

## 대용량 증기터빈 제어기의 신뢰성 검증을 위한 시뮬레이터 구현

최인규, 정창기  
전력연구원

### A realization of simulator for reliability verification on large steam turbine controller

I.K.Choi, C.K.Jeong  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - A simulator had been developed and will be used for reliability verification on large steam turbine control programs prior to its actual operation in field. A mathematical model on thermal dynamics pertaining to prime mover steam turbine and electrical generator was realized and included in this simulator. Also, many operating data acquired from fields was utilized in order to decide mechanical and thermal dynamic characteristics such as friction loss, windage loss and inertia. A user can decide closing or opening velocity of steam stop valves and steam regulation valves. This simulator is able to generate steam pressure, turbine speed, electrical power, and power system frequency.

#### 1. 서 론

한국전력공사 전력연구원에서 개발하고 있는 대용량 기력 발전소의 디지털 터빈제어 시스템의 제어 프로그램을 현장 터빈에 실적용하기 위해 이의 건전성을 증명하기 위하여 시뮬레이터를 개발하여 이용할 예정이다. 이 시뮬레이터에는 피동체인 발전기와 원동체인 터빈의 열수력에 관한 수학적 모델을 포함되어 있다. 또, 두꺼운 금속체인 고압터빈의 로터를 저속회전 상태로 부터 증기발전기에서 생산된 고온·고압의 증기를 이용하여 예열한 후 정격속도까지 승속할 수 있도록 하였다. 또, 전력계통에 병입하여 정상운전을 시행하고 정지하기까지의 기계 및 열역학적 특성 즉, 마찰손, 풍손, 관성 등을 결정하기 위하여 현장에서 취득한 운전 데이터를 이용하였으며, 터빈에 유입되는 증기량을 차단 및 조절하는 차단 밸브와 조절 밸브의 동작 속도를 여러 경우에 따라 사용자가 결정할 수 있도록 구현하였다. 또한, 증기 밸브를 구동하는 고압 제어유 및 보호 회로 계통의 동작 순서도 고려하여 발전소 현장에서 실제 운전을 수행하고 있는 터빈과 매우 흡사하게 구현하였다. 시뮬레이터의 기능을 열거하면 증기압력 발생, 터빈속도 발생, 발전기 출력 발생, 계통 주파수 발생 등이다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 시뮬레이터 구성

시뮬레이터는 디지털 터빈 제어시스템에 탑재할 응용 프로그램의 현장 적용력과 하드웨어의 건전성을 확인하기 위한 장치로서 근래에 건설된 발전용량 500MW 화력 터빈의 열역학적 모델을 포함하고 있다. 또한, 주제어기의 건전성을 확인하기 위한 시험을 수행하기 위해 시뮬레이터는 과도상태 발생, 각종 시험 신호, 기기 제어 신호 등을 제어기로부터 받아들인다. 발전기 차단기, 주증기 압력, 계통 주파수, 복수기 진공에 대한 조건설정 은 시뮬레이터에서 직접 수행이 가능하다.

##### 2.1.1 감시기능

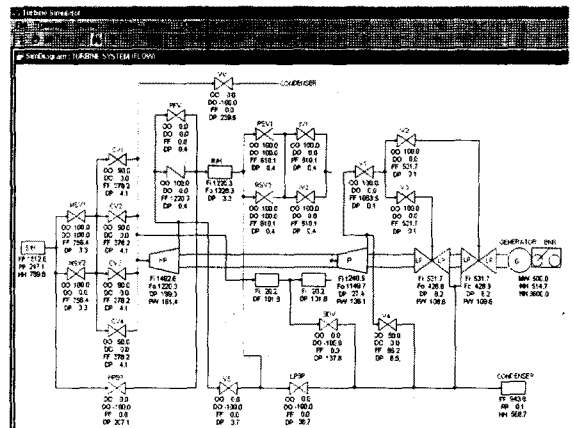
시뮬레이션을 수행하는 동안 관련 변수들의 변화 상태를 화면에서 확인 가능하도록 해 주는 기능으로 주증기 압력, 재열증기 압력, 복수기 진공, 주증기 온도, 재열 증기 온도, 증기밸브 개도, 발전기 출력, 발전기 차단기, 계통주파수 등의 공정제어 상태변수를 단순히 숫자(현재값)로만 표시하는 방법과 운전상태를 정확하게 판단하고 예측도 가능하도록 과거의 기록과 함께 그 변화 상태를 보여 주는 방법이 있다.

##### 2.1.2 조작기능

본 시뮬레이터의 조작기능은 시뮬레이션 모델들이 실행되도록 지시하는 Trend Graph Display, 실행되고 있는 시뮬레이터를 일시 정지시키는 Freeze, Freeze된 시뮬레이터를 재기동하며 정지되었을 때의 상황을 다시 실행하는 Resume, Snapshot 메뉴에 의해 저장된 초기조건(IC:Initial Condition) 값으로 시뮬레이터를 초기화하는 Reset, 시뮬레이션 모델들이 메뉴를 누를 때마다 한 단계씩 실행하는 Step, 시뮬레이터를 정지시키는 Stop 기능이 있으며, 마지막으로 현재 시뮬레이터의 상태를 초기조건으로 저장하도록 지시하는 명령으로 Snapshot을 클릭한 후에 원하는 IC를 선택하면 해당 IC 번호에 현재의 시뮬레이터 변수들이 저장된다.

##### 2.1.3 터빈 증기 흐름도

시뮬레이션을 수행하기 위해서는 현장의 터빈 본체를 그림으로 나타내고 여러 가지 프로세스 변수들의 값을 일목요연하게 나타낼 필요가 있다. <그림 1>은 터빈계통을 개략적으로 도식화한 것이다.



<그림 1> 증기 흐름도

보일러에서 생산된 고온, 고압의 주증기는 주증기 차단 밸브(MSV:Main Stop Valve) 및 주증기 조절밸브

(Control Valve)를 통과하여 고압터빈에 공급된다. 그러나 기동 및 과도상태에서는 터빈 바이패스 계통을 통하여 증기 흐름이 형성될 수 있다. 고압터빈을 통과한 저온·저압의 증기는 증기 발생기의 재열기에서 다시 가열되어 재열증기 차단밸브(Reheat Stop Valve)와 재열증기 조절밸브(Intercept Valve)를 거쳐 중압, 저압 터빈으로 공급되며, 터빈을 통과한 증기는 복수기에서 응축된다. 이러한 과정의 운전정보가 주기적으로 갱신되어 화면에 표시된다.

### 2.1.4 입출력 변수 배치도

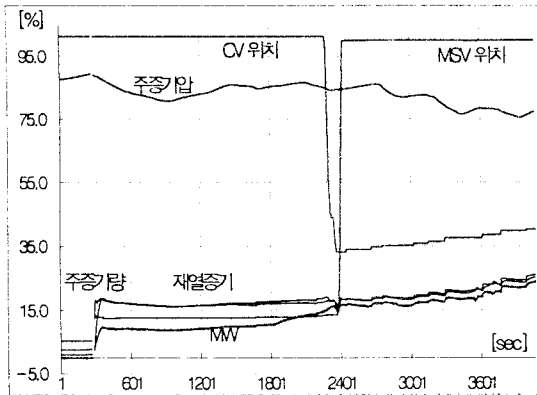
〈그림 2〉는 제어기와 시뮬레이터간 입력과 출력에 사용되는 변수 및 신호 형태, 범위 등에 관한 것으로서, 발전소에서 실제로 운전되고 있는 중요한 입출력점에 대하여 C<sup>++</sup>를 이용하여 프로그램하였다.

〈그림 2〉 입출력 변수 배치도

이러한 입출력점은 국내에서 운전중인 500MW 용량의 화력 기력터빈에 관련되는 중요한 사항을 모두 포함하고 있다.

### 2.2 열수력적 모델

증기 에너지가 터빈으로 유입되어 터빈 속도와 발전기 출력으로 전환되는 과정을 열역학적 에너지 방정식을 적용하여 포트란으로 프로그램하였다. 일정한 압력이 주어지면 밸브의 개도에 따라 증기 유량이 결정되고 여기에 추기를 고려하여 고압터빈, 중압터빈, 저압터빈에서 발



〈그림 3〉 운전데이터 취득 내용

생되는 에너지를 산출하였으며 이는 현장에서 운전되는 실제 데이터를 취득하여 참고하였다. 또, 고·중·저압 터빈과 재열기의 부피와 터빈·발전기의 관성 및 증기 흐름에 대한 관로저항, 밸브의 이동속도를 조절할 수 있다. 또한 실험실 차원에서 시뮬레이션이 가능하도록 터빈 밸브의 개도의 산출을 제어기의 서보전류 신호를 접수하여 열역학적 모델에서 수행하도록 하였다. 따라서, 현장에서 증기발생이 없는 상태에서 시뮬레이터가 속도 및 출력을 발생하고 이에 따라 제어기가 밸브 개도를 조절할 수 있도록 하려면 현장에서 움직이는 밸브 개도 신호를 직접 시뮬레이터에 연결하도록 입출력점을 수정해야 한다.

### 2.2.1 터빈 모델

터빈은 고압, 중압, 저압 터빈으로 구성되어 있으며, 각 터빈은 추기를 고려하도록 다단계로 모델링 되었다. 각 단계에서의 압력강하와 유량의 관계는 다음에 제시된 Stodolla의 식을 이용하였다.

$$F = K \sqrt{\frac{\rho_i \{ p_i^2 - p_o^2 \}}{D_i}}$$

여기서,  $F$ ,  $K$ ,  $\rho_i$ ,  $p_i$ ,  $p_o$  는 각각 질량유량, 어드미턴스, 입구밀도, 입구압력, 출구압력이며 어드미턴스는 실제 운전 데이터로부터 계산되었다. 실제 운전되는 터빈은 마찰, 열전달 등에 의하여 등엔트로피 반응이 아니다. 터빈의 회전달 등이 증기로부터 받는 열에너지는 증기의 비체적, 압력, 압력비, 비열비 및 터빈의 효율을 도입하고  $h_i$ 를 입구 엔탈피,  $h_o$ 를 출구 엔탈피라 하면 다음과 같이 구할 수 있다

$$P_{th} = F(h_i - h_o)$$

### 2.2.2 재열기 모델

재열기는 고압터빈에서 팽창된 저온의 증기를 다시 가열하여 중압터빈에 공급하는 시스템이며, 〈그림 4〉와 같이 압력강하, 온도상승을 계산하도록 모델링 되었다.

Upstream Flow	1220.3011	ton/h
Downstream Flow	1220.3011	ton/h
Upstream Pressure	40.000432	kg/cm <sup>2</sup>
Center Pressure	38.360447	kg/cm <sup>2</sup>
Downstream Pressure	36.720461	kg/cm <sup>2</sup>
Upstream Enthalpy	634.00045	kcal/kg
Downstream Enthalpy	844.30045	kcal/kg
Upstream Temp	280.42046	C
Downstream Temp	536.85581	C
Upstream Density	0.0571318	m <sup>3</sup> /kg
Downstream Density	0.1012110	m <sup>3</sup> /kg
Heat Transfer Coeff	50680.446	kcal/sec
Volume	149.5	m <sup>3</sup>
Upstream Admittance	12.5	m <sup>3</sup>
Downstream Admittance	268.12131	
Metal Mcp	268.12131	kca/C
	0	kca/C

〈그림 4〉 재열기 모델

이를 위한 열수력적 보존 방정식은  $M$ 을 터빈내부 유체의 질량,  $Q$ 를 재열기에 공급되는 열량이라 할 때 다음과 같다.

$$\frac{dM}{dt} = F_i - F_o$$

$$M \frac{dh}{dt} = F_i (h_i - h) + Q$$

$$F = K \sqrt{\rho \Delta p}$$

### 2.2.3 터빈·발전기 속도 모델

발전기가 계통에 연결된 경우, 발전기는 터빈의 회전력을 이용하여 전기를 생산하지만 연결되지 않은 경우, 터빈에 공급된 증기의 열에너지는 터빈·발전기의 속도를 증가시키는 역할을 하게된다.  $N, \omega, P_e, \eta, P_{th}, P_{loss}, I$ 를 각각, 회전수, 계통주파수, 전력, 효율, 공급에너지, 손실, 회전관성이라 하고 이를 모델링하면 다음과 같다.

i) 계통에 연결된 경우

$$N = 60 \omega$$

$$P_e = \eta (P_{th} - P_{loss})$$

ii) 계통에 연결되지 않은 경우

$$P_e = 0$$

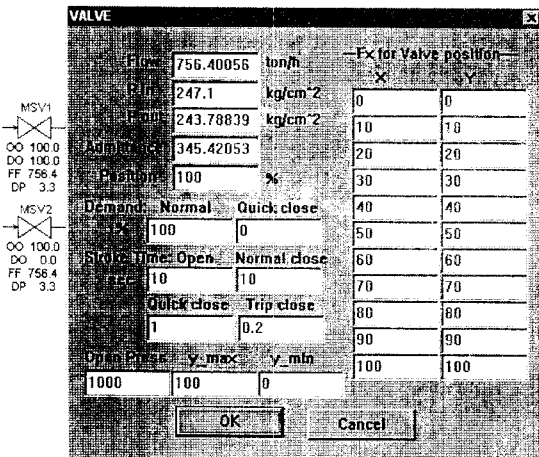
$$I \frac{dN^2}{dt} = (P_{th} - P_{loss})$$

터빈·발전기의 에너지 손실은 다음과 같이 회전수의 함수로 표현할 수 있으며 계수는 운전 데이터로부터 계산하였다.

$$P_{loss} = K_0 + K_1 N + K_2 N^2$$

### 2.2.4 밸브 모델

밸브 모델은 유로의 단면적을 제한하여 유량을 조절하는 기능을 모델링하며, <그림 5>에서 유량과 압력의 관계는 어드미턴스에 의해서 결정된다.



<그림 5> 밸브 모델

밸브의 개폐에 소요되는 시간은 시정수에 의해 조정된다. 각 밸브의 개도와 실제유량과의 관계는 발전소의 운전데이터 또는 설계 데이터로부터 결정된다.

### 2.3 제어 프로그램

터빈 제어기의 하드웨어는 미국의 Triconex사에서 제작, 신뢰성이 입증되어 광범위하게 사용되고 있는 삼중화 제어시스템(TMR:Triple Modular Redundancy)으로서 하나의 시스템에 중앙처리장치가 세 개로 분리되어 병렬로 운전되고, 광범위한 자기진단 기능이 있으며, 단일 구성품의 고장으로 인한 파급확산을 방지하여 신뢰성이 향상되었고, 온-라인 보수가 가능하다. 제어 프로그램을 구현하기 위해 사용한 소프트웨어 패키지는 동일 회사의 "TS1131"이며, 이는 Windows NT 환경에서 운용된다. 이 프로그램은 IEC 1131-3에서 정의된 기본적인 제어 블록을 제공하고 있으며, 이들 블록을 사용하여 사용자가 필요한 블록을 만들어서 응용 프로그램을 작성할 수 있다. 대용량 화력발전기에 적용할 고압 터빈 로터 예열, 속도 상승, 속도 병합, 계통 병입, 출력 증발, 유량제어 전환, 밸브 시험, 과속도 제어, 속도 조정을 설정, 과속도 비상정지, 부하추중운전 등의 터빈 제어 프로그램을 개발하고 이 프로그램의 건전성을 확인하기 위하여 시뮬레이터를 이용할 예정이다.

### 3. 결 론

적용 대상 발전소의 운전 데이터를 취득하고 설계 자료를 확보한 후, 이를 기초로하여 현장 터빈의 동적모델을 결정할 예정이다. 또, 제어 프로그램을 개발한 후 동적모델과 상호 유기적으로 결합되어 운전되는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인한 후 이를 실제 현장에 적용할 예정이다. 이 시뮬레이터는 국내에서 운전중인 500MW급 이하의 모든 화력발전용 증기터빈에 적용할 수 있도록 개발하였으며 가스터빈, 향후 원자력 터빈 및 급수펌프 구동용 터빈에 필요한 시뮬레이터를 개발할 필요가 있다

### [참 고 문 헌]

- [1] "터빈 DCS 검증용 시뮬레이터 개발" 전력연구원, 조병학 외 3명
- [2] "터빈 시뮬레이터 모델링" 전력연구원, 정창기 외 3명
- [3] "중용량 증기터빈 제어기의 신뢰성 검증을 위한 시뮬레이터 구현" 2000년 대한 전기학회 하계학술 논문집