

발전소의 운전데이터에 의한 가스터빈 제어계통의 성능 평가지수에 따른 PI 제어기 응답특성 비교

우주희, 정창기
전력연구원 시스템통신연구소

An comparison on response of PI controller by various performance criteria in gas turbine control system

Joo-Hee Woo and Chang-Ki Jeong
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - PID controllers are widely used in the process industries such as power plants and chemical plants. Several methods for determining PID controller parameters have been suggested to improve tuning results by various performance criteria during the past years. These methods may not produces satisfactory closed loop response by the characteristics of controlled processes. In this paper, using a model of gas turbine system obtained by operating data of Gunsan C/C, we examines the performance of PI controllers determined by various performance criteria and suggests which tuning methods can be optimally used in gas turbine control system of Gunsan C/C.

터빈에 팽창시켜 터빈을 회전시켜 전기적인 출력을 발생시킨다[2]. 발전소 가스터빈의 제어는 터빈속도, 배기온도 및 압축기 출구압력 등을 감지하여 유니트의 운전조건을 결정하여 터빈으로 공급되는 연료량을 조절함으로써 이루어진다. 그 세부적인 항목은 기동제어, 가속제어, 속도제어, 온도제어 등이며 구조는 아래 그림과 같다[3,4].

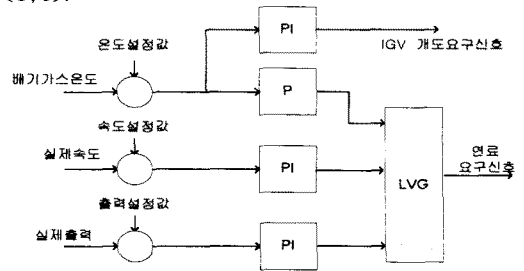


그림 1. 가스터빈 제어시스템의 구조

1. 서론

발전소 등의 대형 공정 플랜트에서 사용되고 있는 대부분의 상용제어기는 PID 제어기이며, 그 중에서도 PI 제어기가 상당부분을 차지하고 있다. 1930년대에 비해, 적분 및 미분의 세 가지 모드의 되먹임제어동작을 갖는 제어기가 소개된 이래로 PID 제어 알고리즘에 대한 연구가 계속 진행되어 왔다. 일반적으로 PID 제어기 이득은 제어대상 프로세스의 1차시간지연 모델로 근사화시켜 계산하는 방법과 한계이득 및 주기를 구하여 계산하는 방법이 있다. 이들 각각의 방법에 대해 제어기 이득을 최적으로 구하기 위해 여러 가지 성능 평가지수가 도입되어 최적의 제어기 파라미터를 구하는 관계식이 도출되었다[1]. 현재 PID제어기의 최적 튜닝을 위해 이용되는 평가방법으로는 ISAE, ISE, ISTE와 IST^2E 등이 있으며, 제어기 이득은 이들 평가방법에 따라 혹은 적용대상 프로세스 특성에 따라 다르게 된다.

본 논문에서는 군산 가스터빈의 실제 운전데이터를 이용해 구한 가스터빈 계통의 전달함수에 여러 가지 평가지수에 의해 다르게 결정되는 PI제어기의 이득을 1차시간지연모델 및 한계이득과 주기를 이용하여 구하고, 기존의 Ziegler-Nichols방법 등에 의해 구한 PI제어기를 사용하여 서로간의 응답특성을 비교 고찰함으로써 군산 복합의 가스터빈 제어시스템에 최적으로 적용가능한 PI 제어기의 이득을 구하는 방법을 논하고자 한다. 2절에서 가스터빈 제어시스템의 일반적인 내용에 대해서 언급하고, 3절에서는 기존에 연구된 성능 평가지수에 따른 PI 제어기 이득을 구하는 방법을 설명하고, 4절에서는 모델링된 가스터빈 제어시스템에 대해 모의실험한 결과를 보여주며, 마지막 5절에서 결론을 맺고 있다.

2. 가스터빈 제어시스템 일반

발전소 가스터빈은 압축기에서 공기를 압축하여 연소기에서 연료와 함께 연소시켜 발생된 고온의 연소가스를

속도제어는 터빈이 기동시부터 정격속도를 낼 때까지 적용되며 지정된 가속률이 초과되면 항상 동작하는 가속제어와 기동완료시점에 터빈을 동기속도로 조절하는 Speed Matching 제어와 발전기가 계통병입후 계통주파수와 같은 속도로 운전될 때의 Droop Speed 제어로 이루어진다. 온도제어는 부품의 설계 열응력 한계 이내로 운전되도록 제어가 이루어진다. 그리고 최종 연료요구 신호는 그림 1의 각 제어기출력값중 가장 작은값(LVG)이 선택되어 가스터빈의 제어가 이루어진다. 이상의 결과를 보면 각각의 제어기는 주로 P 혹은 PI제어기로 이루어져 있음을 알 수 있다.

3. 성능평가 지수에 따른 PI 제어기

일반적인 PID 제어기의 형식은 아래와 같다.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i} s + T_d s \right) \quad (1)$$

제어기 파라미터의 설계식이 설정값 및 부하변화에 대해 각각 제시되어 있으며, 일반적으로 부하변화에 대한 설계를 설정값변화에 적용하면 큰 오버슈트를 보이며, 반면에 설정값변화에 대한 설계를 부하외란에 적용하면 느린 응답을 주게 되므로 이에 대한 선택이 필요하다. 본 논문에서는 계통병입후 전부하를 낼 때까지의 구간에 대한 가스터빈 제어시스템을 설계하는 것이 목적이므로, 설정값변화에 대한 PI 제어기의 이득계산방법에 대해서 언급하겠다[1].

3.1 시간 응답특성을 이용한 이득

주어진 플랜트 모델의 계단변화 입력에 대한 출력의 응답을 보고 아래와 같은 플랜트의 1차시간지연모델을 구할 수 있다.

$$\widehat{G}(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-s\tau} \quad (2)$$

이 1차 시간지연모델을 찾는 방법은 모델의 응답이 최종값의 63.2%에 이르는 시간을 찾거나 출력에 가장 큰 기울기를 갖는 접선을 구하여 모델을 찾을 수 있다. 이외에 Sundaresan과 Krishnaswamy[5]는 접선을 이용하지 않고 모델의 응답이 최종값의 35.3%와 85.3%에 이르는 두 시점 t_1 과 t_2 를 구하여 모델을 구하는 방법을 제시하였다.

$$\tau = 1.3t_1 - 0.29t_2, \quad T = 0.67(t_2 - t_1) \quad (3)$$

이 1차시간지연 모델에 근거한 PI제어기 이득의 설계식들은 각각의 성능 평가기준에 따라 여러 가지 형태가 존재한다. Cohen-Coon은 1/4 감쇠비를 갖는 단진루프 응답을 보여주는 제어기 이득을 다음과 같이 제시하였다(Method 1).

$$K_p = \frac{T(0.9 + \tau/(12T))}{K\tau}, \quad T_i = \frac{\tau[30 + 3(\tau/T)]}{9 + 20(\tau/T)} \quad (4)$$

그러나 이 방법의 단점은 1/4감쇠비 응답은 일반적으로 현장에서 너무 심한 응답으로 생각되므로 아래와 같은 성능 평가지수에 근거한 제어기 설계식이 제시되었으며, 이 방법에 대한 각각의 제어기 이득은 아래 관계식 및 표 1과 같다.

- ITAE (Integral of the Time-weighted Absolute Error) :

$$\int_0^{\infty} t|e(t)|dt$$

- ISE, ISTE, IST²E (Integral of Square of the

$$\text{Time Multiplied Error}) : \int_0^{\infty} t^n e^2(t) dt$$

(각각 $n=0,1,2$ 일때의 성능 평가지수임)

$$K_p = \frac{a_1}{K} \left(-\frac{\tau}{T}\right)^{b_1}, \quad T_i = \frac{T}{a_2 + b_2(\tau/T)} \quad (5)$$

표 1. 설정값 변화에 대한 제어기 이득

τ/T range	0.1 ~ 1.0			
Method	2	3	4	5
적용기준	ITAE	ISE	ISTE	IST ² E
a_1	0.586	0.980	0.712	0.569
b_1	-0.916	-0.892	-0.921	-0.951
a_2	1.03	0.690	0.968	1.023
b_2	-0.165	-0.155	-0.247	-0.179

ISE 기준은 ITAE기준과 비교할 때 큰 오차는 용납하지 않는 반면 작은 오차에 대해서는 관대한 응답을 주는 제어기 이득을 제시한다. 시간 가중치를 갖는 기준은 초기에 나타나는 오차에 대해서는 관대한 반면 시간이 지나면서 줄어들이지 않는 오차는 용납하지 않는 특성을 가진다.

3.2 주파수 응답특성을 이용한 이득

릴레이 제한제어를 이용한 지속적으로 진동되는 플랜트 모델의 한계이득(K_c) 및 한계주기(T_c)를 사용하여 제어기 이득을 조율하는 방법이 식 6과 같이 Ziegler와 Nichols에 의해 제시되었다(Method 6).

$$K_p = 0.45K_c, \quad T_i = 0.8T_c \quad (6)$$

ISTE에 근거한 한계이득 및 주기를 사용한 제어기 관계식은 식 7과 같다(Method 7).

$$K_p = 0.361K_c, \quad T_i = 0.083(1.935KK_c + 1)T_c \quad (7)$$

또한 Astrom-Hagglund은 ISTE에 근거한 이득 및 위상여유를 고려한 개선된 설계식을 식 8과 같이 제시하

였으며, 이 방법은 프로세스의 임계점을 PID 제어기를 사용하여 지정된 범위로 이동시키게 한다(Method 8).

$$m = 0.614(1 - 0.233 e^{-0.347KK_c}) \quad (8-a)$$

$$\phi = 33.8^\circ (1 - 0.97 e^{-0.45KK_c}) \quad (8-b)$$

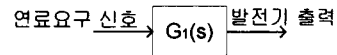
$$\alpha = 0.413(3.302KK_c + 1) \quad (8-c)$$

$$K_p = mK_c \cos \phi, \quad T_i = \alpha T_d \quad (8-d)$$

$$T_d = \frac{\tan \phi + \sqrt{(4/\alpha) + \tan^2 \phi}}{2\omega_c} \quad (8-e)$$

4. 모의실험

모의실험에 사용할 가스터빈 제어시스템의 모델은 군산복합화력에서 실제 취득한 데이터를 사용하여 모델링한 결과를 사용하였다[6]. 이 참고논문은 기동구간 및 가속제어구간을 지나 계통병입에서 발전기 출력을 100%로 상승시키는 구간까지의 1초주기로 취득한 실측 자료를 가지고 순환최소자승법(RLS: Recursive Least Square Algorithm)을 사용하여 모델식의 파라미터를 추정하였다[7]. 이 구간의 모델식의 입출력 관계는 터빈 속도는 3600rpm으로 일정하게 유지되고 있는 상태에서 각 제어기 출력인 연료요구 신호에 따른 가스터빈 출력 및 연료요구신호와 입구측 가이드베인의 개도각(공기 유입량)에 따른 배기가스 온도의 관계를 구하였다. 이 모의실험에서는 MATLAB의 SIMULINK를 사용하였다. 먼저 연료요구신호에 따른 발전기 출력의 관계 $G_1(s)$ 는 아래와 같다.



$$G_1(s) = \frac{0.0065s + 0.0011}{s^2 + 0.049s + 0.0009} \quad (9)$$

이 모델의 1차시간지연모델은 3.1절의 결과를 사용하여 구하였으며 ($t_1 = 32, t_2 = 83$), 한계이득 및 주기는 위에서 구한 모델식을 사용하여 구하였으며, 이들 결과를 이용한 PI이득은 아래 표 2와 같다.

$$\widehat{G}_1(s) = \frac{1.23}{34.2s + 1} e^{-17.5s} \quad (10)$$

표 2. $G_1(s)$ 의 PI 이득

Method	K_p	T_i	
시간 영역	1	1.50	28.68
	2	0.88	36.17
	3	1.45	56.00
	4	1.07	40.64
	5	0.87	36.72
주파수 영역	6	1.37	45.70
	7	1.10	39.05
	8	1.55	38.24

$$- T_c = 57.12 (\omega_c = 0.11), \quad K_c = 3.04$$

$$- \phi = 27.71^\circ, \quad m = 0.575, \quad \alpha = 5.513, \quad T_d = 6.936$$

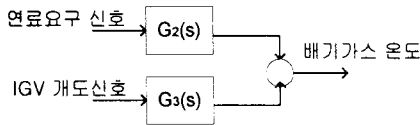
표 2의 이득을 사용한 단위계단입력에 대한 실험결과는 아래 표 3과 같다. 응답특성을 살펴보면 연료요구신호와 출력의 입출력관계 모델식은 식 (10)과 같이 시간지연이 크고 프로세스 동특성도 매우 느린 것으로 나오는데, 이는 발전기 출력의 설정값이 계통병입부터 정격출력을 낼때까지 어떤 제한된 기울기를 가지면서 변하므로 발전기 출력도 이에 따라 천천히 변화기에 나타난 현상이다. 경사로 변하는 설정값에 대한 응답특성 또한 모의실험에

서한 단위계단입력에 대한 응답특성과 비슷한 특성을 가질 것이다. 그 결과 방법 1은 예상대로 1/4의 오버슈트를 가지며, ISE기준(방법3)은 ISTE 및 IST²E(방법 4, 5)와 비교해 보면 정착시간이 더 길어져서 상대적으로 작은 오차에 대해 관대한 특성을 보여주며, 또한 방법 3은 방법 4, 5에 비교하여 초기의 오차에 대한 관대한 특성을 보여주는데 이는 상승시간이 더 짧아서 더 작은 절대오차합을 가진 결과를 보면 알 수 있다. 또한 주파수영역에서의 응답특성은 시간영역에서의 특성과 비교하여 오버슈트가 크지만, 상승시간 및 정착시간은 비슷하면서도 절대오차합이 작은 응답특성을 보여주고 있다. 실제 운전시 발전기 출력응답은 오버슈트가 없거나 작은 응답을 보여주는 제어기 이득의 선택이 바람직하다.

표 3. $G_1(s)$ 의 실험결과

평가지수	상승 시간	정착 시간	최대오버 슈트(시간)	절대 오차합
Method 1	33	170	0.25 (73)	40.792
Method 2	54	131	0.09 (104)	42.548
Method 3	45	159	0.04 (81)	33.936
Method 4	48	117	0.08 (94)	38.548
Method 5	53	130	0.08 (105)	42.570
Method 6	42	105	0.09 (83)	34.315
Method 7	46	120	0.10 (93)	38.560
Method 8	36	158	0.16 (75)	34.850

또한 배기가스 온도의 모델식은 아래의 구조를 사용하여 구하였다.



$$G_2(s) = \frac{0.0939s^2 - 0.0941s + 1.1058}{s^3 + 1.4563s^2 + 10.4693s + 1.1066} \quad (11)$$

$$G_3(s) = \frac{0.0131s^2 + 0.4137s - 0.1096}{s^3 + 1.4563s^2 + 10.4693s + 1.1066} \quad (12)$$

온도제어시 IGV 개도신호는 균산복합인 경우 기동시 52도, 터빈속도가 95% 도달시 59도, 출력이 정격의 30% 도달시 82도로 열리게 되어있으므로, 이 모의실험에서는 연료요구신호와 배기가스온도에 따른 PI제어기의 특성만 실험하였다. $G_2(s)$ 의 1차시간지연 모델은 다음과 같으며 ($t_1 = 5$, $t_2 = 19$), 구한 PI이득은 아래 표 4와 같다.

$$\widehat{G}_2(s) = \frac{1}{9.4s + 1} e^{-s} \quad (13)$$

표 4. $G_2(s)$ 의 PI 이득

Method	K_p	T_i	
시간 영역	1	8.54	2.73
	2	4.58	9.28
	3	7.26	13.96
	4	5.63	9.98
	5	4.81	9.36
주파수 영역	6	12.54	1.79
	7	10.89	10.21
	8	14.19	9.69

- $T_c = 2.24$ ($\omega_c = 2.8$), $K_c = 27.86$ (Gm = 28.9dB)
- $\phi = 33.79^\circ$, $m = 0.613$, $\alpha = 38.41$, $T_d = 0.252$

표 4의 이득을 사용한 단위계단입력에 대한 실험결과는 아래 표 5와 같다. 응답특성을 살펴보면 연료요구신호와 배기가스 온도신호의 관계는 $G_1(s)$ 와 비교할 때 작은 시간지연 및 빠른 시상수를 가진다. 시간영역 및 주파수 영역의 응답특성은 앞의 $G_1(s)$ 와 비슷한 관계를 가지며, 시간영역의 응답특성(방법2~5)은 오버슈트가 생기지 않는 결과를 보여준다. 가스터빈 운전시 실제의 온도 설정값 또한 계단으로 변하지 않고 연료요구신호, 압축기 배기쪽의 차압신호, 터빈속도 및 입구측 가이드 베인의 개도각 등에 의해 영향을 받아 연속적으로 변하므로, 오버슈트가 없는 제어기 이득의 선택이 바람직하다.

표 5. $G_2(s)$ 의 실험결과

평가지수	상승 시간	정착 시간	최대오버 슈트(시간)	절대 오차합
Method 1	2	8	0.15 (5)	1.462
Method 2	4	7	-	2.033
Method 3	3	7	-	1.872
Method 4	4	6	-	1.771
Method 5	4	7	-	1.947
Method 6	2	6	0.38 (3)	1.280
Method 7	2	5	0.06 (3)	1.064
Method 8	2	7	1.14 (3)	1.138

5. 결론

본 논문에서는 계통병입에서부터 전부하를 낼때까지의 구간에 대해 균산복합의 실제 운전데이터를 취득하여 연료요구신호와 발전기 출력 및 배기가스 온도관계를 순환 최소자승법을 사용하여 모델링한 결과를 이용하여, 여러 가지 성능 평가지수에 근거하여 설정값 변화에 대한 PI 제어기의 이득을 구하였다. 그 결과 주파수영역에서의 응답특성은 시간영역에서의 특성과 비교하여 오버슈트가 크지만, 상승시간 및 정착시간은 비슷하면서도 절대오차합이 작은 응답특성을 보여주었다. 또한 시간영역에서의 ISE기준은 ISTE 및 IST²E 기준과 비교해 보면 상대적으로 작은 오차 및 초기의 오차에 대해 관대한 특성을 보여주었다. 앞으로 본 논문에서 다루지 않은 부하변화에 대한 PI제어기 성능비교가 함께 이루어져서, 실제의 가스터빈 제어시스템, 즉 속도제어, 온도제어, 출력제어, 기동제어를 함께 고려하여 최종 연료요구신호가 결정되는 시스템의 개발이 완성되면 PI제어기 설계의 기초자료로 이용될 수 있을것이다.

[참고 문헌]

- [1] M.Zhuang and D.P.Atherton, "Automatic tuning of optimum PID controllers", IEE Proceedings, vol. 140, No.3, 1993.
- [2] 한국전력공사, "영월 및 균산 복합 가스터빈 기본운전지침서", p.50, 1992
- [3] A.W.Ordys, A.W.Pike, M.A.Johnson, R.M.Katebi and M.J.Grimble, "Modelling and Simulation of Power Generation Plants", p.207, 1994
- [4] 한국전력공사, "Speed and Tronic", 평택복합, 1992
- [5] Sundaresan.K.R and P.R.Krishnaswamy, "Estimation of time delay, time constant parameters in time, frequency, and Laplace domains" Can.J.Chem. Eng., 56, 257, 1977
- [6] 정창기, 우주희, "발전소의 운전데이터에 의한 가스터빈 시스템의 인식", 98년도 대한전기학회 하계학술대회논문집, 1998
- [7] Lennart Ljung, "System Identification Toolbox for Use with MATLAB", The MATH WORKS Inc., 1993