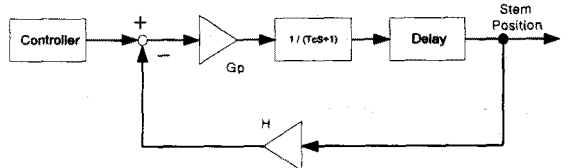


그림 1. 포지셔너가 달린 제어밸브 전달함수

이 것을 근거로 페루프 전체 전달함수 $T_v(s)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$T_v(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (1)$$

식(1)에 시간지연(delay) 전달함수는 식(2)와 같이 근사시킬 수 있다[1]. 여기서 n 값은 클 수록 좋으나 T가 0 이내에서는 n값을 2정도 대입하여도 양호한 결과를 보였

$$\text{시간지연 전달함수, } e^{-Ts} \approx \frac{1}{(1 + \frac{Ts}{n})^n} \quad (2)$$

그림 1의 각 블록 전달함수를 아래와 같이 식(1)에 대입하면 다음 식(5)가 된다.

$$G(s) = Gp * \frac{1}{T_c s + 1} * \frac{1}{(1 + \frac{Ts}{n})^n} \quad (3)$$

$$1 + G(s)H(s) = 1 + Gp * \frac{1}{T_c s + 1} * \frac{1}{(1 + \frac{Ts}{n})^n} * H \quad (4)$$

$$T_v(s) = \frac{Gp * \frac{1}{T_c s + 1} * \frac{1}{(1 + \frac{Ts}{n})^n}}{1 + Gp * \frac{1}{T_c s + 1} * \frac{1}{(1 + \frac{Ts}{n})^n} * H} \quad (5)$$

2.2 밸브 포지셔너 사용 효과에 대한 고찰

캐스케이드 제어 구조가 우수한 성능을 발휘하기 위해서는 상위제어기의 출력신호 변동 속도보다 하위제어기의 제어속도가 훨씬 빨라야 한다. 일반적으로 하위제어기의 시정수가 상위제어기 시정수의 1/10 정도, 또는 하위제어기 진동 주파수가 상위 제어기 진동 주파수의 1/3

이내 인 경우에 캐스케이드 제어가 우수한효과를 나타낸 것으로 알려져 있다. 제어밸브는 기계 구조상 마찰과 히스테리시스가 존재하는데 포지셔너를 사용함으로써 이 값들의 효과를 감소시킬 수 있다[2].

2.3 제어밸브 주파수 특성

가스터빈의 실제 운전자료를 분석하여 그림 1 제어밸브 모델의 파라미터인 $G_p=5$, $T_c=0.5$, 지연시간=0.2, 값을 근사적으로 구하였다. 여기서 G_p 와 H 는 사용자가 쉽게 변경할 수 있도록 실제 포지셔너 구조가 되어있다. 이 파라미터를 (5)식에 대입하여 전달함수 $T_v(s)$ 를 구하면 다음 (6)식이 된다.

$$T_v(s) = \frac{5}{0.0001s^4 + 0.0067s^3 + 0.1s^2 + 0.5s + 2.5}$$

(6)

주파수 특성을 알아보기 위하여 Bode Plot을 그리면 다음 그림 2가 된다. 시뮬레이션은 Matlab을 사용하였다.

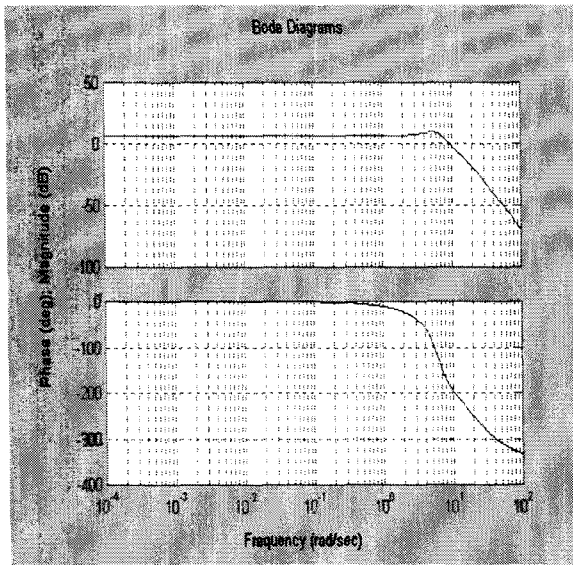


그림 2. 밸브 포지셔너 전달함수 Bode Plot

2.4 가스터빈 출력제어 프로세스 주파수 특성

가스터빈 실제 출력제어계를 간단한 블럭선도로 그리면 그림 3과 같다. 그림 4는 전달함수로 표시한 블럭선도이다.

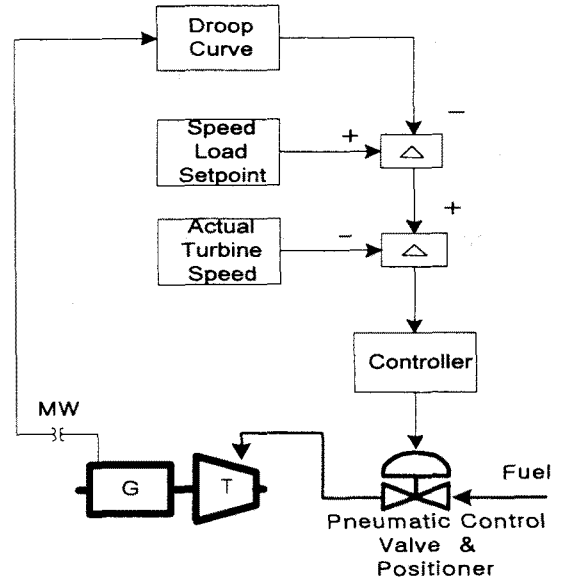


그림 3. 가스터빈 출력제어계의 블럭선도

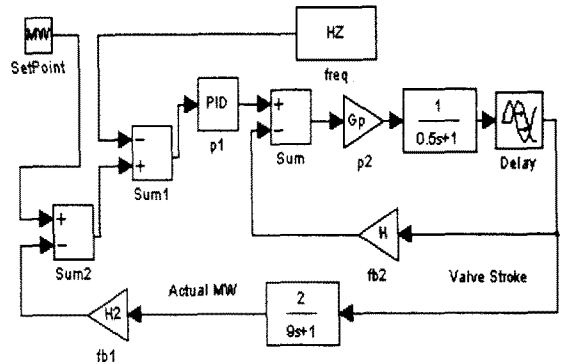


그림 4. 전달함수로 표시한 출력제어계의 블럭선도

그림 3에서는 포지셔너의 위치를 구체적으로 나타내지 않았으나 실제로는 Control Valve 내에 포함되어 있다.

PID 제어를 포함한 프로세스 페루프 전달함수 $T_p(s)$ 를 구하면 다음 식(7)이 된다.

$$T_p(s) = \frac{120s+1}{180s^2+26s+0.05} \quad (7)$$

이 $T_p(s)$ 는 그림 4에서 포지셔너와 제어밸브에 해당하는 그림 1의 전달함수 부분을 제거한 후 나머지에 대한 전달함수가 된다. 이 때의 Bode Plot를 보면 다음 그림과 같다.

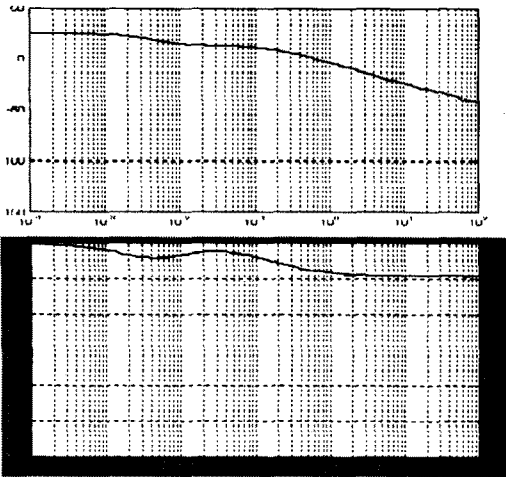


그림 5. 출력제어 프로세스 전달함수 Bode Plot

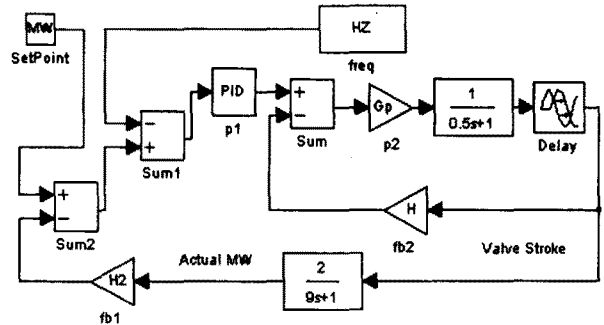
2.5 밸브포지셔너를 포함한 전체 주파수 특성

그림 6은 포지셔너와 제어밸브를 포함한 출력제어계의 주파수 응답을 나타낸 Bode Plot이다.

그림 5와 6을 비교하면 제어밸브가 없는 프로세스의 주파수 응답인 그림 5가 우수한 것으로 보인다. 그러나 제어밸브가 없는 프로세스를 제어할 수는 없고, 제어밸브에서 발생하는 마찰, 히스테리시스 등에 의한 시간지연, 시정수 등 문제점을 최소화 시켜기 위해 포지셔너를 사용한다. 시뮬레이션으로한 결과를 종합하면, 상위 PID 제어를 포함한 프로세스의 특성이 전 주파수 영역에서 이득을 지배적으로 결정하였고, 밸브 포지셔너는 높은 주파수 대의 이득과 위상지연에 많은 영향을 미쳤다. 프로세스의 시정수가 9초로서 밸브 포지셔너의 시정수 0.5초보다 훨씬 크기 때문에 프로세스 측이 넓은 주파수 범위에서 이득에 영향을 미치고, 제어밸브는 시정수가 작으나 시간지연 요소에 의해 높은 주파수 대의 이득과 위상지연에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

순수시간지연 요소에 의한 고주파수 대의 위상지연 크기는 아래 식(8)로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 e^{-s\theta} &= e^{-j\omega\theta} \\
 &= \cos \omega\theta - j\sin \omega\theta \\
 \phi &= \tan^{-1} \left(-\frac{\sin \omega\theta}{\cos \omega\theta} \right)
 \end{aligned} \quad (8)$$



[그림 5] 포지셔너 포함 출력제어계 전달함수 블록선도

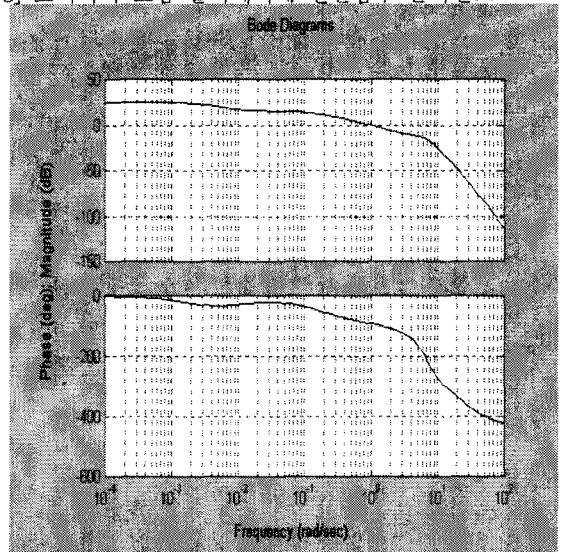


그림 6. 포지셔너를 포함한 출력제어계 Bode Plot

3. 결 론

공정제어의 최종단에 있는 밸브 포지셔너는 전체 제어 루프 성능을 향상시키기 위해 사용된다. 일반적으로 프로세스의 시정수가 제어밸브의 시정수에 비해 훨씬 크기 때문에 상위 제어를 포함한 프로세스 측 특성이 주파수 응답의 기본 틀을 형성하고, 여기에 제어밸브와 포지셔너의 고주파수 영역 응답이 중첩되는 형태로 나타났다. 보통 온도, 수위 등의 공정제어에서는 고주파수 영역의 응답이 그다지 중요하지 않으나, 주파수 추종제어, 유량제어 등 빠른 응답을 필요로 하는 공정에서는 포지셔너를 포함한 제어밸브의 특성이 큰 영향을 미치게 된다. 실제 본 논문의 고찰 대상 모델인 가스터빈에서 주파수 추종제어 루프의 고주파수 영역 응답 문제를 상위 제어기 조정이 아닌 밸브 포지셔너 조정으로 해결한 사례가 있다. 프로세스 특성이 달라지면 이에 따라 적용하는 제어기와 밸브 포지셔너 최적조정 값이 달라지게 되며, 이에 대한 연구를 향후 계속하고자 한다.

(참고 문헌)

- [1] Automatic Control Systems by Benjamin Kuo, 4th p454, 1982.
- [2] Bela G Liptak, "Process Control, Third Edition, Ac p416~423, 1995.
- [3] 박선원 외 역, "공정동특성 및 제어", p321~340, 1995.