

가스터빈 제어시스템의 모델링

(Modeling of gas turbine control system)

이원규*

(Won-Kyu Lee)

요 약

본 논문에서는 실험데이터를 이용해서 가스터빈 제어시스템의 수학적인 모델링을 구하였다. 제어대상은 군산 화력발전소에 설치되어 있는 가스터빈을 모델로 선정하였고 터빈의 정격속도에서 계통병입 및 전부하까지의 운전구간에 국한하여 모델링을 구현하였다. 모델링은 최소자승 알고리즘을 이용하였으며 플랜트는 2차 시스템이라 가정하였고 망각지수는 0.98, 그리고 입·출력신호의 주기는 1sec로 선택하였다. 시뮬레이션 결과, 실제 시스템과 모델링에 의한 입·출력특성이 일치한다는 것을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, we obtain a mathematical model of a gas turbine control system from experimental data. The gas turbine in Gunsan power plant is selected as controlled system. The recursive least square algorithm is used to model the plant. For parameter estimation, plant is assumed as second order system and forgetting factor is 0.98 and the period of input and output signal period is 1sec.. As a result, input and output characteristics of real system and modeling are identified.

1. 서 론

산업의 근간이 되는 발전산업은 전기 에너지를 만들어 내는 산업으로서 국가 경쟁력의 기초가 되는 중요한 산업이다. 그 중에서도 가스터빈은 기동시간이 짧고 부하에 신속하게 적응할 수 있으며 부피가 작고 특별한 부대시설이 필요 없기 때문에 예기치 못한 정전이나 돌발적으로 발생하는 첨두 부하에 대비하여 단시간동안 이용할 수 있는 비상발전기로 1960년대부터 사용되어 왔다[1,2].

가스터빈은 이와 같은 특성 외에도 외부로 부터 냉각수의 공급 없이 운전이 가능하고 유탄유류의 소모도 매우 적으며 추운 겨울에도 작동에 지장이 없기

*정회원 : 대전산업대학교 전기공학과 교수
접수일자 : 1999년 10월 25일

때문에 여러 분야에 널리 적용할 수 있다. 또한 발전소에서 송전선까지 시설이 필요 없고 다량의 배기열을 난방용 또는 공장의 수증기 발생용으로 활용할 수 있기 때문에 지역 전력공급과 지역난방으로 그 응용이 확대되어 가고 있다[3,4].

그러나 터빈 제어계통은 복합기술이 요구되는 분야로 개발과 활용에 많은 투자와 기간이 소요되며 부가가치가 높아 선진국에서는 기술보호를 추진하고 있어 기술도입이 어려운 실정이다[2][5].

현재 가스터빈 발전소 설비중 많은 부분에서 국산화가 추진되고 있으나 제어분야는 연구결과의 적용이 어렵기 때문에 응용연구는 물론 기초연구조차 체계적으로 확립되어 있지 않아 많은 분야에서 아직까지 연구개발이 추진되지 못하고 있다.

본 논문에서는 실험을 통해 얻은 데이터를 이용하

여 가스터빈을 구성하는 각 요소에 대한 모델링을 수행하였다. 모델링은 최소 자승법을 이용하였고 망각지수는 0.98, 입출력 신호주기는 1초로 하여 제어 시스템을 모델링하였다.

2. 가스터빈의 모델링

2.1 가스터빈의 구성

증기 가스 혼합형 가스터빈은 압축기에서 압축한 공기를 연소기에서 연료와 함께 연소시켜 발생된 고온의 연소가스를 터빈에서 팽창시켜 터빈을 회전시키고 팽창된 연소가스는 배기부를 지나서 열재생 기력발전기(HRSG)로 들어가 잔존 폐열이 회수되는 형식으로 가스터빈의 구성도는 그림 1과 같다.

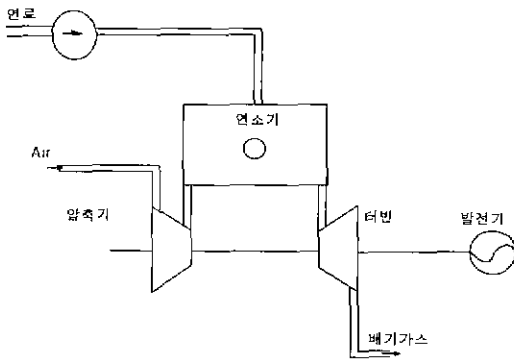


그림 1. 가스터빈 발전소의 구성도
Fig. 1. Structure of Gas Turbine plant

가스터빈은 공기 입력부를 포함한 17단의 압축기, 가스나 유류연료를 사용할 수 있는 연료 공급시스템을 갖추고 있는 연소기, 3단의 터빈부, 배기 가스터빈, 그리고 윤활유나 냉각수등과 같은 냉각장치 등으로 구성된다.

2.2 모델링의 가정

가스터빈을 구성하는 요소들을 모델링하기 위하여 다음과 같이 가정한다.

- (1) 공기와 혼합된 연소가스는 이상적인 형태이다
- (2) 연소시에 발생하는 공기와 가스등에 대한 비열은 일정하다.
- (3) 노즐을 통해 흐르는 유량은 일차원으로 단일화한다.

(4) 압축기, 터빈 그리고 연소실내에서 에너지를 저장하고 수송하는 데 걸리는 시간은 매우 작으며 일정하다고 한다.

(5) 압축기를 통해 흐르는 공기량은 입력 안내날개를 통해 조절 가능하다

(6) Nox와 Co의 오염도는 증기와 연료의 비의 함수로서 모델링한다.

가스터빈의 방정식은 연료시스템, 압축기, 연소기, 그리고 터빈 등 4개의 소그룹으로 나누어 모델링할 수 있다[6].

2.3 모델링 기법

실험에 의해 플랜트를 모델링하는 경우, 모델링에 필요한 여러 가지 실험조건들을 플랜트에 대한 선행정보를 이용하여 구하여야 한다. 여기에 포함되는 정보에는 입력신호, 샘플링 주기, 측정 허용시간, 장비(신호 발생, 저장, 측정), 그리고 인식 알고리즘이 있다[7,8,9]. 그런데 실험조건들이 주어진 플랜트의 특성에 부적합하게 결정되었을 경우, 실험시 여러가지 문제점들이 발생하게 되어 플랜트로부터 원하는 데이터를 추출할 수 없거나 모델링하기에 충분하지 못한 데이터를 얻게 된다. 따라서 실험조건들이 구해지면 실제 실험을 통해 얻은 데이터와 플랜트에 대한 선행정보로부터 플랜트의 구조를 결정하고 매개변수들을 추정하여 모델식을 구한 후, 다른 운전데이터를 이용하여 구한 모델식을 검증한다[10].

실험에 의한 시스템 모델링의 일반적인 절차는 그림 2와 같다.

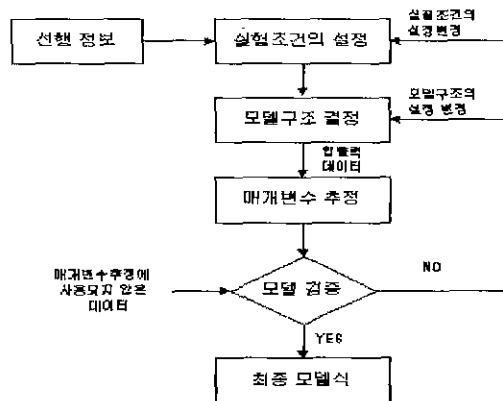


그림 2. 시스템 인식 절차 흐름도
Fig. 2. Flow chart for system modeling

2.4 입력 신호

기동구간을 지나 발전기 출력이 100%까지 상승하는 구간에서의 모델링에 대한 선행 정보로서 입력신호는 터빈속도가 3600rpm으로 일정하게 유지되고 있는 상태이다. 제어기의 출력신호가 증가할 때 연료량과 터빈 배기온도가 어떻게 변화되는가를 모델링하기 위하여 사용한 주요 입력신호는 표 1과 같다.

표 1. 입력신호
Table 1. Input signals

입력점	신호명	신호 범위 (0~100%)	물리적 범위	사전조정 범위
1	디지털 설정치	2.5 ~ -3.5V	95~107%	-25 ~ 35V
2	터빈 배기온도	0 ~ 6V	111 ~ 538°C (1 ~ 4V)	0 ~ 3V
3	터빈 속도	0 ~ 25V	0 ~ 3600rpm	0 ~ 5V
4	제어기 출력	0 ~ 20V		0 ~ 4V
5	연료량	0 ~ -8V	0 ~ 120GPM	0 ~ 4V

3. 제어시스템 모델링과 시뮬레이션

플랜트의 동특성이 충분히 포함된 입·출력 데이터를 효과적으로 추출하기 위해서는 실험하기 전에 여러 가지 조건들이 결정되어야 한다.

가스터빈 제어기는 기동시와 속도상승시, 그리고 계통 병입 후 등 운전구간에 따라 고려해야 할 사항들이 각각 다르다.

기동구간에서 터빈속도는 기동모터에 의해 터빈의 자립속도(720rpm :정격의 20%)까지 상승하므로 별도의 모델링이 필요하고 계통 모선에 병입한 후에는 모선의 주파수에 따라 변화하므로 다른 모델이 연구되어야 한다.

본 연구에서는 터빈의 정격속도에서 계통병입 및 전부하까지의 운전구간에 국한하여 모델링을 구현하였다.

모델링은 최소자승법[11]을 이용하였고 망각지수(Forgetting Factor)는 0.98로 선택하였으며 입·출력 신호의 취득 주기는 1sec로 정하였다. 또한 모의 실험용 소프트웨어는 MATLAB의 SIMULINK를 이용하였다.

그림 3은 일반적인 간략화된 터빈 제어시스템의 블록 선도이다

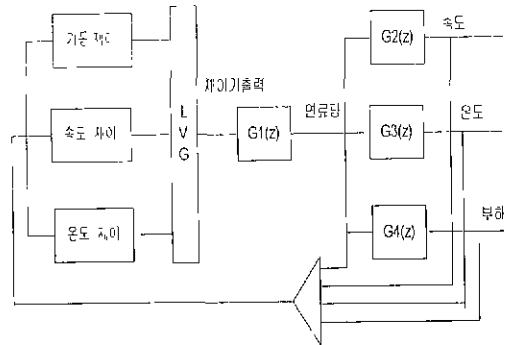


그림 3. 터빈 제어시스템 블록선도
Fig. 3. Block diagram for turbine control system

여기서

$G_1(z)$ 는 제어시스템 출력과 연료량

$G_2(z)$ 는 연료량과 터빈속도

$G_3(z)$ 는 연료량과 터빈 배기온도

$G_4(z)$ 는 연료량과 발전기 출력

사이의 전달함수이다.

매개변수 추정을 위해 matlab을 이용하여 구성된 프로그램은 그림 4와 같고 제어시스템 출력을 입력, 연료량을 출력으로 하여 모델링한 결과는 다음과 같다.

$$G_1(z) = \frac{0.21609z - 0.21062}{z^2 - 0.64082z - 0.35358} \quad (3-1)$$

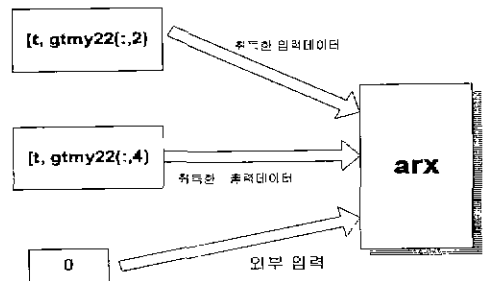


그림 4. Matlab이용한 프로그램 구성도
Fig. 4. Program structure with Matlab

연료량을 입력, 터빈속도를 출력으로 하여 모델링하면

$$G_2(z) = 1 \quad (100\%) \quad (3-2)$$

또한 연료량과 공기 유입량을 입력, 터빈 배기온도를 출력으로 하여 얻은 모델링한 결과는 다음과 같다.

$$G_{31}(z) = \frac{0.0975z - 0.0167}{z^2 - 0.4417z - 0.4531} \quad (3-3)$$

$$G_{32}(z) = \frac{-0.0830z + 0.0665}{z^2 - 0.4417z - 0.4531} \quad (3-4)$$

이들 식은 계통병입 순간(시뮬레이션 초기) 오프셋트가 발생하는 데 이것은 가스터빈 시스템 전체의 모델링이 이루어지면 해결될 것으로 생각된다. 그림 5와 같이 최종 출력단에 상수를 더해 줌으로써 더 좋은 모델링 결과를 얻을 수 있다.

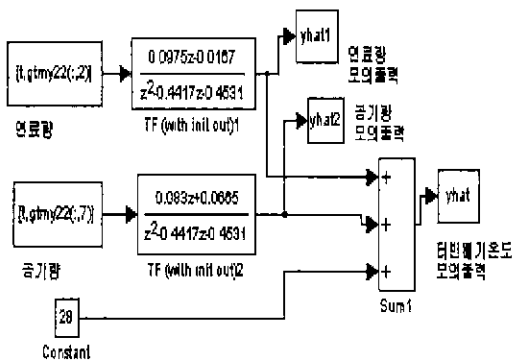


그림 5. 연료량과 공기량에 대한 터빈 배기온도 모델링 과정
Fig. 5. Modeling process of turbine exhaust temperature for fuel and air flow

다음에 입력신호를 연료량, 출력신호를 발전기 출력으로 하여 2개 데이터간의 관계를 모델링하면 다음과 같다.

$$G_4(z) = \frac{0.01549z - 0.012295}{z^2 - 0.84137z - 0.15663} \quad (3-5)$$

그림 6은 터빈속도 100%, 계통병입 상태를 0-100% 까지 변화시키면서 실제로 현장에서 취득한 제어시스템의 주요 입·출력 데이터를 나타낸 것이다. 그림 7부터 그림 9까지는 각각의 전달함수에 대한 모델링 결과와 실제 입·출력 데이터를 동시에 나타낸 결과인데 각각의 경우 거의 유사한 곡선으로 나타나고 있어 모델링이 만족하게 되었음을 알 수 있다.

그림 9는 연료량과 발전기 출력 사이의 관계를 모델링의 한 것으로 계통병입 후에는 부하변화가 없으므로 부하추종을 고려한 모델링이 요구된다.

4. 결론

본 논문에서는 가스터빈 제어시스템의 해석과 구현을 위한 전 단계로 가스터빈 제어시스템의 모델링에 대하여 연구하였다.

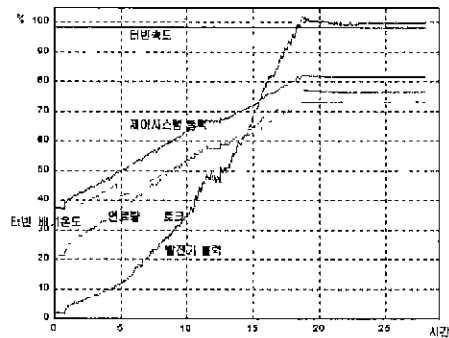


그림 6. 전체시스템의 입·출력 신호
Fig. 6. Input and output signal

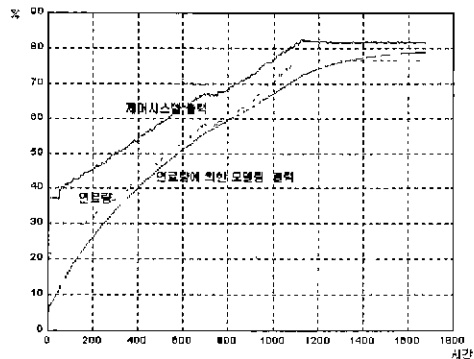


그림 7. 연료량과 제어시스템 출력 : $G_1(z)$
Fig. 7. Fuel flow and output of control system

가스터빈 제어시스템의 모델링

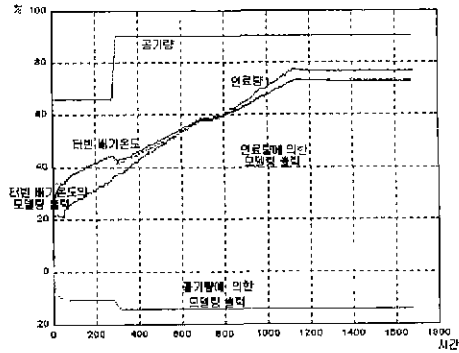


그림 8. 연료량과 공기량에 대한 터빈 배기온도 : $G_3(z)$
 Fig. 8. Turbine exhaust temperature for fuel flow and air flow

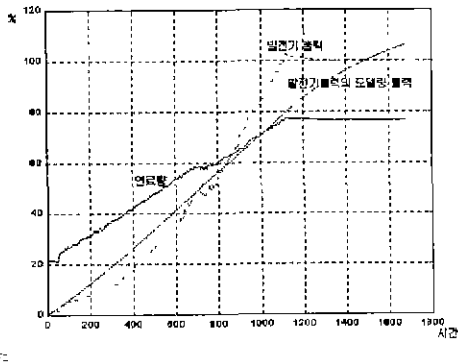


그림 9. 연료량과 발전기 출력: $G_4(z)$
 Fig. 9. Generator output for fuel flow

모델은 균산화력발전소에 설치되어있는 MS 7001 가스터빈을 대상으로 하였으며 모델링은 최소 자승법을 이용하였고 망각지수 0.98, 입·출력 신호의 주기는 1sec로 선택하여 시뮬레이션하였다.

본 연구에서 수행한 연구결과는 다음과 같다.

1. 모의실험을 통해 제어시스템을 인식하기 위한 여러 가지 시험조건을 구하였다.
2. 터빈 정격속도에서 계통병입 및 전부하까지의 운전구간에 국한하여 모델링을 하였다.
3. 현장에서 취득한 데이터를 이용하고 제어시스템 각 구성요소를 2차 시스템이라 가정하여 모델링식을 구하였다.
4. 각 구성요소에 대한 입·출력 특성을 원래의 데이터와 비교한 결과 일치한다는 것을 시뮬레이션

을 통하여 확인하였다

5 연료량과 발전기 출력사이의 관계를 모델링한 경우 계통병입 후 부하변화가 없는 상태이므로 병입 후의 모델링 식은 부하추종성을 고려한 모델링과 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- (1) "가스터빈의 기초이론", 청문각, 1995.
- (2) "수화력 제어분야 기술보고서", 한국전력공사 기술연구원, (1997)
- (3) "가스터빈 운전 지침서", 한국전력공사, 1976.
- (4) "발전소 편람", 한국전력공사, (1996)
- (5) "발전소 보일러의 디지털 분산제어 시스템 개발 및 적용" 한국전력공사 기술연구원.
- (6) "Modeling and Simulation of Power Generating Plants", A.Wordys, M.A. Johnson etc.
- (7) "Practical Aspect of process Identification" R. Isermann, Automatica, vol. 16, pp. 575-587.
- (8) "System Identification" T.Soderstrom, P.Stoica, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey..
- (9) "Dynamic System Identification, Experiment Design and Data Analysis" Academic Press, New York
- (10) 신현재, "실험을 통한 조준경 시스템 인식", 경북대학교 대학원 석사학위논문.
- (11) "System Identification and Control Design", Prentice-hall, Inc., Englewood cliffs, New Jersey.

◇ 저자소개 ◇

이 원 규 (李元圭)

1951년 7월 18일 생, 1974년 숭실대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 1976년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업, 1991년 아주대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학). 현재 대전산업대학교 전기공학과 교수.