

국내 가스터빈 발전소의 제어시스템 검증용 시뮬레이터 개발

우주희, 최인규  
한국전력공사 전력연구원

Implementation of Simulator for Control System Verification of a Gas Turbine Power Plant

Woo Joo-Hee, Choi In-Kyu  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 본 논문은 국내 한 발전소의 가스터빈 제어계통을 개조하기 위해 제작된 터빈제어시스템과 제어 로직의 타당성을 검증하기 위해 구현한 시뮬레이터에 대해서 언급하고자 한다. 시뮬레이터는 가스터빈 계통의 열역학적 모델 부분, 제어시스템과 인터페이스를 위한 입출력 시스템 및 사용자 그래픽 인터페이스 부분으로 구성되어 있다. 실제 출력 운전상태에서 발전 운전데이터를 취득하였고, 이 데이터를 가지고 구현된 시뮬레이터의 성능을 확인한 결과 현장과 유사한 특성을 보여 주었다.

1. 서 론

국내 오래 전에 설치된 발전소의 터빈제어시스템은 설비가 노화되어 유지보수가 힘들게 되었고, 최근의 급속한 기술발전에 힘입어 제어시스템이 삼중화된 구조로 향상되었을 뿐만 아니라 다양한 자기진단 및 고장허용 운전이 가능하게 되어, 최신 설비의 개조가 필요하게 되었다. 이에 따라 디지털 터빈 제어시스템을 발전소 현장에 적용하기 전에 충분한 신뢰성을 확보하기 위해 구현된 터빈 제어알고리즘에 대한 적합성과 하드웨어를 검증할 필요가 있다. 이를 위해 전력연구원은 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터는 개조 대상 발전소 가스터빈 계통의 열역학적 모델을 포함하고 있으며, 과도상태 발생, 각종 시험 신호, 기기 제어신호 등을 구현할 수 있다. 시뮬레이터는 동특성 모델링 부분, 제어시스템과 인터페이스를 위한 입출력 시스템 및 사용자 그래픽 인터페이스 부분 등으로 구성되어 있다.[1]

본 논문은 국내 한 발전소의 가스터빈 동특성 모델링을 위해 일반적인 가스터빈 모델을 분석하고 대상 발전소의 운전 데이터 및 설계 데이터를 취득하였고 구현된 시뮬레이터의 성능을 확인하기 위해 실제 취득한 운전데이터와 비교하였으며 양호한 결과를 보여주었다.

2. 본 론

2.1 적용대상 발전소의 가스터빈 개요

국내 한 발전소의 가스터빈은 2대의 Twin Pac. 가스터빈과 발전기, 제어반과 보조설비로 구성되어 있다. 각 가스터빈은 가스발생기와 Free 터빈으로 구성되어 있으며, 가스발생기는 저압, 고압압축기와 2단의 저속터빈, 1단의 고속터빈과 연소 버너로 구성되어 있다. 에너지 변환의 관점에서, 가스터빈은 액체연료의 화석에너지를 이용하여 압축기로 흡입된 공기를 고온의 가스로 변환하고, 가스에너지를 이용하여 터빈을 구동함으로써 전력을 생산하는 시스템이다.[2]

그림 1은 대상 발전소의 가스터빈계통을 개략적으로 도식화한 것이다. 공기는 저압과 고압압축기에 의해 버너에 더 많은 공기질량을 공급하기 위해 가압된다. 고압압축기는 제어된 속도로 회전하고, 저압압축기는 구동터빈에 의해 압축기를 통과하는 유량이 최적유량이 되는

어떤 속도로 회전한다. 버너에 공급된 공기와 연료는 혼합 및 연소되며 발생된 가스는 터빈에 전달된다.

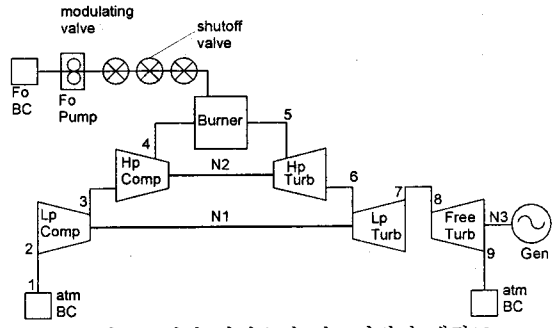


그림 1. 대상 발전소의 가스터빈의 개략도

가스발생기의 터빈은 3단으로 구성되며, 처음 단은 고압압축기와 두 번째와 세 번째 단은 저압압축기와 연결되어 있다. 배출가스는 가스발생기 터빈을 지난 후 발전기와 연결된 Free 터빈을 회전시킨다. 가스터빈의 기동시에는 버너의 연소를 돕기 위하여 충분한 공기를 공급하는 시동장치를 이용한다. 연료제어장치는 가스발생기 및 Free 터빈의 속도를 제어하고, 지나치게 높은 온도에서 가스터빈이 운전되는 것을 방지하기 위해 가속을 제한하는 가장 중요한 제어장치이다. 고압터빈 속도, Free 터빈 속도와 저압터빈의 배기가스 온도의 신호를 받아서 연료조절밸브의 개도를 변경시킴으로써 엔진의 운전상태를 제어한다. 그 외에 부하가 무부하에서 전부하로 변동하는 동안 속도를 4% 이내로 유지시키는 제어회로가 있다.

2.2 가스터빈 계통의 동특성 모델링

가스터빈 각 구성요소의 열수력 모델을 개발하기 위해 공기와 연소가스는 이상기체로 가정하고, 공기와 연소가스의 비열의 온도에 대한 효과는 무시하였다.[3]

2.2.1 터빈 모델

터빈의 압력강하와 유량의 관계는 Stodolla의 식을 이용하였고, 터빈 출구측 온도( $T_0$ )는 터빈이 이상적으로 운전되는 경우의 출구측 온도( $T_{0s}$ ), 입구측 온도( $T_i$ )와 터빈 효율( $\eta_T$ )을 도입하여 계산할 수 있다.

$$T_0 = T_i + \eta_T(T_{0s} - T_i)$$

터빈의 회전자가 가스로부터 받은 열에너지( $P_T$ )는 질량유량( $F$ )과 비열( $c_p$ )에 의해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_T = Fc_p(T_i - T_0)$$

2.2.2 압축기 모델

축류압축기의 경우 유량-압력 성능곡선은 선형 형태를 가지며, 실제 운전되는 압축기는 마찰, 열전달 등에 의해서 등엔트로피 조건이 아니며, 실제 출구측 온도( $T_o$ )는 압축기 효율( $\eta_c$ )을 도입하여 계산할 수 있다.

$$T_o = T_i + \frac{T_{os} - T_i}{\eta_c}$$

### 2.2.3 발전기/Free 터빈 속도 모델

발전기가 계통에 연결되어 있을 경우, 발전기는 터빈의 회전력을 이용하여 전기를 생산하지만 계통에 연결되어 있지 않을 경우, 터빈에 공급된 증기의 열에너지는 터빈의 속도를 증가시키는 역할을 하게 된다. 이를 모델링하면 다음과 같다.

○ 계통에 연계된 경우

$$: N = 60 \omega_{grid}, P_{elect} = \eta_G (P_T - P_{loss})$$

○ 계통에 연계되지 않은 경우 :

$$: I_{TIG} \frac{dN^2}{dt} = (P_T - P_{loss}) P_{elect} = 0$$

여기서  $N$ ,  $\omega_{grid}$ ,  $P_{elect}$ ,  $\eta_G$ ,  $P_{loss}$ ,  $I$ 는 Free 터빈 회전수, 계통주파수, 전력, 발전기 효율, 손실 전력, 회전관성이다.

터빈/발전기의 에너지 손실은 다음과 같이 회전수의 함수로 표현할 수 있다.

$$P_{loss} = K_o + K_1 N + K_2 N^2$$

여기서, 계수  $K_o$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ 는 운전데이터로부터 계산하였다.

### 2.3 운전데이터 취득

가스터빈의 경우, 증기터빈의 열평형도와 같은 열수력 모델의 계수를 결정하는데 사용할 수 있는 자료가 충분하지 않기 때문에 이를 합리적으로 추정할 필요가 있다. 가스터빈의 열수력 모델을 위한 데이터는 운전데이터를 근거로 생성하였고, 아래와 같은 운전방식에서 취득하였다.

- 터빈 기동 : 양 엔진 동시 기동
- 발전 출력 : 20MW → 40MW → 20MW  
→ 3MW → 계통 병행
- 터빈 정지 : 한쪽엔진 정지 → 다른 쪽 엔진 정지

취득한 데이터는 저압압축기 터빈속도(N1), 고압 압축기 터빈속도(N2), Free 터빈속도(N3), 발전기 출력, 저압터빈 출구온도(Tt7) 및 연료밸브(Modulating Valve) 위치신호 등을 취득하였다. 그림 2는 발전소의 가스터빈의 전 부하 운전구간중 기동하여 초기부하운전구간에 대해서 취득한 데이터를 적절한 스케일링하여 환산한 결과이다. 그림에서 X축은 시간(초)이고, Y축은 "N2/2"에 대해서는 실제 RPM에 1/2배한 것이고, "MW"에 대해서는 100배한 것이고, "100\*Vv Pos"에 대해서는 100배한 것을 나타낸 것이다. 그런데 N3에 대한 실제 전압범위를 잘못 예측하여 1000RPM 미만의 신호에 대해서는 잘린 결과를 보여 주었다.

### 2.4 시뮬레이터 프로그램의 구성

시뮬레이터가 제어기로부터 받아들이는 주요한 입력은 과도상태 발생 및 각종 시험 신호와 각종 기기 제어 신호가 있다.

대부분의 기기 제어는 제어기에서 수행하지만 일부 기기는 시뮬레이터에서 직접 제어가 필요한 경우가 있으며, 이러한 입력에 대해 터빈/발전기 계통의 운전상태를

보여주는 시뮬레이터의 표시, 제어 및 감시기능은 다음과 같다.

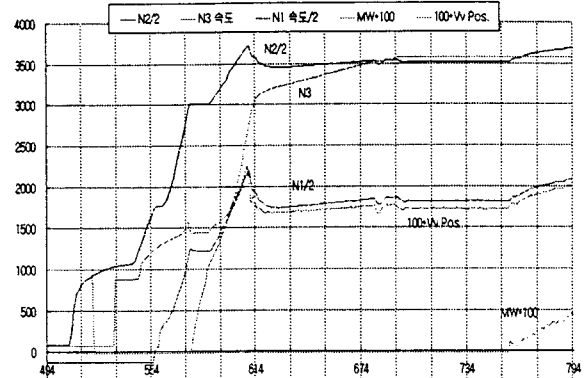


그림 2. 승속 및 초기 부하 형성까지의 결과 그래프

- 제어 기능 : 발전기 차단기, 계통 주파수, 대기온도에 대한 제어는 시뮬레이터에서 직접 수행이 가능하며, 제어 선택식 Dialog가 Pop-up되어 원하는 제어 입력을 입력할 수 있음
- 감시기능 : 시험 수행 시 관련 변수들의 변화 상태를 화면에서 확인 가능하도록 해 주는 기능
  - Mimic Display : 터빈 계통을 간략한 Mimic으로 표시하여 관련 변수들과 함께 표시해 주며 관련 변수는 주기적으로 갱신되어 현재값을 보여줌
  - Trend Graph Display : 감시되어야 하는 운전변수가운데 사용자에게 트렌드로 보여줌

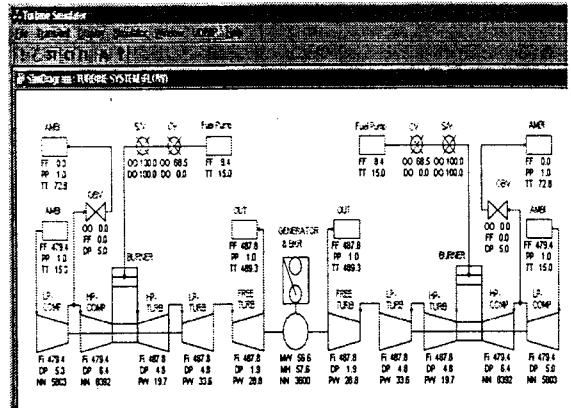


그림 3. 시뮬레이터용 운전 조작 화면

- 조작 기능
  - Freeze : 실행되고 있는 시뮬레이터의 일시정지 기능
  - Resume : Freeze된 시뮬레이터를 재기동하며 정지되었을 때의 상황을 다시 실행
  - Reset : Snapshot 메뉴에 의해 저장된 IC(Initial Condition) 값으로 시뮬레이터를 초기화하는 기능
  - Step : 시뮬레이션 모델들이 메뉴를 누를 때마다 한 단계씩 실행시킴
  - Snapshot : 현재 시뮬레이터의 상태를 IC(초기조건)로 저장하도록 지시하는 명령으로 Snapshot를 클릭한 후에 원하는 IC를 선택하면 해당 IC 번호에 현재의 시뮬레이터 값들이 저장됨
  - Stop : 시뮬레이터를 정지시키는 기능

## 2.5 모의실험 결과

앞의 절에서 언급한 방식대로 만들어진 시뮬레이터를 가지고 양 엔진으로 시뮬레이터를 기동하여 실제 취득한 운전데이터와 비교하였다. 시뮬레이터에서 터빈을 리셋하고, 시동장치(Starter)가 순서제어로직에 의해 기동되고, 점화가 성공적으로 이루어지면 5200N2 RPM에서 N3 속도제어가 이루어져서 3600N3 RPM에 도달하게 된다. 그 결과가 그림 4에 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과 N3가 정격에 도달되었을 때의 상태를 보면 4200N1, 7500N2, 3600N3, 17%밸브 개도이다. 실제 취득한 운전데이터인 그림 2의 시각이 약 734초인 지점과 비교해 보면 거의 유사한 결과를 보여주고 있다.

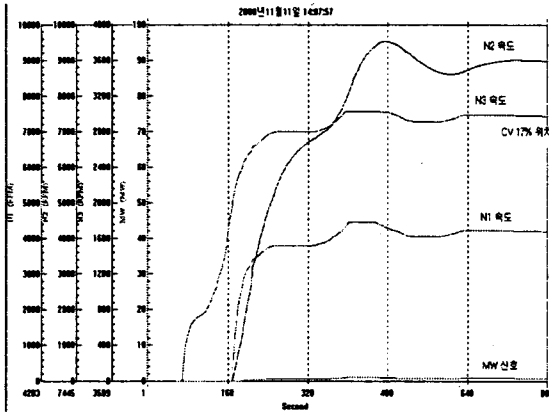


그림 4. 터빈 기동시의 모의실험 결과

그리고 계통병입하여 출력운전을 계속한 시뮬레이션 결과는 아래 표와 같다. 한쪽 엔진만의 출력 결과를 보여주고 있으며, 배기가스 온도에서 다소 차이가 나지만 전체적으로 비슷한 결과를 보여주고 있다.

MW	실제 취득한 데이터		시뮬레이션 결과	
	연료밸브 위치(%)	Tt7 (°C)	연료밸브 위치(%)	Tt7 (°C)
0 (계통병입 직전)	17.0	480	17.0	380
10	27.0	560	25.8	514
20	32.0	650	32.7	623

그림 5는 부하차단 시험결과를 보여주고 있다. 4MW에서 계통병해 한 후 바로 Shutoff Valve를 시뮬레이터에서 최대한 빨리 닫아 주어 각 터빈의 속도 변화를 살펴보았다.

온도	Zero N1까지	Zero N2까지	1000 N3까지
실제 운전 데이터 (초)	X	60	120
시뮬레이터 결과 (초)	15	60	120

그림 5를 보면 계통병해가 되고 난 이후에도 출력이 4MW 유지된 것처럼 보이는데 이는 쉽게 해결할 수 있으며, 나머지 결과는 양호한 상태를 보여주고 있다.

시뮬레이션 결과를 종합해보면 가스터빈의 속도 및 온도제어를 수행하는 제어기가 없는 상태에서 정상상태에서만 시뮬레이터의 성능을 살펴보았다. 그 결과 시뮬레이터 조정 상수를 몇 가지 세부조정할 필요가 있지만, 전체적으로 양호한 결과를 보여주었다.

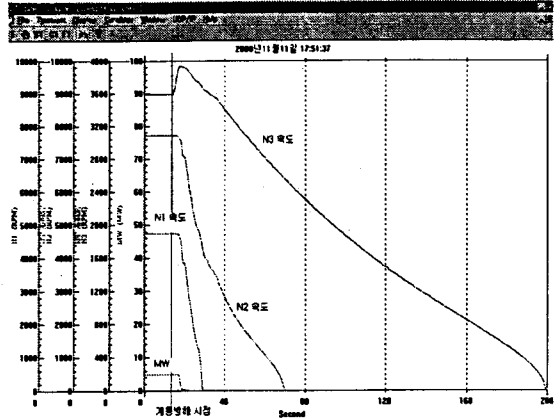


그림 5. 계통병해시 모의실험 결과

## 3. 결 론

국내 한 발전소의 가스터빈 제어계통을 개조하기 위해 제작된 터빈제어시스템과 제어로직의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이터를 구현하였다. 실제 적용 대상 발전소의 운전데이터와 비교한 결과 정상상태에서 대체적으로 유사한 결과를 보여주었으며, 앞으로 과도상태에서의 성능을 제어시스템과 연계하여 확인할 필요가 있다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 조병학 외 3명, "터빈 DCS 검증용 시뮬레이터 개발", 전력연구원 기술보고서, 2000
- [2] 한국전력공사, "가스터빈 1, 2, 3호기용 기본운전 지침서", 1999
- [3] 정창기 외 4명, "터빈 시뮬레이터 모델링", 전력연구원 기술보고서, 2000