

## 발전소의 운전데이터에 의한 가스터빈 시스템 인식

정창기, 우주희  
전력연구원 시스템통신연구소

### Identification of Gas Turbine Control System through operating data

Chang-ki Jeong, Joo-hi Woo  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - In this paper we obtain a discrete mathematical model of a Gas turbine control system from experimental data. we find appropriate input signal and parameter estimation algorithm for identification of the gas turbine control system. Under these conditions experimental data are collected from real system and parameters are estimated by the recursive least square algorithm. The computer simulation results show that the proposed experimental procedure is appropriate for the identification of the gas turbine control system. The model validation is excuted by real data from the Gunsan Gas Turbine Power Plant.

#### 1. 서 론

첨두 부하용으로 사용되는 가스터빈은 짧은 기동 시간과 신속한 부하적응이라는 특성과 부피가 작고 특별한 부수 시설이 필요 없기 때문에 예기치 못한 정전이나 돌발적으로 발생하는 첨두부하에 대응하여 단시간 동안만 작동하는 비상 발전용으로 사용되어 왔다. 특히 전력 예비율이 작은 우리 나라의 발전 사업의 경우 높은 유연성과 효율에 상대적으로 건설비가 싼 가스터빈이 첨두 부하용으로 각광을 받고 있어 가스터빈 발전기 제어에 관심이 높아지고 있다. 본 논문에서는 가스터빈의 기능을 알아보고, 각 구성 요소와 모델링을 검토하고 터빈 제어 시스템을 모델링하여 시뮬레이션 해 봄으로써 터빈을 최적으로 운전 할 수 있는 제어 시스템의 구현을 위해 필요한 제어시스템과 각 주요 매개변수들에 대한 시스템 인식(System Identification)을 목표로 하였다.

빠른 부하 변동에 대응하여 기동과 정지 및 부하에 추종하며 운전하는 기술이 제어의 관점에서 보았을 때 많은 상태 변수와 비선형 특성을 갖는 발전소의 경우 매우 어려운 문제이다. 이를 해결하고자 본 논문에서는 가스터빈 발전소의 터빈 제어 시스템의 인식을 하여 앞으로 연구하여야 할 터빈 제어 시스템의 개발에 사용하고자 한다.

본 논문에서는 모의 실험을 통해 가스터빈 제어시스템을 인식하기 위한 여러 가지 시험조건들을 구하고 현장에서 직접 취득한 주요 매개변수들로부터 모델링 식을 추정하여 그 결과를 원래의 데이터에 도입하여 컴퓨터를 이용하여 모사한 모델링 식의 적합성을 비교 제시 하였다[1]

#### 2. 본 론

##### 2.1 가스터빈 발전소 개요

증기 가스 혼합형(STAG(steam & gas))형 가스터빈은 압축기에서 공기를 압축하여 공기를 연소기에서 연료와 함께 연소시켜 발생된 고온의 연소 가스를 터빈에

서 팽창시켜 터빈을 회전시키고 팽창된 연소 가스는 배기부를 지나서 열재생기력발전기(HRSG)로 들어가 잔존 열이 회수되는 형식으로 가스 터빈의 구성도는 그림 1과 같다.

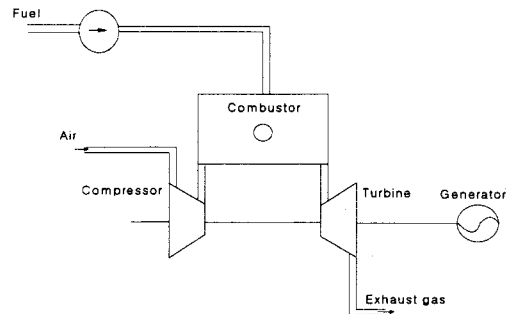


그림1 가스터빈 발전소의 구성도

가스터빈의 주요 구성부는 공기입력부를 포함한 17단의 압축기, 보통 가스연료나 유류 연료를 각각 사용할 수 있는 연료 공급 시스템을 갖추고 있는 연소기, 3단의 터빈부, 배기 가스터빈, 그리고 윤활유나 냉각수 등과 같은 냉각 장치 등으로 구성된다.

군산화력발전소에 건설된 복합 화력발전용의 가스터빈은 GENERAL ELECTRIC 회사에서 설계 제작하여 설치된 발전설비로 형식은 모델명 MS 7001 가스터빈이며 출력은 대기온도 15°C를 기준해서 정격 출력 50MW, 최대출력시 출력 71MW로 모두 4기가 설치되어 있어 이들 전체의 정격출력은 200MW이다.

##### 2-2. 가스터빈 제어시스템

승속 제어 시스템은 기동 제어, 속도 제어, 온도 제어의 3가지 입력 항목으로 구성되어 있어 이들의 출력은 최소값 기능 블럭(Minimum Value Gate)에 가장 적은 신호만 통과시켜 연료량을 제어하여 기동중의 속도와 온도를 제어한다. 그림 2는 기동시의 연료공급곡선을 보여주고 있다

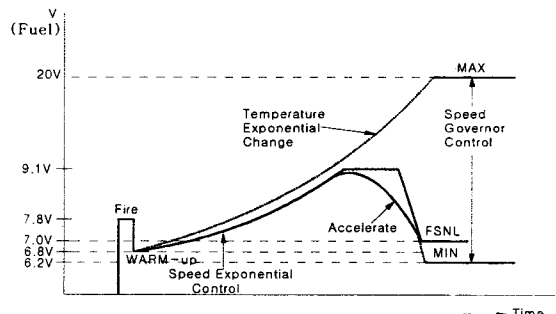


그림2 기동시의 연료공급 곡선

가) 기동 제어 루프 — 터빈의 예열 기간이 끝나면 승속에 필요한 제어기 출력을 제한된 설정치까지 일정하게 증가시켜주는 역할을 한다.

나) 속도 제어 루프 — 터빈의 예열이 끝나면 제어기 출력에 터빈 속도 신호를 보내어 터빈의 속도가 정격속도의 0.5%/sec씩 증가하도록 터빈 속도를 제한한다.

다) 온도 제어 루프 — 예열기간이 끝나면 제어기 출력은 배기온도를 5°F/sec 씩 증가하도록 해준다.

### 2.3 제어시스템 모델링

기동구간을 지나 발전기 출력을 100%로 상승시키는 구간에서의 모델링에 대한 선행 정보로서 입력신호에 대한 설명은 앞의 4장에서 언급한 바와 같이 터빈 속도는 3600rpm으로 일정하게 유지되고 있는 상태이다. 제어기의 출력 신호의 증가에 따라 연료량의 변화와 터빈 배기 온도가 어떻게 증가되는가를 인식해보고, 제어기의 모델링은 거꾸로 최종 출력인 연료량 증가에 따라 터빈 배기 온도와 발전기 출력이 어떤 관계인가를 인식해 보고자 한다.

#### 2.3.1 입력신호

모델링에 필요한 주요 입력신호는 다음과 같다.

신호명	신호 범위 (0~100%)	물리적 범위 (Physical Range)	사전 조정범위
디지털 설정치 (Digital Setpoint)	2.5 ~ -3.5V	95 ~ 107%	-2.5 ~ 3.5V
터빈 배기온도 (Exhaust Temp.)	0 ~ 6V	111 ~ 538°C (1 ~ 4V)	0 ~ 3V
터빈 속도 (TBN Speed)	0 ~ 25V	0 ~ 3600rpm	0 ~ 5V
제어기출력 (VCE 출력)	0 ~ 20V		0 ~ 4V
연료량 (Fuel Oil Flow)	0 ~ -8V	0 ~ 120GPM	0 ~ 4V

#### 2.3.2 매개변수 추정 알고리즘

본 논문에서 사용한 매개변수 추정 알고리즘은 순환 최소자승법 (RLS : Recursive Least Square Algorithm)이며, 플랜트의 차수는 2차 선형시스템으로 해석함을 근거로 가정하였다. 2차 선형시스템에 대한 DARMA(deterministic auto regressive moving average) 모델식은 다음과 같은 표현된다.

$$y(k) = a_1y(k-1) + a_2y(k-2) + b_0u(k-1) + b_1u(k-2) = \theta^T \phi(k) \quad (1)$$

$$\theta = [a_1, a_2, b_0, b_1]^T$$

$$\phi(k) = [y(k-1), y(k-2), u(k-1), u(k-2)]^T$$

여기서,  $a_1, a_2, b_0, b_1$ , 및  $b_2$ 는 플랜트의 매개변수들이고  $u(k)$ 와  $y(k)$ 는  $k$ 번째 순간의 플랜트 입력과 출력이다.  $\theta$ 는 추정해야 할 미지의 매개변수 벡터이고,  $\phi(k)$ 은 순간의 회귀신호 벡터이다. 매개변수 벡터  $\theta$ 를 추정하기 위해 식(1)과 같은 시스템에 대하여 평가함수  $J(k)$ , 추정 출력  $\hat{y}(k)$ , 출력오차  $e(k)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$J(k) = \sum_{i=1}^k e^2(i) \quad (2)$$

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (3)$$

$$\hat{y}(k) = \phi^T(k) \hat{\theta}(k) \quad (4)$$

식 (2)을 최소화하는  $\hat{\theta}(k)$ 는 다음 식을 만족한다.

$$\frac{\partial J(k)}{\partial \hat{\theta}(k)} = 0 \quad (5)$$

이러한  $\hat{\theta}(k)$ 를 구하는 순환 최소자승법 알고리즘[2] [3]은 다음과 같다.

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + F(k+1)\phi(k+1)e^0(k+1) \quad (6)$$

$$F(k+1) = F(k) - \frac{F(k)\phi(k+1)\phi^T(k+1)F(k)}{1 + \phi^T(k+1)F(k)\phi(k+1)} \quad (7)$$

$$e^0(k+1) = y(k+1) - \phi^T(k+1)\hat{\theta}(k) \quad (8)$$

여기서,

$$\hat{\theta}(k) = [\hat{a}_1(k) \quad \hat{a}_2(k) \quad \hat{b}_0(k) \quad \hat{b}_1(k)]^T$$

$$\phi(k+1) = [y(k) \quad y(k-1) \quad u(k) \quad u(k-1)]^T \quad (9)$$

로서,  $\hat{a}_1(k), \hat{a}_2(k), \hat{b}_0(k), \hat{b}_1(k)$ 는 각각  $k$ 번째 순간의 매개변수 추정 값들이다.

#### 2.3.3 컴퓨터 시뮬레이션 및 고찰

플랜트의 동특성이 충분히 포함된 입출력 데이터를 효과적으로 추출하기 위해서 실험에 앞서 여러 가지 조건들이 결정되어야 한다.

가스터빈 제어기에 있어, 기동시와 속도 상승운전시 그리고 계통에 병입한 후의 부하시 등의 구간에 따라 고려해야 할 제어 기기들이 서로 상이하다. 기동구간에서는 기동 모터에 의해 터빈의 자립속도 720rpm(정격의 20%)까지 돌려지므로 별도의 모델링이 필요하고, 계통 모선에 병입한 후에는 모선의 주파수에 응동하도록 되어 있으므로 또 다른 모델이 연구 되어야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 터빈의 정격속도에서 계통병입 및 전부하까지의 운전 구간에 국한하여 모델링을 구현해 보았다.

모델링은 최소자승법[4]방법을 사용하였고 망각지수(Forgetting Factor)는 0.98로 선택하였으며 입출력 신호의 취득 주기는 1sec로 정하였다. 또한 모의 실험용 소프트웨어는 MATLAB의 SIMULINK를 이용하였다.

일반적인 간략화된 터빈제어시스템의 구성도는 그림3과 같다.

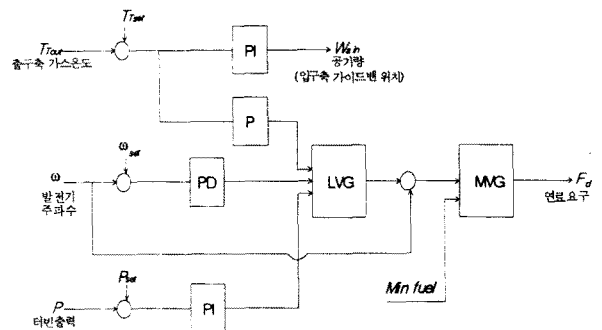


그림3 제어시스템 구성도

위의 제어시스템 구조를 가진 터빈시스템을 모델링 하기 위한 블록도는 아래와 같다.

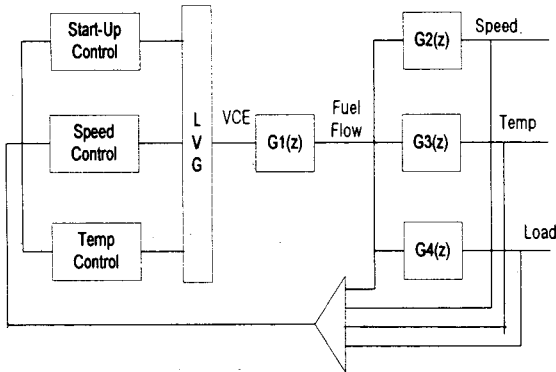


그림4 제어시스템 모델링 블록도

여기서  $G_1(z)$ 는 제어시스템 출력 - 연료량  
 $G_2(z)$ 는 연료량 - 터빈 속도  
 $G_3(z)$ 는 연료량 - 터빈 배기온도  
 $G_4(z)$ 는 연료량 - 발전기 출력  
 사이의 전달함수이다.

모의 결과를 살펴보면 전달함수의 입력신호를 제어시스템 출력, 출력신호를 연료량으로한 모델링한 결과는 다음과 같이 나타나고

$$G_1(z) = \frac{0.21609z - 0.21062}{z^2 - 0.64082z - 0.35358}$$

전달함수의 입력신호를 연료량, 출력신호를 터빈 속도로 하여 두 데이터 간의 관계를 모델링한 식은 다음과 같이 나타난다.

$$G_2(z) = 1 \text{ (100\%)}$$

또한 입력신호 연료량과 공기유입량, 출력신호를 터빈 배기온도 데이터로 두 데이터 간의 관계를 2입력, 1출력으로하여 아래와 같은 구조로 모델링한 결과는 다음 식으로 각각 나타난다.

$$G_{31}(z) = \frac{0.0975z - 0.0167}{z^2 - 0.4417z - 0.4531}$$

$$G_{32}(z) = \frac{-0.0830z + 0.0665}{z^2 - 0.4417z - 0.4531}$$

계통병입순간(시뮬레이션 초기)에 초기값에 의한 오프셋에 의해 추정된 온도값이 계속 나타나고 있는데 이 현상은 가스터빈 시스템 모델링이 전 구간에 걸쳐 모델링이 이루어지면 이문제가 해소될것으로 생각되고, 아래와 같이 최종 출력단에 상수를 더해 줌으로서 근접한 모델링 결과를 얻을수 있다.

입력신호 연료량과 출력신호 발전기 출력 데이터 간의 관계를 모델링한 결과식은 다음과 같다.

$$G_4(z) = \frac{0.01549z - 0.012295}{z^2 - 0.84137z - 0.15663}$$

그림5는 컴퓨터 모의실험 결과 얻은 결과값에 의한 제어시스템의 구성도이다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 모의 실험을 통해 가스터빈 제어시스

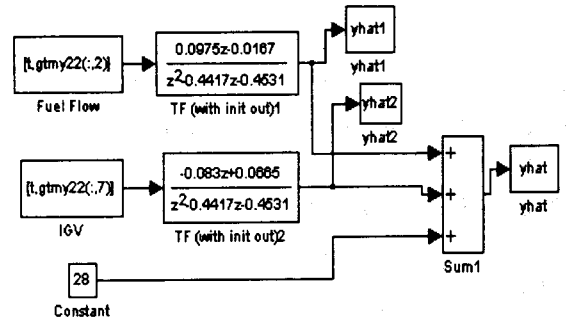


그림5 시스템 인식한 결과의 제어구성

시스템을 인식하기 위한 여러 가지 시험조건들을 구하고 현장에서 직접 취득한 주요 매개변수들로부터 모델링 식을 추정하여 그 결과를 원래의 데이터에 도입하여 컴퓨터를 이용하여 모사한 모델링 식의 적합성을 비교해 보았다. 발전소의 특성 때문에 필요한 많은 데이터를 구하지 못하고 한정된 데이터로 시스템 인식의 결과를 추정하다 보니 잡음신호의 영향과 플랜트의 다른 여러 조건들에 대하여는 무시된 신호가 많았었고 기동구간과 계통병입 후의 부하 추종성을 위한 모델링에 대해서는 실험과 고찰이 수행되지 않은 것이 아쉬운 부분이다.

이렇게 추정된 모델 식을 실제신호 데이터와 그래프를 비교해 본 결과 그림6은  $G_1(z)$  제어시스템 출력-연료량을 모사한 그림이다. 일부 차이가 나는 부분도 있었지만 전체적으로는 유사한 경로를 나타나고 있어 이후 구성될 실제적인 시뮬레이터에서 충분한 자료로서 이용될 수 있을 것이다.

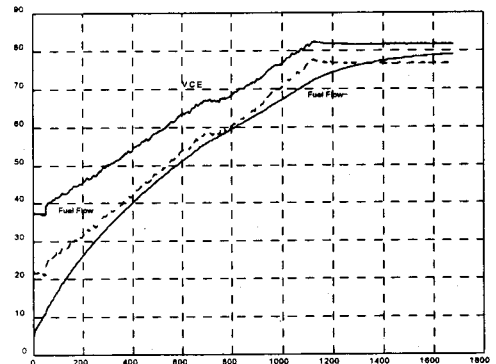


그림6  $G_1(z)$  제어시스템 출력-연료량을 모사

연료량과 발전기 출력 데이터 간의 모델링의 경우 계통병입 후에는 부하변화가 없는 상태이므로 병입에 대한 모델링 식은 부하추종성에 대한 입출력으로 새로운 모델링과 연구가 필요한 부분이다.

### [참 고 문 헌]

- (1) "Dynamic System Identification : Experiment Design and Data Anaysis" Academic Press, New York, 1977
- (2) "Adaptive Filtering, Prediction and Control" Pretice-hall, Inc., Englewood cliffs, New Jersey, 1984
- (3) "Theory and Practice of Recursive Identification" MIT Press London, 1983
- (4) "System Identification and Control Design" Pretice-hall, Inc., Englewood cliffs, New Jersey, 1990