

운전데이터에 의한 가스터빈 발전기의 배기가스온도 계통 모델링 및 시물레이션에 관한 연구

우주희 (전력연구원)

Simulation of Exhaust Temperature of Gas Turbine Generator using Operating Data

Woo Joo-Hee (KEPRI)

요약문

미지 플랜트의 인식방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있으며, 하나는 연역적 방법으로서 대상 플랜트에 대한 열적·유체 역학적 법칙을 사용하여 물리적으로 모델을 수식화하는 방식이고, 다른 하나는 귀납적 방법으로서 측정된 입출력데이터에 의해 역으로 구조를 찾아가는 방식이다. 본 논문에서는 후자의 방법으로 가스터빈 발전소의 배기가스 온도계통 모델을 구하기 위해 현장에서 운전 데이터를 취득하였다. 그리고 컴퓨터 시물레이션을 통해 경험적으로 구현한 모델이 실제 운전데이터와 유사한 특성을 보임을 알 수 있었다. 이렇게 구현된 모델은 향후 발전소용 가스터빈 제어시스템을 새로이 구축하거나 튜닝하고자 할 때 배기가스 온도제어계통을 설계하는데 기초자료로 활용할 수 있다.

1. 서론

가스터빈 발전소는 특별한 부수시설이 필요없고, 짧은 기동시간과 신속한 부하적응력으로 인하여 첨두부하용으로 많이 사용되고 있다. 이런 빠른 부하변동에 대응하고 기동과 정지 및 부하에 추종하며 운전하는 기술이 제어의 관점에서 보았을 때, 많은 상태변수와 비선형 특성을 가지는 발전소의 경우 매우 어려운 문제이다. 이러한 발전소용 가스터빈 제어는 발전기 출력, 터빈속도, 배기가스 온도, 압축기 출구압력 등을 감지하여 터빈으로 공급되는 연료량을 조절함으로써 이루어진다. 그 세부적인 제어에는 기동제어, 속도제어, 온도제어 등으로 구성되어 있으며, 이들 각 제어기

의 가장 작은 값이 실제 터빈으로 공급되는 연료량을 결정하는데, 특히 배기가스 온도제어부는 실제 배기가스 온도가 설정값보다 크게 되면 운전중에 언제든지 투입되는 매우 중요한 역할을 한다. 또한 가스터빈 발전기의 모델링에 대한 연구는 국내에서 초기단계이고, 아직 외국제작사에 많이 의존하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 가스터빈 발전기의 제어에서 중요한 부분을 차지하고 있는 배기가스 온도 계통을 1차의 선형시스템으로 모델링하기 위해 실제 운전되고 있는 가스터빈 발전소에서 운전데이터를 취득하여 순환최소차승법(Recursive Least Square Algorithm, RLS)을 사용한 결과에 대해서 언급하고자 한다. 2절에서 가스터빈 발전소의 간단한 설

명이 언급되고, 3절에서는 운전데이터의 취득결과 및 RLS 알고리즘에 대해 간단히 설명하고, 4절에서 배기가스 온도 계통의 모델링 절차 및 결과에 대해 언급하고, 마지막 5절에서 결론을 맺고 있다.

2. 가스터빈 발전 시스템의 개요

발전소 가스터빈은 압축기에서 공기를 압축하여 연소기에서 연료와 함께 연소시켜 발생된 고온의 연소가스를 터빈에서 팽창시켜 터빈을 회전시키고 터빈축에 연결된 발전기가 회전하면서 전기적인 출력을 발생시킨다. 가스터빈의 주요 구성부는 공기입력부를 포함한 17단의 압축기, 연소기, 3단의 터빈부, 배기부, 그리고 윤활유나 냉각수 등과 같은 냉각 장치 등으로 구성된다. 본 논문에서 적용된 균산화력 발전소에 건설된 복합 화력발전용의 가스 터빈은 GENERAL ELECTRIC 회사에서 설계 제작하여 설치된 발전설비로 형식은 모델명 MS 7001 가스 터빈이며 출력은 대기온도 15℃를 기준해서 정격 출력 50MW, 최대출력시 출력 71MW로 모두 4기가 설치되어 있어 이들 전체의 정격출력은 200MW이다[1]. 그림 1에서 가스터빈 발전 시스템의 개요도를 보여주고 있다.

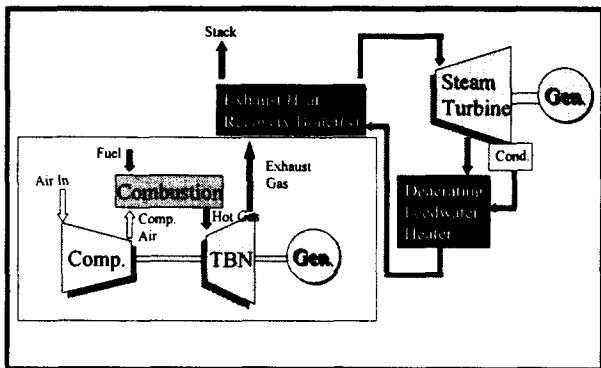


그림 1. 가스터빈 발전 시스템의 개요

발전소 가스터빈의 제어는 터빈속도, 배기온도 및 압축기 출구압력 등을 감지하여 유니트의 운전 조건을 결정하여 터빈으로 공급되는 연료량을 조절함으로써 이루어지며, 크게 연료요구신호를 결정하는 부분과 연료량을 제어하는 부분으로 나눌 수 있다. 균산화력인 경우 연료요구신호를 결정하는 부분은 기동제어, 가속제어, 속도제어, 배기가스 온도제어 등으로 구성되어 있다. 기동제어와 가속제어는 주로 초기에 터빈속도를 제어하기 위해 적용되고, 속도제어는 계통병입이후 전기적 출력을 제어하기 위해 적용된다. 배기가스 온도제어는 부품의 설계 열용량 한계 이내로 운전되도록 위에서 언급한 각 제어기의 동작 제한기로서 적용된다. 특히 배기가스 온도제어는 승속중이나 정격 부하 도달시 온도설정치가 실제 배기가스온도보다 낮으면 언제라도 투입되어 연소실에 공급되는 연료량을 제한하는 매우 중요한 부분이다[2].

3. 운전데이터에 의한 배기가스 온도 모델링 방법

미지 플랜트의 인식방법은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 연역적 방법으로서 대상 플랜트에 대한 열적, 유체 역학적 법칙을 사용하여 물리적으로 모델을 수식화 하는 방식이고, 또 다른 하나는 귀납적 방법으로서 측정된 입출력데이터에 의해 역으로 구조를 찾아가는 방식이다. 두 가지 방식 모두 모델 정확도에는 한계가 있다. 전자의 경우 과도상태의 경향은 잘 맞추지만 정상상태에서 오프셋이 생길 수 있고, 후자의 경우는 그 반대로 정상상태는 잘 맞추지만 과도상태는 자세히 묘사할 수가 없게 된다. 본 논문에서는 MATLAB을 이용한 후자의 방법에 대해서 언급하고자 한다.

모델링하고자 하는 구간은 시스템에 실제로 연료

가 투입되기 시작하는 구간인 점화가 이루어진 구간부터 전기적 출력이 정격에 이르고 나서 정상적인 정지구간까지를 대상으로 하였다. 제어기에서 결정된 연료요구신호(VCE)에 의해 연료량(FFN)이 변하고, 이 결과 배기가스 온도가 변하도록 되어 있다. 온도제어계통의 특성을 조사하기 위해 취득한 현장 입출력점은 표 1과 같이 압축기 차압(CDP : Compressor Discharge Pressure), 입구축 가이드베인 개도각(IGV : Inlet Guide Vane) 신호 및 배기가스 온도(TX)를 취득하였다[3].

표 1. 취득한 현장 신호

신호명	현장 신호범위	zero~span (0~100%)
VCE	0~20 V	0~100 %
TX	0~6 V	100~1300 °F
FFN	0~-8 V	0~120GPM
IGV 개도	4~20 mA	30~90 도
CDP	0~5 V	0~175 psi

운전 데이터의 현장 취득은 Advantec사의 Adam5000 장비를 사용하여 1초 주기로 하였다. 그리고 이들 데이터를 사용하여 모델의 계수를 추정하는 방법은 순환 최소자승법(RLS : Recursive Least Square Algorithm)을 사용하였으며, 플랜트의 차수는 1차의 선형시스템으로 가정하여 구하였다. 1차 선형시스템에 대한 모델식은 다음과 같이 표현된다.

$$y(k) = a_1y(k-1) + b_0u(k-1)$$

$$\hat{y}(k) = \hat{a}_1y(k-1) + \hat{b}_0u(k-1)$$

$$J(k) \equiv \sum_{i=1}^k [y(i) - \hat{y}(i)]^2$$

여기서 a_1, b_0 는 실 플랜트의 계수이고, \hat{a}_1, \hat{b}_0

는 구하고자 하는 모델의 매개변수들이다. $u(k), y(k)$ 는 k번째 순간의 실 플랜트의 입력과 출력이고, $\hat{y}(k)$ 는 모델의 출력이다. $J(k)$ 는 매개변수를 추정하기 위한 평가함수이다. 본 논문에서는 이 평가함수를 최소화하기 위해 사용한 계산은 MATLAB에서 제공하는 명령어를 사용하여 각 모델의 파라미터를 추정하였다[4].

4. 배기가스 온도 모델의 구현 방법 및 결과

4.1 모델링에 필요한 운전데이터 파형 분석

취득한 운전데이터 파형은 그림 2와 같고, x축은 초이고 y축은 %로 표시하였다. 약 100초에서 점화가 이루어지고, 약 410초에서 발전기의 계통병입이 이루어져 전기적 출력이 증가되기 시작하고, 약 1100초에서 정격출력에 도달되었고, 약 1300초에서 출력감발이 시작되고, 약 1950초에서 발전기의 계통병해가 이루어진 결과를 보여주고 있다.

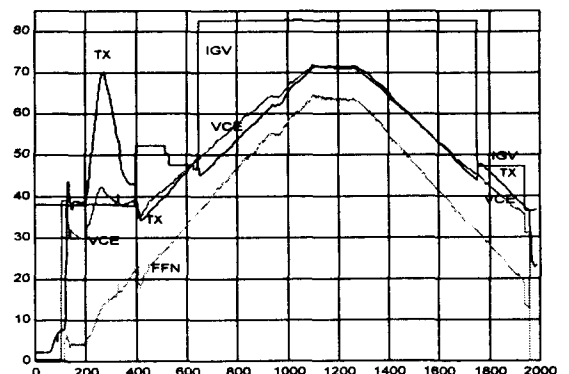


그림 2. 취득한 운전데이터 파형

그림 2에서는 표시하지 않았지만, 배기가스 온도 제어가 투입된 부분은 예열이 시작되고서부터 터빈의 승속이 이루어지기 전까지의 구간(약 120초에서 300초 사이)과 정격부하 구간(약 1100초에서 1300초 사이)이다.

4.2 배기가스 온도 전달함수의 모델링

그림 2를 보면 배기가스 온도는 대체적으로 공급된 연료량에 비례하여 증가하지만 그렇지 않은 구간도 있다. 특히 약 650초 근처에서는 연료량이 증가하는데도 배기가스 온도가 감소하는 모습을 보이는데 이는 IGV의 개도각이 커지면서 유입되는 공기량이 증가된 결과로 볼 수 있다.

본 논문에서는 열적, 유체역학적 법칙없이 다음과 같은 경험적 과정을 거치면서 그림 3과 같은 최종 배기가스 온도(TX)모델을 구하였다.

- 1) 취득한 데이터 파형을 보면, TX는 연료량 (FFN) 혹은 연료요구신호(VCE)에 정동작하고 IGV 개도신호에는 역동작함을 직관으로 알 수 있다.
- 2) 먼저 FFN과 IGV를 입력으로 한 TX 모델을 구한 결과, 계통병입후의 시간구간에 대해서는 어느 정도 일치한 특성을 보여주었으나 전기적인 출력을 얻기 전까지의 시간구간에 대해서는 FFN에 비례한 TX특성을 보여주었다. (아래 그림의 TF2와 TF3만 사용한 경우)
- 3) VCE와 IGV를 입력으로 한 TX 모델을 구한 결과, 첫 번째 구한 모델의 반대의 결과를 보여주었다. (아래 그림의 TF1과 TF3만 사용한 경우)
- 4) VCE, IGV, FFN을 입력으로 한 TX 모델을 구한 결과, 위 두 가지 경우에 비해 전 구간

에 대해 실제 TX와 비슷한 파형은 보여주었으나, 계통병입이전의 구간에 대해서는 실제 값과 오프셋이 존재하였다.(아래 그림의 TF1, TF2, TF3을 사용한 경우)

- 5) 그래서 임의의 상수입력에 대한 전달특성을 추가하면, 위 세 번째의 단점을 극복할 수 있었다. 그 최종의 TX 전달특성 모델은 아래와 같으며 결과 파형은 아래 그림과 같다.(아래 그림의 TF1, TF2, TF3, TF4모두를 사용한 경우)

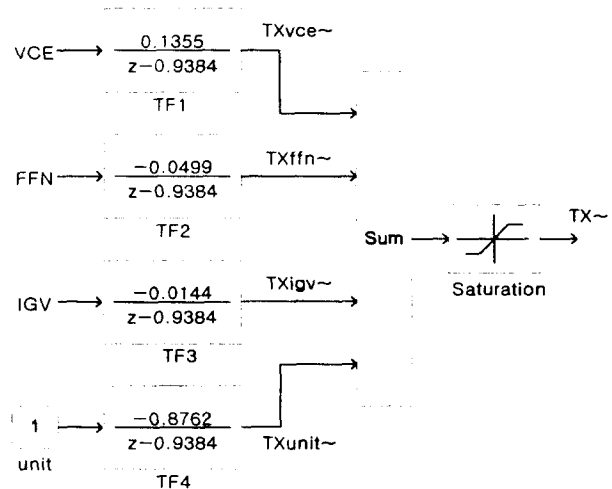


그림 3. 최종 구현된 배기가스온도(TX) 모델

아래 그림 4에서 최종 모델의 결과를 보여 주고 있다.

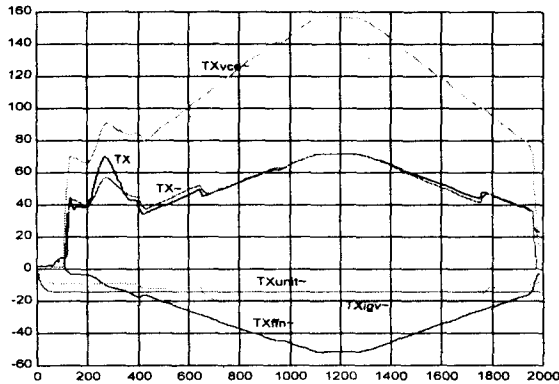


그림 4. 최종 구현된 배기가스온도 모델의 그래프

그림에서 TX~는 배기가스 온도모델의 추정치이고, TXvce~는 VCE에 의한 TX의 영향을 나타내고(TF1의 출력), TXffn~는 FFN에 의한 TX의 영향을 나타내고(TF2의 출력), TXigv~는 IGV에 의한 TX의 영향을 나타내고(TF3의 출력), TXunit~는 상수입력에 의한 TX의 영향을 나타낸다(TF4의 출력). 최종결과에서 보여주듯이 VCE와 FFN에 의해 온도특성의 전체 경향을 결정하고, IGV와 상수입력항에 의해 구간구간 떨어지는 온도특성을 결정한다. 그리고 상수입력은 IGV 개도에 따라서 실제로 유입되는 공기량을 결정하는 하나의 요인으로 생각할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 가스터빈 발전소의 배기가스 온도계통 모델을 구하기 위해 현장에서 운전데이터를 취득하고 이 데이터를 역으로 추정하여 모델을 구현하였다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 경험적으로 구현한 모델이 실제 운전데이터와 유사한 특성을 보임을 알 수 있었다. 이렇게 구현된 모델은 향후 발전소용 가스터빈 제어시스템을 새로이 구축하거나 튜닝하고자 할 때 배기가스 온도제어

계통을 설계하는데 기초자료로 활용할 수 있다.

[참고문헌]

- [1] 한국전력공사, "영월 및 군산 복합 가스터빈 기본운전지침서", 1992
- [2] General electric, "Speedtronic control", 1977
- [3] 정창기, 우주희, "발전소의 운전데이터에 의한 가스터빈 시스템 인식", 전기학회 하계학술대회 논문집(B), p. 734~736, 1998
- [4] Lennart Ljung, "System Identification Toolbox for Use with MATLAB", The MATH WORKS Inc., 1993