

## 중용량 증기터빈 제어기의 신뢰성 검증을 위한 시뮬레이터 구현

최인규, 우주희  
전력연구원

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

I.K.Choi, J.H.Woo  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - A simulator had been developed and used for reliability verification on medium size 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 valve and steam regulation valve. This simulator is able to generate steam pressure, turbine speed, electrical power, and power system frequency.

#### 1. 서 론

한국전력공사 전력연구원에서 개발하고 있는 중용량 기력 발전소의 디지털 터빈제어 시스템의 제어 프로그램을 현장 터빈에 적용하기에 앞서 이의 건전성을 증명하기 위하여 시뮬레이터를 개발하여 이용하였다. 이 시뮬레이터에는 피동체인 발전기와 원동기인 터빈의 열수력에 관한 수학적 모델이 포함되어 있다. 또, 두꺼운 금속체인 고압터빈의 로터를 저속회전 상태로 부터 증기발생기에서 생산된 고온·고압의 증기를 이용하여 예열한 후 정격속도까지 가속한 후 전력계통에 병입하여 정상운전을 시행하고 정지하기까지의 기계적/열역학적 특성 즉, 마찰손, 풍손, 관성 등을 결정하기 위하여 현장에서 취득한 운전 데이터를 이용하였으며, 터빈에 유입되는 증기량을 차단 및 조절하는 차단 밸브와 조절 밸브의 동작속도를 여러 경우에 따라 사용자가 결정할 수 있도록 구현하였다. 또한, 증기 밸브를 구동하는 고압유 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 제어시스템의 프로그램의 현장 적용력과 하드웨어의 건전성을 확인하기 위한 장치로서 서전하력 터빈의 열역학적 모델을 포함하고 있으며, 주제어기의 건전성 확인을 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 제어는 시뮬레이터에서 직접 수행이 가능하다.

##### 2.1.1 감시기능

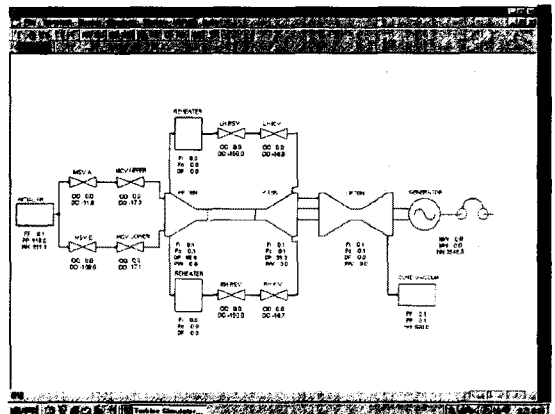
시험 수행 시 관련 변수들의 변화 상태를 화면에서 확인 가능하도록 해 주는 기능으로 주증기 압력, 재열증기 압력, 복수기 진공, 주증기 온도, 재열증기 온도, 증기 밸브 개도, 발전기 출력, 발전기 차단기, 계통주파수 등의 공정제어 상태변수를 단순히 숫자(현재값)로만 표시하는 방법과 운전상태를 정확하게 판단하고 예측도 가능하도록 과거의 기록과 함께 그 변화상태를 보여 주는 방법이 있다.

##### 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

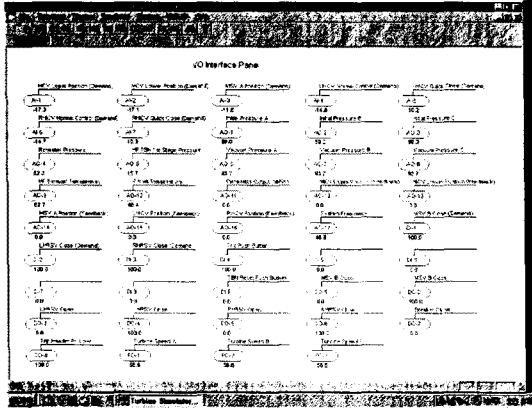
시뮬레이션을 수행하기 위해서는 현장의 터빈 본체를 그림으로 나타내고 여러 가지 프로세스 변수들의 값을 일목요연하게 나타낼 필요가 있다. 증기 흐름도에 표시되는 기기는 주증기 제어밸브(MCV), 주증기 차단밸브(MSV), 고압 터빈, 증압 및 저압 터빈, 재열기, 재열 증기 차단밸브(ICV, RSV), 발전기, 차단기 등이며 운전정보가 주기적으로 갱신되어 표시된다.



(그림 1) 증기 흐름도

##### 2.1.4 입출력 변수 배치도

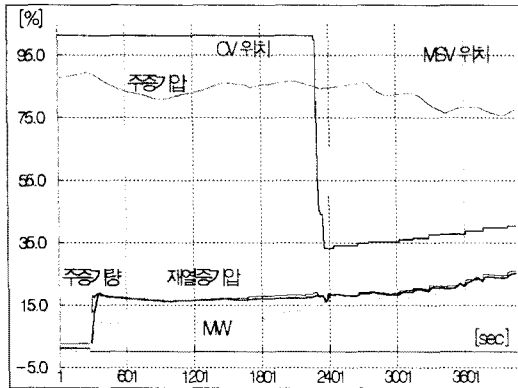
〈그림 4〉는 제어기와 시뮬레이터간 입/출력에 사용되는 변수 및 신호 형태, 범위 등에 관한 것으로서, C<sup>+</sup>를 이용하여 프로그램하였다.



〈그림 2〉 입출력 변수 배치도

### 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 증기흐름에 대한 관로저항, 밸브의 이동속도를 조절할 수 있다. 또한 실험실 차원에서 시뮬레이션이 가능하도록 터빈 밸브의 개도의 산출을 제어기의 서보전류 신호를 접수하여 열역학적 모델에서 수행하도록 하였으므로 현장에서 증기발생이 없는 상태에서 속도 및 출력에 따른 밸브 개도조절을 수행하려면 입출력점을 수정해야 한다.

#### 2.2.1 터빈 모델

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

$$F = K \sqrt{\rho_i \left( \frac{p_i^2 - p_o^2}{p_i} \right)}$$

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 회전자가 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 역할을 하며 이를 위한 열수력적 보존 방정식은 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 동적 모델의 계수 결정

시뮬레이터에서 최종적으로 조정된 계수는 마찰손 0.00017, 풍손 0.004, 고압터빈 입구 어드미턴스 10.1281, 관성정수 7000, 복수기 압력 0.063, 복수기 엔탈피 619 등이며 증기 조절용 밸브에 관한 사항은 다음 표와 같다.

개도(%)	유량계수	개도(%)	유량계수	개도(%)	유량계수
0	0	9	E-260	80	80
6	E-299	10	E-100	90	90
7	E-290	25	9	100	100
8	E-280	70	70		

〈표 1〉 MSV-A 개도 대 유량계수

개도(%)	유량계수	개도(%)	유량계수	개도(%)	유량계수
0	0	8	7	80	80
2	0.1	11	11	90	90
5	1.5	33	19	100	98.11
7	6	40	40		

〈표 2〉 MCV 개도 대 유량계수

	Open	Close		
	Stroke Time	Stroke Time	Quick Time	Trip Time
MSV-A	0.1sec	0.1sec	0.1sec	0.1sec
MSV-B	10sec	10sec	1sec	0.2sec
MCV	1sec	1sec	0.2sec	0.2sec
RSV	10sec	10sec	1sec	0.2sec
ICV	1sec	1sec	0.2sec	0.2sec

〈표 3〉 밸브 개폐시간

### 2.3 제어 프로그램

터빈 제어기의 하드웨어는 미국의 Triconex사에서 제작, 신뢰성이 입증되어 광범위하게 사용되고 있는 삼중화 제어시스템(TMR:Triple Modular Redundancy)으로서 하나의 시스템에 중앙처리장치(CPU:Central Process Unit)가 세 개로 분리되어 병렬로 운전되고 있으며, 광범위한 자기진단 기능이 있으며, 단일 구성품의 고장으로 인한 파급확산을 방지하여 신뢰성이 향상되었고, 온-라인 보수가 가능하다. 제어 프로그램을 구현하기 위해 사용한 소프트웨어 팩키지는 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 사용할 수 있다. 서전화력에 적용하기 위하여 고압터빈 로터 예열, 속도 상승, 속도 병합, 계통 병입, 출력 증발, 유량제어 전환, 밸브 시험, 과속도 제어, 속도조정을 설정, 과속도 비상정지, 부하추종운전 등의 터빈제어 프로그램이 개발되어 있으며 그림 2에 한 가지 예를 나타내었다. 이 프로그램을 EWS에서 작성 후 컴파일하여 제어로 다운로드한 후에 수행시킬 수 있다. 적용 대상 발전소의 제원은 다음과 같다.

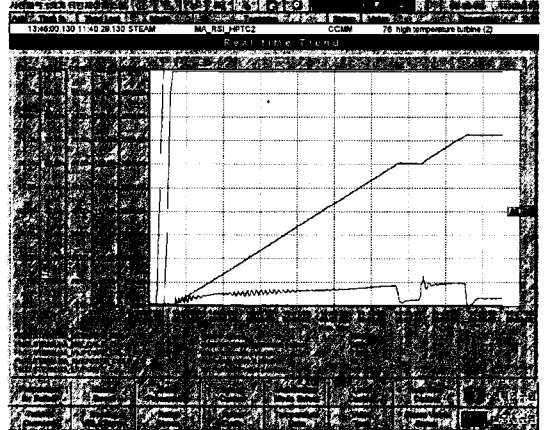
항 목	단 위	내 용
터빈 형식		재열재생 복수 터빈
발전기 출력	MW	200
정격 속도	RPM	3600
주증기 압력	kg/cm <sup>2</sup>	171
주증기 온도	℃	538
재열증기 압력	kg/cm <sup>2</sup>	33.1
재열증기 온도	℃	538
증기 밸브		MSV 2개, CV 6개 RSV 2개, ICV 2개

〈표 4〉 대상발전소 제원

### 2.4 시뮬레이션 결과

터빈·발전기의 제어에 있어서 중요한 운전 변수인 터빈속도, 주증기 차단밸브 개도, 주증기 조절밸브 개도, 재열증기 조절밸브 개도 등에 대하여 주증기 유량조절밸브를 이용하여 정지 상태에 있는 터빈을 정격속도까지 승속하는 운전상황에 대하여 수행한 시뮬레이션 결과를

나타내었다. 적용 대상 발전소는 터빈의 정상적인 속도 제어를 주증기 차단밸브 우회밸브로 수행하나 주증기 조절밸브를 이용하여 승속할 수 있도록 프로그램하였으며 주증기 압력 76kg/cm<sup>2</sup>, 엔탈피 735kcal/kg인 상태에서 시뮬레이션한 결과를 〈그림 4〉에 나타내었다. 여기서 속도 목표값을 3000rpm으로 설정하자 최초로 재열증기 조절밸브가 빠르게 열리고 이어서 주증기 조절밸브가 빠르게 열린 후 주증기 조절밸브 개도가 증가하여 속도가



〈그림 4〉 MCV를 이용한 승속 시뮬레이션 결과

3000rpm에 도달하자 가속에너지를 제외한 회전손실을 공급하기 위해 주증기 조절밸브의 개도가 감소하고 있다. 또, 속도 목표값을 3600rpm으로 설정하자 가속에너지 공급을 위해 주증기 조절밸브의 개도가 빠르게 증가하여 속도가 상승하고 3600rpm에 도달하면 무부하 정격속도 유량까지 감소하는 것을 확인할 수 있다. 여기서 개도가 0%까지 감소한 것은 속도의 오버슈트로 인한 것이다.

## 3. 결 론

적용 대상 발전소의 운전 데이터를 취득하고 설계 자료를 확보한 후, 현장 터빈의 동적모델을 개발하여 개발된 제어 프로그램과 상호 유기적으로 운전됨을 확인하였다. 개발된 시뮬레이터를 이용하여 제어 프로그램의 모든 기능이 정상적으로 동작함을 확인하고 이를 실제 적용한 결과 대상 발전소는 정상운전 중이다. 200MW급의 중용량을 대상으로 시뮬레이터를 개발하였으나 소용량과 대용량 터빈을 대상으로 새로운 시뮬레이터의 개발이 필요하다.

### 〔참 고 문 헌〕

- (1) "터빈 DCS 검증용 시뮬레이터 개발" 전력연구원, 조병학 외 3명
- (2) "기력터빈 디지털 제어시스템 개발" 전력연구원, 정창기 외 4명