

## 원자력 증기터빈 조속기 프로그램 개발 및 실증 적용

(Development and Actual Application of Governor Program to Nuclear Steam Turbine)

최인규\* · 김종안 · 박두용 · 우주희

(In-Kyu Choi · Jong-An Kim · Doo-Yong Park · Joo-Hee Woo)

### 요 약

이 논문은 발전소의 터빈 조속기가 장기사용으로 노후화되어 설비를 개선한 내용이다. 고리 원자력 제1호기에서 운전 중이던 기존의 아날로그 터빈 조속기를 철거하고 신규 개발한 디지털 조속기로 교체하는 과정과 동적 모사장치를 이용하여 현장 적용시험을 수행하였다. 이 결과를 토대로 원자력 증기터빈 조속기의 프로그램을 제안한 내용을 기술하고 있다.

### Abstract

This paper describes the up-grade of the turbine governor for steam turbine due to its poor operation from long time use. The analog type governor of the unit 1 in Kori nuclear power plant in Korea was removed and the new digital type turbine governor was developed and installed. The procedure for the actual application, site adaptability test using dynamic simulator and the result of actual operation are described here. And the program for nuclear steam turbine is suggested here.

Key Words : Governor, Steam Turbine, Nuclear Power Plant, Actual Operation

### 1. 서 론

원자력발전소를 구성하는 2차 계통의 핵심설비인 터빈의 안전하고 효율적인 운전을 위한 터빈 조속기는 발전소를 구성하는 3대 핵심 제어장치의 하나이다 [1]. 그런데, 국내 원자력발전소에서 운영중인 터빈 조

속기 설비는 장기 사용으로 노후화 되어 계속 운전할 경우 기동시간 지연으로 인한 경제적 손실이 대단히 큰 상태이다. 또한, 전자제어 기술과 소프트웨어 기술이 결합되어 있는 조속기의 경우 선진 외국의 기술이전이 전혀 없는 실정이다.

이는 선진국 형 고부가가치 기술이기 때문에 이 기술을 보유한 국가나 제조회사가 관련 기술의 이전을 기피하고 있기 때문이다. 따라서, 기술자립을 위한 터빈 조속기의 연구가 절실하다. 본 논문의 목표는 현장의 기존 조속기를 조사하여 이를 대체하기에 가장 적합한 범용의 상용 하드웨어를 선정하고, 주제어기와

\* 주저자 : 한전전력연구원 선임연구원  
Tel : 042-865-5644, Fax : 042-865-5609  
E-mail : cik@kepri.re.kr  
접수일자 : 2010년 1월 5일  
1차심사 : 2010년 1월 7일, 2차심사 : 2010년 1월 25일  
심사완료 : 2010년 2월 1일

현장 계측기기간 신호연계 및 운전원 조작을 고려하여 하드웨어를 제작한 후 터빈 기동/정지 및 정상운전을 수행할 수 있는 운전조작용 응용 프로그램 및 제어용 응용프로그램을 구현하여 적용대상 발전소에 실증 적용하는 것이다. 신뢰성 확보를 위하여 터빈 모의기를 활용하여 보다 정밀한 검증작업을 수행한 후, 실증 적용하였다. 기존의 조속기는 전자회로카드 47종 228개, 전원공급기 25대, 계전기 25종 498개 등 구성부품이 지나치게 많고 복잡한 아나로그 설비로서 연산증폭기, 트랜지스터 등으로 구성되어 있었다. 따라서, 교정에 많은 시간이 필요하며 정상운전 중 제어신호에 드리프트가 간헐적으로 발생하는 등 제어회로의 고장이 빈번하게 발생하였으며 다중화 미흡으로 단일 고장에 의한 출력 감소를 초래하였다.

## 2. 고리 원자력 제1호기 증기터빈

### 2.1 터빈 구성

터빈 조속기를 개발하여 실증 적용할 고리 원자력 발전소 제1호기는 그림 1과 같이 고압터빈 2대 및 저압터빈 4대가 단일 축상에 직렬로 연결되어 있다. 또한 고압터빈의 배기증기를 가열하여 과열도를 상승시키기 위한 습분분리 재열기가 2대 설치되어 있다[2].

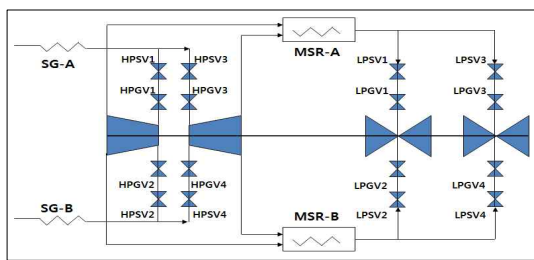


그림 1. 대상 발전소 증기흐름도  
Fig. 1. Steam Flow of the target power plant

증기밸브로는 비상 상황에서 고압터빈을 보호하기 위한 고압차단밸브(HPSV: High Pressure Stop Valve)가 4대, 정상 운전시에 고압증기의 유량 조절을 위한 고압조속밸브(HPGV: High Pressure Governor Valve)가 4대, 비상 상황에서 저압터빈 보호를 위한 저압차단밸브(LPSV: Low Pressure Stop Valve)가 4대, 정상 운전

시에 저압증기의 유량을 조절하기 위한 저압조속밸브(LPGV: Low Pressure Governor Valve)가 4대 장착되어 있다. 원자력 발전소는 효율보다는 안전을 중시하므로 증기의 조건, 즉 온도 및 압력이 매우 낮아서 기동전에 열이 불필요하며 기동은 주증기 차단밸브를 이용하고, 정격속도 도달시 주증기 조절밸브를 이용하여 계통병입을 위한 준비를 수행하고 발전기 출력을 조절한다.

### 2.2 터빈 조속기

증기터빈은 발전기를 구동하는 원동기이다. 이 원동기를 제어하는 터빈 제어기의 기본 기능은 터빈 기동시 회전속도를 조절하고 발전기가 전력계통에 병렬운전을 시작하면 발전기 출력을 제어하는 장치이다. 증기터빈과 조속기의 블록도를 그림 2에 나타내었다.

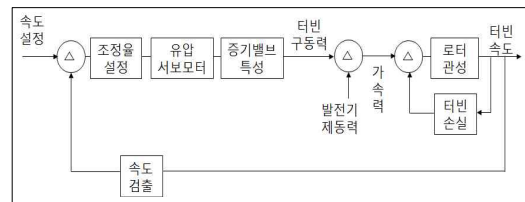


그림 2. 증기터빈 및 조속기 블록도  
Fig. 2. Block Diagram of turbine and governor

과거의 터빈 제어는 이러한 기본 기능을 수행하는데에 국한되었고 제어방식도 단순하였기 때문에 조속기(调速器)라고 하였다. 그러나, 최근에는 디지털 기술의 발달로 기본 기능 외에도 여러 가지 부가 기능을 구현할 수 있으며 터빈에 관련된 보조기기의 운전은 물론 다양한 감시 기능을 수행하고 운전정보를 제공하는 등 그 기능이 고도화되고 있으므로 조속기를 대신하여 터빈제어 시스템이라는 용어를 사용하는 추세이다[3].

## 3. 조속기 응용 프로그램 개발

조속기를 개발하여 실증적용하기 위하여 고리 원자력 제1호기의 현장 자료를 검토한 후 제어 알고리즘을 정립하고 응용 프로그램을 개발하였다.

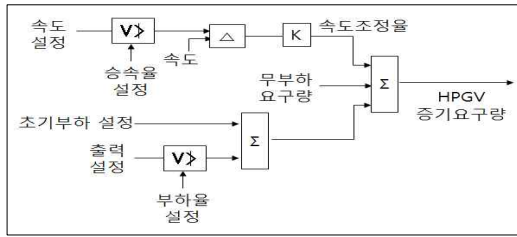


그림 3. 속도 및 출력 제어  
Fig. 3. Speed and Load Control

응용 프로그램을 구현하기 위해 사용한 소프트웨어 패키지는 상용의 편집기로서 현장 터빈에 적용할 속도 및 출력제어 등의 기존 터빈조속기의 기능을 100[%] 구현하였다. 그림 3은 개발된 제어회로의 블록도를 나타내고 있다. 주제어기로 사용한 하드웨어는 우드워드사의 제어기인 마이크로넷으로 삼중화 기술을 이용한 내고장성 제어장치이다.

### 3.1 속도 및 출력 제어 프로그램 개발

그림 3에 나타난 제어 블록도에서 속도목표값 설정치는 속도기준값(A)이 추종하는 최종 목표값이다. 승속율은 속도기준값이 속도목표값을 추종하기 위해 적용되는 증감율이다. 일반적으로 속도기준값은 속도목표값을 목표로 하여 승속율에 의해 변동되며 승속율은 운전상태에 적합하게 운전원이 설정한다. 속도조정율은 그림 3과 같이 속도편차에 대한 비례제어기의 이득을 역수로 하여 백분율로 나타낸 값으로서 7[%]로 설정하였다. 정상운전 상태에서 실제속도가 103[%]보다 큰 경우에 터빈이 과속도로 진입하는 것을 방지하기 위하여 속도조정율을 1[%], 즉 제어기 이득을 100으로 설정하여 증기조절밸브를 신속히 폐쇄함으로써 과속도를 제어한다. 부하율은 출력기준값(B)이 출력목표값에 추종하기 위해 적용되는 증감율로서 증기밸브의 개폐속도이며 출력기준값은 밸브개도의 기준이 되는 값이다.

### 3.2 증기밸브 제어 프로그램 개발

밸브개도 요구량이란 운전원이 터빈속도 및 부하증

감발을 위해 조정한 값을 고려하여 조속 기능을 가진 모든 증기밸브의 개도 제어의 기준이 되는 값이다. 구동부로는 서로 독립된 삼중 코일을 장착한 서보밸브를 사용하고 개도검출기는 3개를 장착하였다.

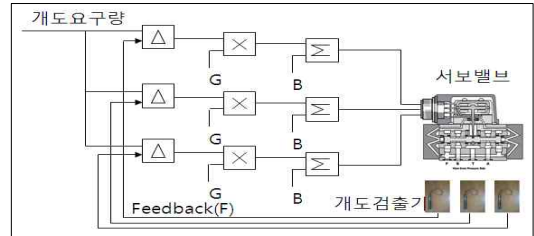


그림 4. 증기밸브 개도 제어  
Fig. 4. Position control of Steam Valve

삼중코일 서보밸브를 이용한 밸브 제어계통을 도식적으로 표현하면 그림 4와 같다. 제어 프로그램상 기준값은 1개이고 이것은 3개의 회로로 분기하여 서보밸브의 3개 코일로 각각 입력된다. 삼중화 중앙처리장치에서 각각의 서보밸브 코일에 전류를 발생시켜서 밸브 개도를 제어한다.

### 3.3 HPGV 증기유량 제어 프로그램 개발

고압조속밸브의 개도가 일정한 경우 주증기 압력과 발전기 출력은 정비례한다. 따라서, 발전기 출력을 제어하기 위해서는 증기유량을 제어해야 한다[4]. 고압조속밸브의 증기요구량을 HPGV SD라 하고 속도편차를  $\Delta F$  그리고 출력 설정치를 Load Ref.이라 하면 이들의 관계는 다음의 식으로 표현된다.

#### 가. 정상적인 속도제어

$$HPGV\ SD = \frac{100}{7} \Delta F + Load\ Ref. \quad (1)$$

#### 나. 과속도 제한

$$HPGV\ SD = \frac{100}{1} \Delta F + 356 \quad (2)$$

따라서, HPGV의 증기유량 요구량을 과속도에 대하

여 도시하면 그림 5와 같이 표현된다.

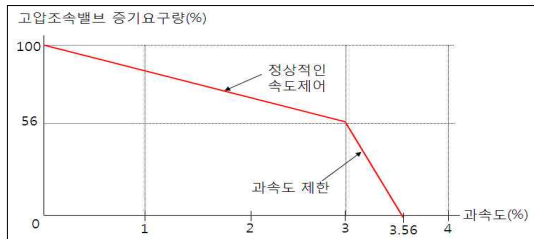


그림 5. 과속도와 HPGV 증기유량 요구량  
Fig. 5. Overspeed and Steam Demand of HPGV

## 4. 조속기 검증 및 현장 적용

### 4.1 현장 적응시험

적용 대상 원자력 발전소의 아날로그식 터빈 조속기를 철거하고 삼중화 디지털 조속기로 개조하기 위한 현장 설치를 완료한 다음, 현장 적응시험을 수행하였다. 이 시험은 증기 터빈을 구동하는 증기가 없는 상태에서 증기량 조절밸브를 포함한 전체 제어계의 건전성을 확인함으로써 신뢰성을 검증하기 한 것이다. 이 시험을 위하여 터빈의 열수력 모델이 포함된 시뮬레이터를 개발하여 이용하였다.

#### 4.1.1 제어 검증용 시뮬레이터

그림 6은 이 시뮬레이터의 증기 흐름을 개략적으로 도식화한 것이다. 시뮬레이터에는 피동체인 발전기와 원동기인 터빈의 열수력 입력 및 전기적 출력에 관한 수학적 모델이 포함되어 있다.

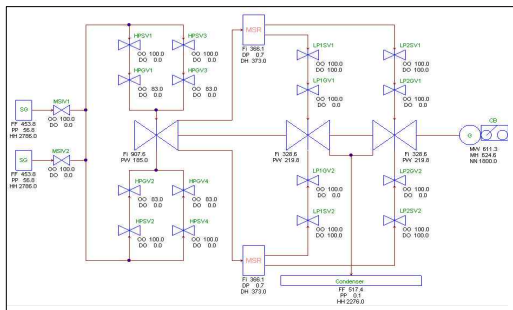


그림 6. 시뮬레이터 증기 흐름도  
Fig. 6. Steam Flow Diagram of the Simulator

또 터빈조속기에 탑재할 응용 프로그램의 현장 적응력과 하드웨어의 건전성을 확인하기 위한 장치로서 적용대상 원자력 발전소 터빈의 열역학적 모델을 포함하고 있다.

#### 4.1.2 현장 적응시험 구성

그림 7에 현장 적응시험시 실제 입출력 신호의 배치를 간략하게 나타내었다. 운전 조작반에서 발생하는 기동, 정지, 출력조절 등의 명령은 통신신호를 이용하여 제어기로 전달되고 제어기는 제어 프로그램을 수행하여 서보전류를 생산하여 현장의 증기밸브를 조절한다. 증기밸브의 개도는 제어기에 입력되고 다시 시뮬레이터에 전달된다. 시뮬레이터는 운전데이터를 근거로 이미 설정되어 있는 증기발생기의 증기조건, 터빈의 관성 및 손실 등을 밸브개도에 적용하여 연산하여 속도 및 발전기 출력을 발생시켜서 제어기에 전달한다.

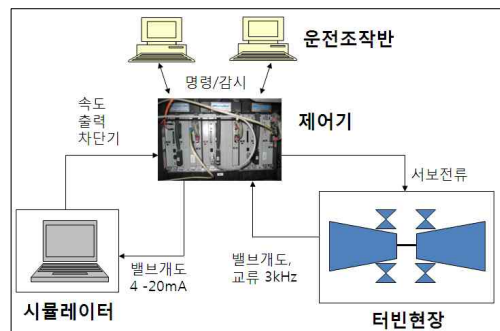


그림 7. 현장적응시험 구성도  
Fig. 7. Configuration of the Field Adaptability Test

### 4.2 현장 적응시험 결과

실제로는 증기가 없는 상태에서 각종 밸브를 제어하고 시뮬레이터에서 수학적으로 계산된 각종 운전값을 사용하여 현장적응시험을 수행하였다. 실제 발전 운전 중에 과도상태에 대한 시험은 수행할 경우 원자료가 과도상태로 되어 안전상의 문제가 발생할 수 있으므로 현장적응시험에 모든 항목을 반영하였다. 그림 8~11에서 현장적응 시험 결과를 나타내고 있으며 여기서 각각의 운전 변수에 대한 스케일은 다음의 표 1과 같다.

표 1. 제어변수 스케일(현장적응시험)  
Table 1. The Scales of Process Variables(Field Adaptability Test)

운전변수		스케일
명칭	약어	
터빈 속도	Speed	0~2,000[rpm]
속도 기준치	Speed Ref.	0~1,800[rpm]
속도 설정치	SPD TGT	0~1,800[rpm]
발전기 출력	[MW]	0~700[MW]
출력 기준치	Load ref.	-10~110[%]
출력 설정치	Load TGT	-10~110[%]
고압조속밸브 개도	HPGV1 FB	-10~110[%]
고압차단밸브 개도	HPSV1 FB	-10~110[%]
저압조속밸브 개도	LP1GV1 FB	-10~110[%]
충동실 압력	ICP	0~46[bar]

#### 4.2.1 터빈 승속

그림 8은 터빈이 기동 준비된 후 운전원이 적절한 승속율(5, 10, 30, 45분율)을 선택하고 원하는 속도 설정값을 선정하면 속도기준값이 증가하고 터빈 속도가 증가하여 승속이 이루어지는 결과를 보여주고 있다.

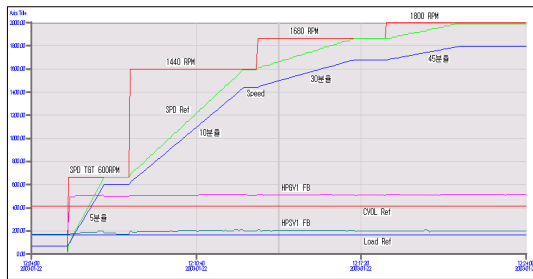


그림 8. 현장적응시험 결과(터빈 승속)  
Fig. 8. Result of the Field Adaptability Test (Speed Up)

그림 8에서 x축은 20분이다. HPSV의 개도는 약 2.25[%]에서 1,800[rpm]을 유지하면서 증기유량을 제어하고 있음을 보여주고 있다.

#### 4.2.2 초기부하 운전

그림 9는 발전기가 계통 병입된 후 전동기화를 방지하기 위한 초기부하 운전 관련 그래프이다.

정격속도에서 속도병합 운전 후 발전기를 계통에 병

입하면 초기부하를 형성하기 위해 출력기준값이 증가되고, 이에 따라 정해진 특성곡선에 의하여 각각의 증기밸브가 열리고 발전기 출력이 증가되고 있는 것을 알 수 있으며, 발전기가 전력계통에 구속되어 운전되고 있으므로 속도는 일정함을 알 수 있다. 그림 9에서 x축은 3분 20초이다.

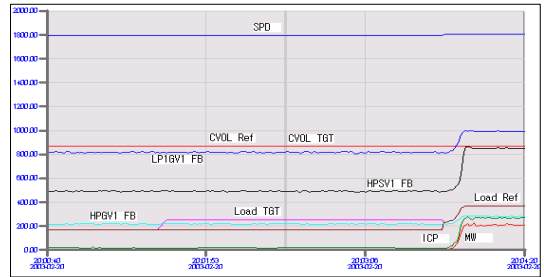


그림 9. 현장적응시험 결과(초기부하 운전)  
Fig. 9. Result of the Field Adaptability Test (Blocking Load Operation)

#### 4.2.3 출력 증발

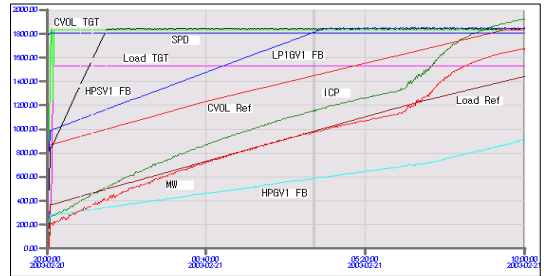


그림 10. 현장적응시험 결과(출력 증발 운전)  
Fig. 10. Result of the Field Adaptability Test (Load up Operation)

그림 10에서 발전기 출력을 증가시키기 위해 운전원이 부하 설정값을 약 80[%]로 설정하자 밸브열림제한 목표값이 수직으로 상승하고 출력기준값과 밸브열림 제한값이 각각 자동으로 추종하여 증가하고, 정해진 특성곡선에 의하여 HPGV가 열려서 충동실 압력과 발전기 출력이 증가하고 있다. 또한 HPSV와 LPGV도 열리고 있는데 이는 HPGV가 제어하고 있는 증기 유량이 HPSV와 LPGV에 의하여 제한되면 출력제어가 원활하지 못하기 때문이다. 밸브개도 열림기준 제한 값과 출력기준값은 증가율이 동일하며, 충동실 압력과

발전기 출력은 파형이 동일함을 알 수 있다. 그림 10의 x축은 10시간이다.

#### 4.2.4 과속도 제어 운전

그림 11은 터빈 속도가 103[%] 이상에서 속도조정을 7[%]에서 1[%]로 변화는 과속도제어 기능을 시험하기 위해 터빈 속도신호를 100[%]에서 104[%]까지 램프로 증가시킬 때 속도/부하 요구값이 100[%]에서 0[%]로 감소되는 것을 보여주는 결과이다. 그림 11을 분석하면 터빈속도가 증가되어 103[%]에 도달하자 속도/부하 요구값이 56[%]까지 감소하고 약 103.56 [%] 속도에서 밸브개도 기준값이 0[%]로 감소하여 제어 알고리즘과 잘 일치하고 있다. 계통병입 상태에서 속도상승을 가정하고 있으므로 속도기준값과 출력기준값은 일정함을 보여주고 있다. 그림 11에서 x축은 3분 9초이다.

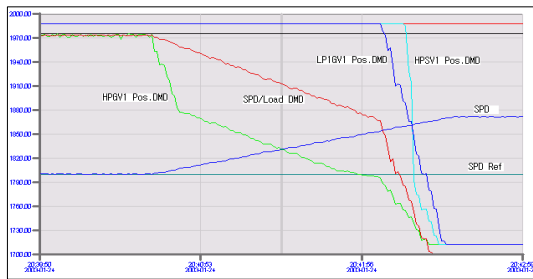


그림 11. 현장적응시험 결과(과속도제어 운전)  
Fig. 11. Result of the Field Adaptability Test (Overspeed Control Operation)

### 4.3 터빈 기동 및 운전

터빈 조속기를 개발, 제작 및 설치 완료 후, 기동전 모의시험을 수행하여 전체 조속기의 건전성을 확인한 후 최초 기동을 실시하였다. 적용대상 원자력 발전소의 기존 기동 순서를 반영하여 수행하였으며 증기유량이 극히 작은 상태에서 수행하므로 원자로 안전운전에 무관한 터빈 기동, 정격속도 도달, 발전기 계통병입, 출력 증발 등의 운전과정 및 밸브 시험 등의 시운전을 수행하였다. 그림 12에서 그림 14는 터빈 운전 결과를 나타내고 있으며 여기서 각각의 제어변수에 대한 스케일은 현장 적응시험의 경우와 동일하며 표 1에 나타낸 바와 같다.

#### 4.3.1 터빈 승속

그림 12는 터빈 승속에 관한 운전 그래프이다. 저속 회전 상태인 터빈에 증기를 공급하여 1,400[rpm], 1,700[rpm], 1,800[rpm]으로 단계적으로 승속하여 중요 운전 변수를 관찰한 후 이상이 없음을 확인하였으며 터빈속도 1,800[rpm], HPSV 개도 1[%]를 유지하였다. 현장적응시험에서는 1800[rpm]에서 HPSV의 개도는 약 2.25[%]를 유지하였으므로 약 1.25[%]의 오차가 발생하였다. 속도 목표값이 단위 계단으로 상승하고 뒤이어 정해진 승속율로 속도 기준값이 증가하고 이에 따라 정해진 곡선에 의거하여 HPGV와 LPGV는 빠르게 열리고 있다. 속도 편차가 발생함에 따라 이를 제어하기 위하여 HPSV와 HPGV 및 LPGV가 일제히 움직이고 있다.

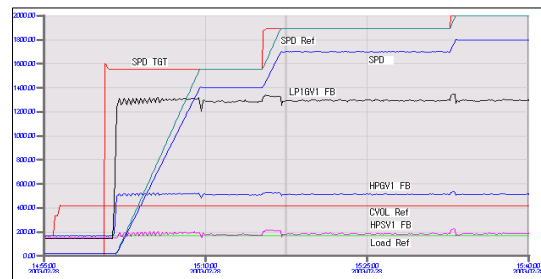


그림 12. 터빈 운전결과(터빈 승속)  
Fig. 12. Result of the Actual Operation (Turbine Speed Up)

또한, 승속 중에 1,400[rpm]을 유지하려 할 경우 밸브의 개도가 미세하게 감소하고 있는데 이것은 승속 중에 필요한 가속에너지는 더 이상 필요하지 않고 그 속도에서 손실에너지만 공급하고 있으므로 나타나는 현상이다. 1,400[rpm]에서 1,700[rpm]으로 가속을 시작하면 증기밸브가 빠르게 열리고 있는 결과를 보여주고 있다. 그림 12에서 x축은 45분이다.

#### 4.3.2 초기부하 운전

그림 13에서 터빈 속도가 1,800[rpm]을 유지하는 상태에서 유량제어 전환을 완료하였다.

이후 발전기 제어계통에서 수동으로 계통병입을 실시하자 출력기준값이 7[%]로 상승하고 HPSV, HPGV



및 LPGV가 특성곡선에 따라 열려 발전기 출력은 약 60[MW]를 유지하였다. 그림 13에서 x축은 2분이다.

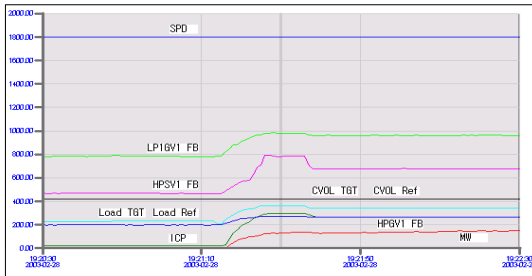


그림 13. 터빈 운전결과(초기부하 운전)  
Fig. 13. Result of the Actual Operation  
(Blocking Load Operation)

#### 4.3.3 출력 증발

그림 14에서 초기부하를 형성한 후 운전원이 설정한 부하율로 부하설정값을 75[%]까지 조절하자 약 1시간 후에 출력기준값은 7[%]에서 43[%]로 증가하고, 발전기 출력은 초기 60[MW]에서 350[MW]까지 증가하였다.

각 조절밸브는 특성곡선에 따라 열려서 출력기준값 20[%]에서 HPSV는 100[%] 열렸으며, LPGV는 58[%], HPGV는 8[%] 정도를 유지하였다. 그림 14에서 x축은 16시간이다.

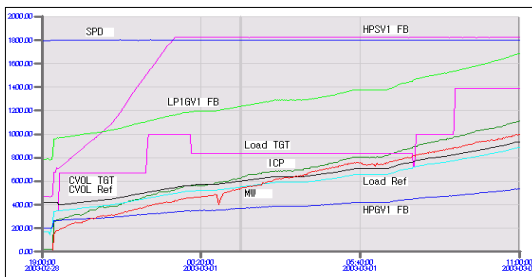


그림 14. 터빈 운전결과(출력 증발 운전)  
Fig. 14. Result of the Actual Operation  
(Load Increase)

## 5. 결 론

원자력 발전소의 핵심제어 설비중 하나인 증기터빈 조속기의 프로그램, 즉 터빈 속도제어, 발전기 출력제어, 과속도 제어, 과속도 보호 등의 프로그램을 개발하

였다. 이를 위하여 현장의 운전 자료와 설계 자료를 확보한 후, 터빈의 물성을 파악하여 열수력적 모델을 결정한 다음, 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이터를 이용하여 응용 프로그램의 건전성을 확인한 후 실제 운전을 수행하고 있다. 따라서 원자력 발전소 터빈 조속기에 프로그램에 관하여 선진 외국으로부터 기술을 도입하지 않고 국내 기술을 자립하였다.

## References

- (1) 송성일, 정창기, 김종안, 최인규, 우주희, “원전터빈 디지털 제어시스템 개발” 최종보고서, 전력연구원, pp.47-65, pp.94-144, 2003.
- (2) 한진, 고리원자력본부, “고리원자력 제1호기 터빈구동기 정비편람”, 1992.
- (3) 최인규 “600(MW) 원자력발전소 증기터빈 디지털제어시스템 개발”, pp.5-6, 충남대학교 석사학위논문, 2002년도.
- (4) 신상철 “보일러터빈제어”, pp. 288-290, 한국발전교육원, 2006년도.

## ◇ 저자소개 ◇



#### 최인규(崔仁圭)

1967년 1월 26일생. 1993년 전북대 전기공학과 졸업. 2004년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전전력연구원 선임연구원.



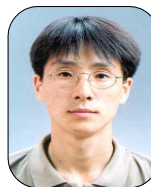
#### 김종안(金鍾安)

1957년 10월 3일생. 1985년 원광대학교 전자공학과 졸업. 현재 한전전력연구원 책임연구원.



#### 박두용(朴斗用)

1956년 3월 25일생. 1991년 한밭대 전기공학과 졸업. 현재 한전전력연구원 책임연구원.



#### 우주희(禹周希)

1970년 2월 24일생. 1993년 경북대 전자공학과 졸업. 1995년 동대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 한전전력연구원 선임연구원.