

원자력발전소 증기터빈 발전기의 부하차단 모의시험

최인규\*, 정태원\*\*, 이기성\*\*\*  
 전력연구원\*, 충남대학교 전기공학과\*\*, 한국타이어

A simulation test of load rejection for steam turbine generator  
 in nuclear power plant

Inkyu Choi\*, Taewoon Jeong\*\*, Kiseong Lee\*\*\*  
 Korea Electric Power Research Institute\*, Chungnam National University\*\*, Hankook Tire\*\*\*

**Abstract** - A steam turbine in thermal/nuclear power plant drives generator and maintains it at rated speed using high temperature and high pressure steam energy. After synchronization in parallel with the power system, generator output increases according as the governor, that is the controller, increases steam flow into turbine. By the way, as the steam flow into turbine can not be reduced fast even though the electrical load is lost, the turbine gets into dangerous situation due to the increase of its speed. At this time, the duty of the turbine governor is to limit the speed to its overspeed trip setpoint by stopping the steam flow as soon as possible, the test of which is called load rejection test. It is introduced in this paper for a simulation test of generator load rejection to be implemented on the turbine governor in a 600MW nuclear power plant before its startup.

여기로부터 받아들인다. 증기발전기 압력 및 온도, 고·저압증기의 압력 및 온도, 복수기 진공 및 온도에 대한 조건설정은 시뮬레이터에서 직접 수행이 가능하다.

2.2.1 감시 및 조작 기능

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 엔지니어에게 보여주는 감시기능과 시뮬레이션 모델들의 실행 및 정지를 수행하기 위한 조작기능으로 Freeze, Resume, Reset, Step, Stop 기능이 있다.

2.2.2 터빈 증기 흐름도

시뮬레이션을 수행하기 위해서는 현장의 터빈 본체를 그림으로 나타내고 여러 가지 프로세스 변수들의 값을

1. 서 론

화력 및 원자력 발전소의 증기터빈은 고온·고압의 증기 에너지를 입력으로 발전기를 구동하여 정격속도에 도달시킨 후, 발전기가 전력계통에 병입되면 조속장치, 즉 터빈 제어기의 동작으로 증기 유입량이 증가하여 발전기 출력이 증대한다. 그런데 전력계통 또는 발전기 고장으로 전기 부하가 탈락되어도 터빈에 유입하는 증기의 에너지는 신속히 감소할 수 없으므로 터빈·발전기의 속도가 필연적으로 상승하여 위험한 상황에 처하게 된다. 이때, 터빈 조속장치, 즉 터빈 제어시스템의 책무는 터빈에 유입되는 증기를 가능한 한 신속히 차단하여 터빈속도를 과속도 비상정지 설정치 이내로 유지하는 것이며, 이러한 조속 기능의 정상동작 여부에 대한 시험을 부하차단 시험이라고 한다. 이 논문에서는 국내에서 개발하여 운전중인 발전용량 600MW의 원자력 터빈 제어기를 대상으로 실제 기동전에 시행한 부하차단 모의시험과 이때 제어기의 동작을 소개하고자 한다

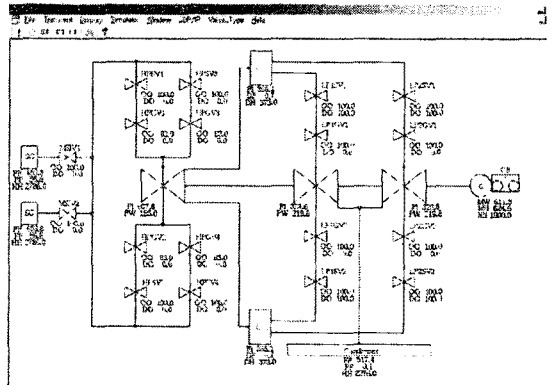
2. 본 론

2.1 원자력 발전소 구성

대상 원자력 발전소는 설비용량 600MW로서, 고압터빈 2대, 습분분리 제어기 2대, 저압터빈 4대로서 고압단밸브 4개 고압조절밸브 4개, 저압차단밸브 4개, 저압조절밸브 4개로 구성되어 있다.

2.2 시뮬레이터 구성

시뮬레이터는 터빈 디지털 제어시스템에 탑재할 응용 프로그램의 현장 적용력과 하드웨어의 건전성을 확인하기 위한 장치로서 현재 운전되고 있는 원자력터빈의 열역학적 모델을 포함하고 있다. 또한, 주제어기의 건전성을 확인하기 위한 시험을 수행하기 위해 시뮬레이터는 과도상태 발생, 각종 시험 신호, 기기 제어 신호 등을 제



<그림 1> 증기 흐름도

일목요연하게 나타낼 필요가 있다. <그림 1>은 원동기인 터빈 계통과 피동체인 발전기를 개략적으로 도식화한 것이다.

터빈을 최초로 기동하려면 고압 차단밸브(HPSV:High Pressure Stop Valve)를 이용하여 정격속도에 도달시킨 후, 발전기를 전력계통에 병입하기 위해서는 고압 조절밸브(HPGV:High Pressure Governor Valve)를 이용한다. 이 후, 고압 조절밸브의 개도를 증가시키면 터빈에 유입되는 증기의 유량이 증가하고 이에 따라 발전기의 전기출력이 증가한다. 이러한 과정의 운전정보가 주기적으로 갱신되어 화면에 표시된다.

2.2.3 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\*\*를 이용하여 프로그램하였다.

File Transfer Display Simulation Window 1000.00 View Type Plot

시뮬레이션 결과 출력 화면으로, 다양한 물리량과 변수의 값을 표 형태로 보여줍니다. 표에는 여러 열과 행이 포함되어 있으며, 각 셀에는 수치 데이터가 표시되어 있습니다.

<그림 2> 입출력 변수 배치도

이러한 입출력점은 해당 발전소의 터빈을 제어하고 보호하기 위한 중요한 사항을 모두 포함하고 있다.

### 2.3 열수력적 모델

증기 에너지가 터빈으로 유입되어 터빈 속도와 발전기 출력으로 전환되는 과정을 열역학적 에너지 방정식을 적용하여 포트란으로 프로그래밍하였다. 일정한 압력이 주어지면 밸브의 개도에 따라 증기 유량이 결정되고 터빈에서 발생하는 에너지를 산출하였으며 이는 현장에서 운전되는 실제 데이터를 취득하여 참고하였다. 또, 터빈과 증기터빈의 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 하였다. 따라서, 현장에서 증기발전이 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.

#### 2.3.1 터빈 모델

터빈은 고압, 중압, 저압 터빈으로 구성되어 있으며, 각 터빈은 추기(Extraction Steam)를 고려하도록 단단계로 모델링 되었다. 각 단계에서의 압력강하와 유량의 관계는 다음에 제시된 Stodolla의 식을 이용하였다.

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

여기서,  $F$ ,  $K$ ,  $\rho_i$ ,  $D_i$ ,  $p_o$  는 각각 질량유량, 어드미턴스, 입구밀도, 입구압력, 출구압력이며 어드미턴스는 실제 운전 데이터로부터 계산되었다.

시뮬레이션 결과 출력 화면으로, 터빈 모델의 상세한 성능 지표와 물리량을 표 형태로 보여줍니다. 표에는 열과 행이 포함되어 있으며, 각 셀에는 수치 데이터가 표시되어 있습니다.

<그림 3> 터빈 모델

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

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

### 2.3.2 발전기 모델

발전기가 계통에 연결된 경우, 발전기는 터빈의 회전력을 이용하여 전기를 생산하지만 연결되지 않은 경우, 터빈에 공급된 증기의 열에너지는 터빈·발전기의 속도를 증가시키는 역할을 하게된다.

발전기 모델의 설정 화면으로, 다양한 파라미터를 입력할 수 있는 인터페이스를 보여줍니다. 오른쪽에는 발전기 및 캐패시터(CB)의 연결 다이어그램이 표시되어 있습니다.

<그림 4> 발전기 모델

$N$ ,  $\omega$ ,  $P_e$ ,  $\eta$ ,  $P_{th}$ ,  $P_{loss}$ ,  $I$  를 각각, 회전수, 계통주파수, 전력, 효율, 공급에너지, 손실, 회전관성이라 하고 이를 모델링하면 다음과 같다.

i) 계통에 연결된 경우

$$N = 30 \omega$$

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

ii) 계통에 연결되지 않은 경우

$$P_e = 0$$

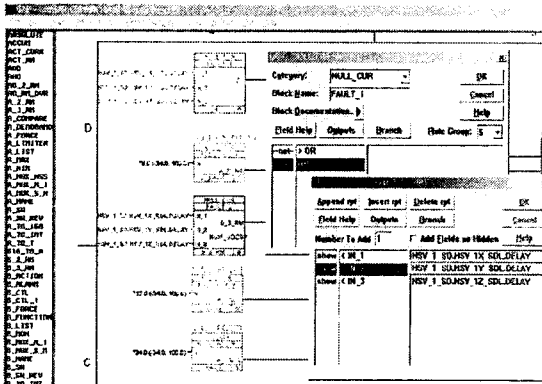
$$I \frac{dN^2}{dt} = (P_{th} - P_{loss})$$

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

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

### 2.4 제어 프로그램

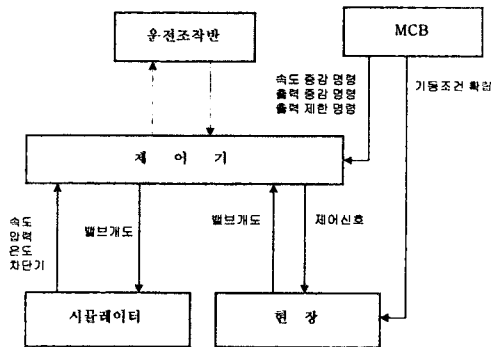
터빈 제어기의 하드웨어는 미국의 Woodward사에서 제작, 신뢰성이 입증되어 광범위하게 사용되고 있는 삼중화 제어시스템(TMR:Triple Modular Redundancy)으로서 하나의 시스템에 독립된 중앙처리장치가 세 개로 분리되어 병렬로 운전되고, 광범위한 자기진단 기능이 있으며, 단일 구성품의 고장으로 인한 파급확산을 방지하도록 구성였으며, 제어 프로그램을 구현하기 위해 사용한 소프트웨어 패키지는 동일 회사의 "GAP"으로서 현장 적용 사례가 다수 있다. 원전 터빈에 적용할 Arm, Bias Apply, 속도증감, 출력증감, 제어상수 조정, 과속도 비상 정지 등의 터빈제어 프로그램을 개발하고 이 프로그램의 건전성을 확인하기 위하여 시뮬레이터를 이용하였다.



<그림 5> 제어프로그램 예

### 2.5 부하차단 모의시험

부하차단 모의시험은 정격출력 운전중에 발전기의 차단기를 개방하여 부하를 탈락시킨 후 제어기가 동작을 개시하여 터빈·발전기의 속도를 110% 이내로 제한하여 과속도의 위험을 회피할 수 있는 능력을 증기발생이 없는 상태에서 모의시험하는 것으로서 다음의 회로와 같이 시스템을 구성한 후 실시하였다.



<그림 6> 부하차단 모의시험 회로 구성

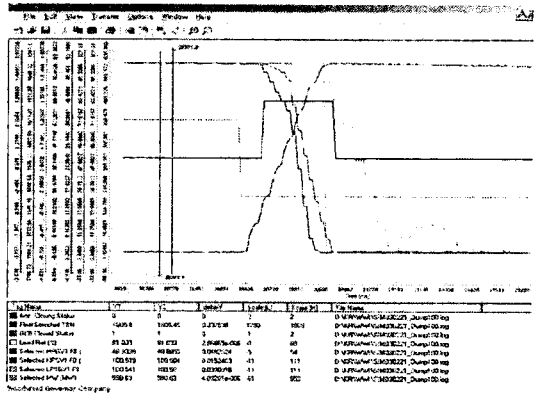
또한 다음의 절차에 따라 수행하였다.

1. 제어기의 설치가 완료되면 시뮬레이터와 제어기간 결선을 그림 6과 같이 수행한다.
2. 발전기 출력, 터빈 속도, 밸브개도 등에 대하여 기록계를 설치한다.
3. 시뮬레이터에서 계통병입을 수행하고 운전조작반에서 출력을 증발하여 발전기 출력 600MW를 유지한다.
4. 시뮬레이터에서 발전기 차단기를 개방하고 기록계에서 운전 변수의 변동을 관찰하고 프린터로 출력한다.

5. 최고속도를 산출하여 속도 변동율을 산출한다.
6. 부하차단 직후 밸브의 개도감소 시점을 계산하여 부동시간과 폐쇄시간을 산출한다.

### 2.6 부하차단 모의시험 결과

위의 절차에 따라 부하차단 모의시험을 실시한 결과 다음의 실시간 운전변수를 출력하였다. 600MW의 발전기 출력에서, HPGV 개도는 49%에서 차단기 접점을 개방한 결과를 아래 그림에서 보여주고 있다. 아래 그래프에서 x축의 한 칸은 약 40msec 정도의 간격이다.



<그림 7> 부하차단 모의시험 결과

위의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 터빈 속도변동 : 262msec만에 최고 1954rpm 도달
2. HPSV1 부동시간 : 약 70msec  
폐쇄시간 : 약 240msec
3. HPGV1 부동시간 : 약 60msec  
폐쇄시간 : 약 200msec
4. LP1GV1 부동시간 : 약 140msec  
폐쇄시간 : 약 360msec

### 3. 결 론

적용 대상 원자력 발전소의 운전 데이터를 취득하고 설계 자료를 확보한 후, 이를 기초로하여 실제 터빈의 동적모델을 결정하여 시뮬레이터를 완성하였다. 그리고 이를 활용하여 제어 프로그램을 개발한 후 제어기의 현장 적용에 앞서 수행한 부하차단 모의시험 결과는 상당히 양호한 상태를 보여주고 있다. 즉, 최고 상승속도는 1954rpm, 즉 108.6%로서 기준점인 과속도 비상정지 속도인 1980rpm, 즉 110%에는 약 1.4%의 여유가 있음을 확인하고 있다. 이후 중기를 터빈에 유입하여 현재 전부하 운전을 수행하고 있다.

#### [참고 문헌]

- [1] "터빈 DCS 검증용 시뮬레이터 개발" 전력연구원, 조병학 외 3명
- [2] "터빈 시뮬레이터 모델링" 전력연구원, 정장기 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
- [5] "원전터빈 디지털 제어시스템 개발" 전력연구원, 송성일 외 5명