

급수펌프 구동용 증기터빈 제어기의 신뢰성 검증을 위한 시뮬레이터 구현

최인규, 정우중  
전력연구원

A realization of simulator for reliability verification on turbine controller for boiler feed pump

I.K.Choi, W.J.Jeong  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - A simulator had been developed and will be used for reliability verification on turbine control programs for boiler feed pump in power plant to its actual operation in field. A mathematical model on thermal dynamics pertaining to prime mover steam turbine and pump was realized and included in this simulator. Also, many design and operating data acquired from fields were 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, pump power.

1. 서 론

한국전력공사 전력연구원에서 개발하고 있는 보일러 급수펌프 구동용 터빈 디지털 제어 시스템의 제어 프로그램을 현장 터빈에 실적용하기에 앞서 이의 건전성을 증명하기 위하여 시뮬레이터를 개발하여 이용하였다. 이 시뮬레이터에는 피동체인 펌프와 원동체인 터빈의 열수력에 관한 수학적 모델이 포함되어 있다. 또, 두꺼운 급속체인 터빈의 로터를 저속회전 상태로 부터 승속하여 고온 고압의 보일러 드럼수위를 일정치로 유지할 수 있도록 속도제어를 할 수 있도록 하였다. 또, 급수펌프 구동용 터빈 2대를 병렬로 운전할 경우 상호간에 미치는 열수력적 현상도 고려하였으며, 기계 및 열역학적 특성 즉, 마찰손, 풍손, 관성 등을 결정하기 위하여 현장에서 취득한 운전 데이터를 이용하였다. 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 드럼 압력 및 온도 발생, 터빈 및 펌프의 속도 발생, 고압 및 저압증기의 압력 및 온도 발생 등이다.

2. 본 론

2.1 시뮬레이터 구성

시뮬레이터는 디지털 터빈 제어시스템에 탑재할 응용 프로그램의 현장 적용력과 하드웨어의 건전성을 확인하기 위한 장치로서 현재 운전되고 있는 보일러 급수펌프 구동용 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. 드럼 압력 및 온도, 고·저압증기의 압력 및 온도, 복수기 진공에 대한 조건설정은 시뮬레이터에서 직접 수행이 가능하며, 전동기로 구동되는 급수펌프도 운전할 수 있도록 되어

있다.

2.1.1 감시기능

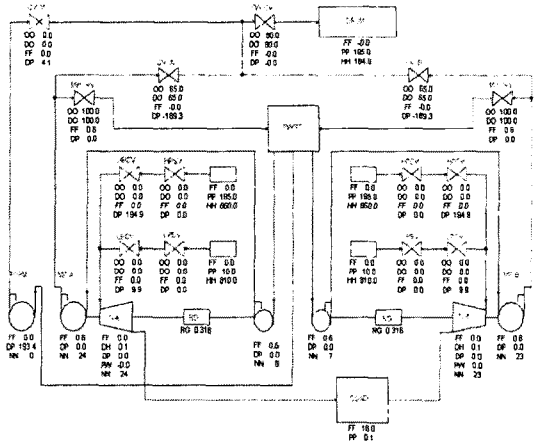
시뮬레이션을 수행하는 동안 관련 변수들의 변화 상태를 화면에서 확인 가능하도록 해 주는 기능으로 주증기 압력 및 온도, 고·저압 증기의 압력 및 온도, 복수기 진공 및 온도, 고·저압 증기밸브 개도, 등의 공정제어 상태변수를 단순히 숫자(현재값)로만 표시하는 방법과 운전상태를 정확하게 판단하고 예측도 가능하도록 과거의 기록과 함께 그 변화상태를 보여 주는 방법이 있다.

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



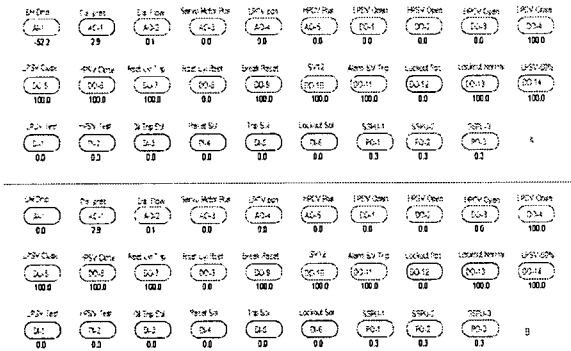
〈그림 1〉 증기 흐름도

일목요연하게 나타낼 필요가 있다. <그림 1>은 터빈 계통을 개략적으로 도식화한 것이다.

급수펌프 구동용 터빈을 최초로 기동하기 위해서는 저압 차단밸브(LPSV:Low Pressure Stop Valve)와 저압 조절밸브(LPCV:Low Pressure Control Valve)를 이용한다. 저압증기는 정상운전 중인 주증기 터빈의 추기에서 생산된다. 기동 초기에는 저압증기의 압력이 매우 낮으므로 저압 증기만으로는 원만한 물공급이 어렵게 된다. 따라서, 증기 보일러에서 생산된 고온, 고압의 주증기가 고압 차단밸브(HPSV:High Pressure Stop Valve) 및 고압 조절밸브(HPGV:High Pressure Control Valve)를 통과하여 터빈에 공급되어 터빈과 펌프의 속도를 조절하게 된다. 이후 점차적으로 주증기 터빈의 출력이 증가하면 주증기 터빈의 추기조건이 호전되어 저압증기 만으로도 충분한 운전을 할 수 있게 되므로 저압증기 조절밸브의 개도는 감소하고 고압증기 조절밸브는 닫히게 된다. 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 발전용 급수펌프 구동용 터빈에 관련되는 중요한 사항을 모두 포함하고 있다.

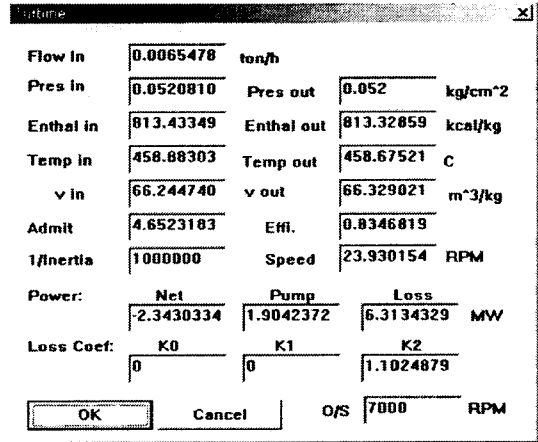
## 2.2 열수력적 모델

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 터빈에서 발생하는 에너지를 산출하였으며 이는 현장에서 운전되는 실제 데이터를 취득하여 참고하였다. 또, 터빈과 재열기의 부피와 터빈·펌프의 구성 및 증기흐름에 대한 관로저항, 밸브의 이동속도를 조절할 수 있다. 또한 실험실 차원에서 시뮬레이션이 가능하도록 터빈 밸브의 개도의 산출을 제어기의 서보전원 신호를 접수하여 열역학적 모델에서 수행하도록 하였다. 따라서, 현장에서 증기 발생이 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.

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



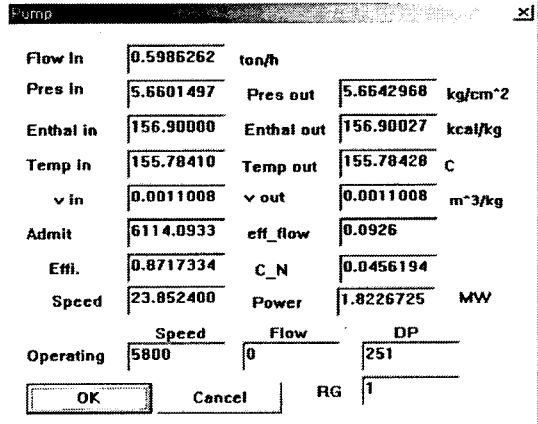
<그림 3> 터빈 모델

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 펌프 모델

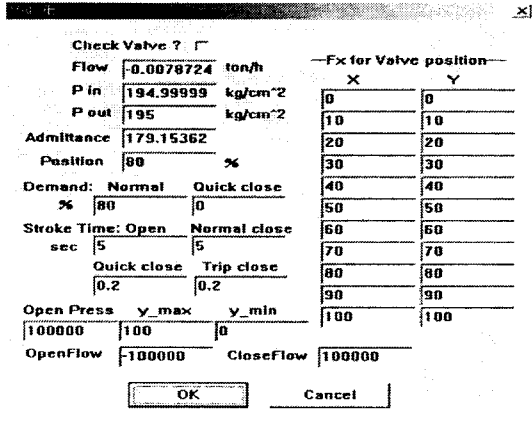
펌프는 터빈에서 발생된 축동력을 이용하여 급수정장 탱크의 물을 보일러 드럼에 공급하는 시스템이며, <그림 4>와 같이 속도, 유량, 어드미턴스, 등을 계산하도록 모델링 되었다.



〈그림 4〉 펌프 모델

2.2.3 밸브 모델

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

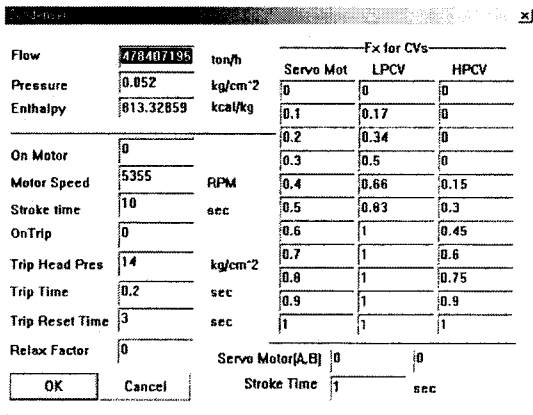


〈그림 5〉 밸브 모델

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

2.2.4 복수기 모델

복수기 모델은 증기가 터빈에서 일을 하고 응축되어 다시 물로되는 상태를 모델링하며, 상태변수는 유량, 압력, 엔탈피가 필요하다. 복수기 모델에 추가하여 〈그림 6〉과 같이 서보모터 모델도 추가하여 이용의 편리성을 높였다.

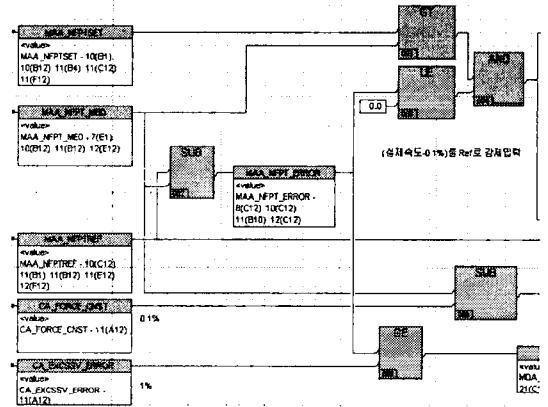


〈그림 6〉 복수기 및 서보모터 모델

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 있

며, 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. 급수펌프 구동용 터빈에 적용할 트립 및 래셋, Run Up, Run Down, 속도증감, 밸브 시험, 과속도 정지 시험, 제어상수 조정, 과속도 비상정지 등의 터빈제어 프로그램을 개발하고 이 프로그램의 건전성을 확인하기 위하여 시뮬레이터를 이용하였다.



〈그림 7〉 제어프로그램 예

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 적용하여 성공적으로 운전되고 있다. 이 시뮬레이터는 국내에서 운전중인 급수펌프 구동용 증기터빈에 적용할 수 있도록 개발하였으므로 가스터빈, 향후 원자력 터빈 및 급수펌프 구동용 터빈에 필요한 시뮬레이터를 개발할 필요가 있다

[참고 문헌]

- [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
- [4] "대용량 증기터빈 제어기의 신뢰성 검증을 위한 시뮬레이터 구현" 2001년 대한 전기학회 하계학술 논문집