

터빈 밸브시험 중 충동실 압력제어에 의한 발전기 출력변동 최소화

논 문
59-1-28

The Minimization of Generator Output Variations by Impulse Chamber Pressure Control during Turbine Valve Test

최 인 규^{*} · 김 종 안^{*} · 박 두 용^{*} · 우 주 희^{**} · 신 재 호^{***}
(In-Kyu Choi · Jong-An Kim · Doo-yong Park · Joo-Hee Woo · Jae-Ho Shin)

Abstract - This paper describes the actual application of a feedback control loop as a means for minimizing turbine impulse chamber pressure variation during the turbine steam valve tests at a 1,000 MW nuclear power plant. The chamber pressure control loop was implemented in the new digital control system which was installed as a replacement for the old analog type control system. There has been about 40MW of the generator output change during the steam valve tests, especially the high pressure governing valve tests, because the old control system had not the impulse chamber pressure control so the operators had to compensate steam flow drop manually. The process of each valve test consists of a closing process and an reopening process and the operators can make sure that the valves are in their sound conditions by checking the valves movement. The control algorithm described in this paper contributed to keep the change in megawatt only to 6MW during the steam valve tests. Thereby, the disturbance to reactor control was reduced, and the overall plant control system's stability was greatly improved as well.

Key Words : Impulse Chamber Pressure Control, Governor Valve, Nuclear Turbine, Actual Application

1. 서 론

이 논문은 1,000MW 원자력 발전소 증기터빈 제어기를 기존의 아날로그 방식에서 최신의 디지털 방식으로 교체한 내용 중 고압터빈 압력제어 알고리즘의 구현에 대한 내용이다. 기존 아날로그 제어 시스템에 있어서 전부하 운전 중 증기밸브 시험시 고압 조속 밸브가 닫히는 과정에서 고압터빈에 유입되는 증기의 유량이 감소로 인하여 발전기 출력이 4% 정도 감소되는 현상이 있었다. 증기밸브 시험은 밸브를 닫는 과정과 여는 과정으로 구성된다. 고압조속밸브는 총 4대 설치되어 있으며 한 번에 한 대씩 시험한다. 시험 중에 하나의 밸브를 과정에서 발생하는 증기량 감소분은 나머지 3개의 밸브를 열어서 보상한다. 반대로 시험 밸브를 여는 과정에서는 3개의 밸브가 닫히는 방향으로 동작해야 한다. 밸브 시험중에 터빈 입구 증기유량이 감소되는 원인은 상기의 보상제어가 원만하게 이루어 지지 않았기 때문이다. 증기 밸브 시험 중에 출력감소 현상에 대처하는 방법으로 운전원이 발전기 출력의 감소를 확인한 후 증기 요구량을 증가시키는 수동보상 방법을 사용하였다. 운전 미숙으로 인한 원자로의 과도상태 발생을 우려하여 보상조작하지 않는 경우도 많았다. 그러나 밸브 시험 중에 발전기 출력이 감소하

는 현상은 아날로그 제어를 디지털 제어 시스템으로 개선함으로써 해결되었다. 특히 새롭게 추가된 기능이자 본 논문의 주제인 충동실 압력 제어 알고리즘을 채용하여 터빈 운전 중 밸브 시험을 수행하는 경우에 다른 밸브들의 개도를 제어하여 고압터빈의 압력을 제어함으로써 발전기 출력변동량을 기존의 4%에서 0.6%로 최소화하였다. 이에 따라 조속밸브 전단의 주증기 압력 변동과 증기발생기 수위변동이 최소화되어 원자로 안정성에 공헌하였다. 다른 발전소의 경우는 밸브 시험시 충동실 압력제어를 위하여 오직 비례제어를 채용하고 있어서 발전기 출력이 5%~9% 정도 변동하고 있다.[1] 따라서, 본 논문에서 제시한 알고리즘을 적용하면 다른 발전소 안정운전에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문은 충동실 압력제어를 원자력 발전소에 실증 적용한 내용으로 국내에서 처음으로 적용한 사례이며 보수적인 비례적분 제어기 만으로도 밸브 시험시 충동실 압력제어를 통하여 발전기 출력의 변동을 최소화할 수 있음을 입증하였다.

2. 고압 터빈 구성

2.1. 원자력 발전소 구성

그림 1은 1,000MW 원자력 발전소의 구성도이다. 원자로를 통한 냉각재를 1차 계통, 터빈을 통과하는 급수를 2차 계통이라 하며 1차와 2차 계통은 증기 발생기의 튜브다발을 경계로 엄격하게 구분되며 1차 측은 원자로, 증기발생기, 가압기, 냉각재 펌프로 구성되고 2차 측은 터빈, 발전기, 복수기로 구성된다.

핵분열이 이루어지는 원자로에 설치된 제어봉은 중성자를

^{*} 교신저자, 정회원 : 한진전력연구원 선임연구원

E-mail : cik@kepri.re.kr

^{*} 정 회원 : 한진전력연구원 책임연구원

^{**} 정 회원 : 한진전력연구원 선임연구원

^{***} 정 회원 : 엔텍코아 선임연구원

접수일자 : 2009년 7월 3일

최종완료 : 2009년 10월 8일

잘 흡수하는 물질이고 제어봉이 원자로에 인출되면서 중성자 활동이 활발해져 핵분열이 발생하여 열에너지를 발생시킨다. 발생된 열에너지는 원자로 내부를 통과하는 냉각재에 열을 전달한다.

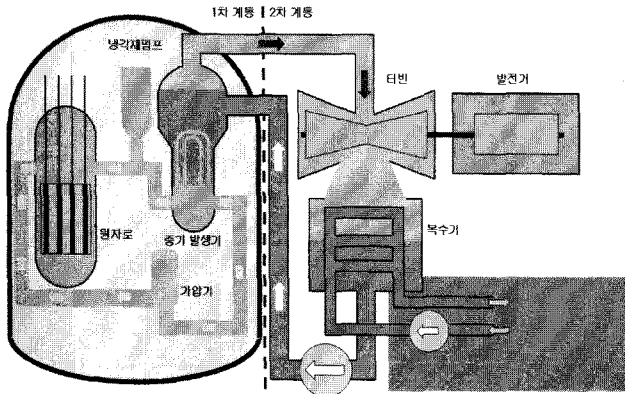


그림 1 원자력 발전소 구성도
Fig. 1 Configuration of Nuclear Power Plant

냉각재펌프는 원자로에서 발생된 핵분열에너지로 가열된 냉각재를 증기발생기로 보내 2차 측 급수계통에 열을 전달시킨다. 증기발생기에서 열을 전달시키고 냉각된 냉각재를 다시 원자로로 이송시켜 재순환되게 한다. 증기발생기는 가열된 냉각재를 증기발생기 튜브 다발로 통과시키면서 튜브 외측의 2차 측에 열을 전달한다. 열을 전달받은 2차 측 급수는 증기가 되어 터빈을 회전시킨다.

2.2. 터빈 구성

그림 2는 1,000MW 원자력 발전소의 증기 터빈 구성도이다. 고압터빈 1대와 저압터빈 3대가 동일 축에 직렬로 연결되어 있고 고압터빈의 배기증기의 과열도를 상승시키기 위한 습분분리 재열기가 2대 설치되어 있다.

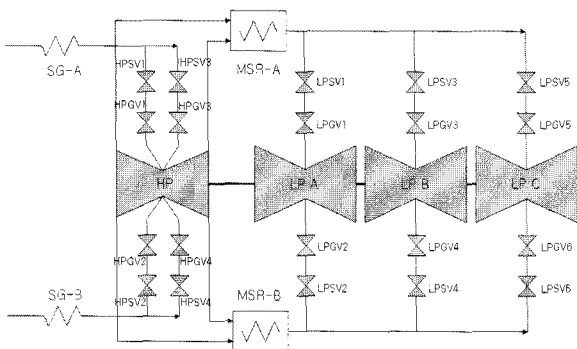


그림 2 터빈 증기 흐름도
Fig. 2 Steam Flow Diagram of Turbine

증기밸브로는 고압터빈 보호를 위한 고압차단밸브(HPSV:High Pressure Stop Valve)가 4대, 고압증기의 유량

조절을 위한 고압조속밸브(HPGV:High Pressure Governor Valve)가 4대, 저압터빈 보호를 위한 저압차단밸브(LPSV:Low Pressure Stop Valve)가 6대, 저압증기 조절을 위한 저압조속밸브(LPGV:Low Pressure Governor Valve)가 6대 장착되어 있다[2]. 이 발전소는 고압차단밸브로 기동하여 정격속도에 도달한 후 고압조속밸브로 계통 병입과 발전기 출력 조절을 수행한다.

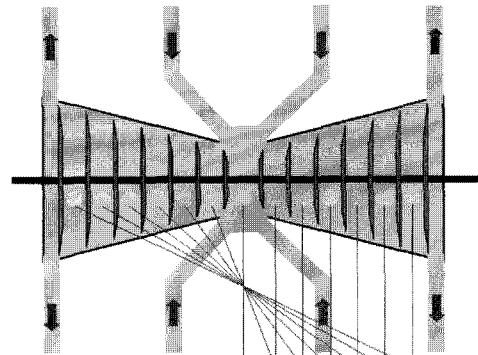


그림 3 고압터빈 구성도
Fig. 3 High Pressure Turbine

그림 3과 같이 고압터빈에 유입되는 증기가 1단에서 7단까지 팽창하는 과정에서 터빈이 회전하며 각 단의 압력은 발전기 출력과 비례하므로 발전기 출력을 제어하기 위해서는 고압터빈의 압력을 제어하면 된다. 제어에 사용되는 고압터빈의 압력은 발전소의 특성이나 제작사의 터빈 설계 특성에 따라서 다르며 일반적으로 1단 압력, 즉 충동실 압력을 많이 사용한다.

3. 충동실 압력제어 알고리즘 구현

3.1 증기 유량과 충동실 압력 및 발전기 출력

운전원이 부하설정값을 증가시키면 증기 고압조속밸브의 개도는 증가하나 발전기가 전력계통에 전자적으로 구속되어 있으므로 실제 속도의 증가는 감지할 수 없을 정도로 작다. 고압조속밸브의 개도 증가로 증기유량이 증가하면 터빈의 회전력이 증가하며 이는 발전기 출력 증가로 나타난다. 여기서, 고압 조속 밸브의 개도가 일정할 경우 주증기 압력, 주증기 유량 및 발전기 출력 관계를 살펴보면 Q를 유량, C_v를 용량계수, f(x)를 밸브 개도, ΔP를 밸브 입·출구 차압이라 하면 유량과 압력의 관계는 식 (1)과 같다.

$$Q = C_v f(x) \sqrt{\Delta P} \tag{1}$$

엔탈피는 온도와 압력을 알면 증기표로부터 알 수 있고, 정상 운전시 증기발생기 출구 온도와 압력은 제어시스템에 의하여 거의 일정하게 유지되므로 엔탈피도 일정하다. 따라서 유량만 알면 터빈에 전달된 에너지를 구할 수 있다.

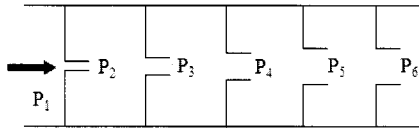


그림 4 노즐
Fig. 4 Nozzle

그림 4와 같이 터빈은 노즐의 연속으로 생각할 수 있고 과열증기는 이상기체의 상태방정식을 적용하여 노즐 내부의 증기의 분출속도를 구할 수 있다. 또, 압력비가 일정한 경우 증기에 관한 열역학적 법칙과 식 (1)을 고려하고, 또 증기의 온도, 터빈 주증기 제어 밸브 개도, 복수기 진공도가 일정 하면 터빈의 유입 증기량은 식 (2)와 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$Q = \text{Constant} \cdot P_1 \quad (2)$$

또, 언급한 바와 같이 터빈은 노즐의 연속으로 볼 수 있고 각 노즐 사이의 압력비는 일정하므로 증기의 온도가 일정한 경우, 첫째 단에서 압력이 결정되면 각 단에서의 압력은 정해진다. 그림 4는 각 단의 압력분포이고, 이를 더욱 확장하면 재열기 관로의 압력 분포 및 중압터빈 내부, 저압터빈 내부도 동일한 해석을 적용할 수 있다. 결국, 증기유량과 발전기 출력은 열에너지 입력과 전기출력의 관계로서 열소비율을 고려하면 정비례의 관계(발전기출력 = 증기유량×열소비율)이므로 주증기 압력과 발전기 출력도 정비례의 관계를 나타낸다.

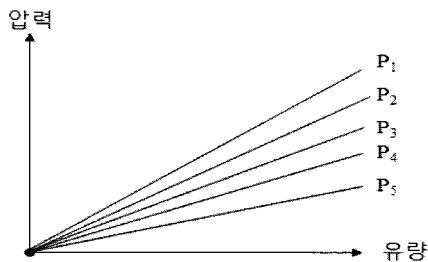


그림 5 터빈 각 단의 압력과 유량
Fig. 5 Pressure and Flow at Each Stage

또, 고압조속밸브의 개도가 일정한 경우 주증기 압력은 터빈 제1단 압력, 즉 충동실 압력에 정비례한다. 터빈 각 단의 압력은 그림 5와 같이 값은 달라도 정비례하는 값을 가진다. 또한, 재열기 압력도 터빈 각 단의 압력과 정비례하며 이는 중압터빈 및 저압터빈의 압력과 정비례한다. 그런데, 주증기 압력과 발전기 출력이 정비례하므로 모든 터빈의 각 단의 압력은 발전기 출력과 정비례한다[3]. 다만 차이점은 고압조속밸브 개도가 변경된 경우 발전기 출력에의 영향은 충동실 압력 변동이 가장 신속하다. 따라서 발전기 출력을 제어하기 위해서는 충동실 압력(ICP: Impulse Chamber Pressure)을 제어하는 것이 가장 신속하다.

3.2 기존 시스템 제어 특성

밸브 시험은 단합시험과 열람시험으로 구분되며 운전원에 의한 수동보상이 이루어지는 고압 조속 밸브를 닫은 후에 고압 정지 밸브를 닫는 것이 단합시험이다. 이와 반대로 고압 정지 밸브를 개방한 후에 운전원에 의한 수동보상이 이루어지는 고압 조속 밸브가 열리는 것이 열람시험이다. 그림 6에 기존의 밸브시험 블록도를 나타내었다.

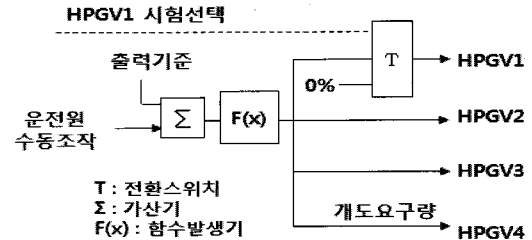


그림 6 기존 밸브시험 블록도
Fig. 6 Block Diagram for Valve Test at Old System

그림 7에 기존 제어 시스템의 고압조속밸브 시험 결과를 나타내었다. 그림 7에서 Y축의 발전기 출력은 0%에서 100%는 0에서 1,000MW에 해당되며 시간 축은 184초이다. 그림 7은 분석해 보면 발전기 출력 1006MW 운전 상태에서 시험대상인 고압조속밸브가 닫히면서 1단 압력이 감소되고 발전기 출력이 감발되기 시작하여 시험밸브가 완전히 닫힌 시점에는 발전기 출력이 966MW까지 감소된다. 닫힌 고압조속밸브를 복귀하는 경우에는 고압조속밸브가 열리면서 충동실 압력이 상승하고 발전기 출력이 증가하기 시작하여 밸브가 완전히 열린 시점에는 1006MW로 복귀된다. 즉, 고압조속밸브의 시험에는 4%, 즉 40MW의 출력이 변동되었다.

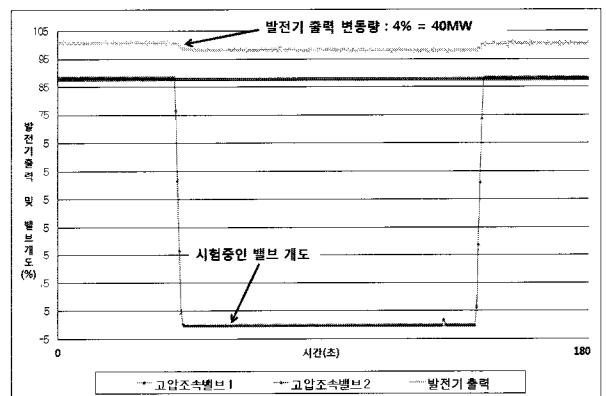


그림 7 기존 시스템 고압조속밸브 시험과 발전기 출력
Fig. 7 HPGV Test and MW at Old System

기존의 밸브 시험에 대한 단점은 고압 조속 밸브시험의 경우에 발전기 출력을 일정하게 유지할 수 없고 증기발생기 수위 변동은 1차 측, 즉 원자로 제어계의 외란으로 작용한다는 점이다. 신규 디지털 제어 시스템에서는 이러한 문제점이 거의 완전히 해결되었다.

3.3 제어 알고리즘 구현

디지털 제어 시스템의 기능이 개선되는 부분은 단협 시험과 열립 시험을 자동으로 수행되도록 알고리즘을 구현한 것이다. 발전기 출력의 변동에 대한 대책으로는 고압 조속 밸브를 시험하는 경우에 충동실 압력을 일정하게 제어하도록 알고리즘을 구현하였다. 이것은 식 (2) 및 그림 5에 나타낸 바와 같이 발전기 출력과 충동실 압력이 정비례 관계인 것을 이용한 것이다.

그림 8은 이 알고리즘을 간략하게 블록화한 것으로서 전형적인 비례적분 제어기이다. 그림 8에서 점선은 디지털 신호를 나타내고 실선은 아날로그 신호를 나타내고 있다. HPGV1 시험 선택 버튼을 누르기 전에는 현장에서 입력되는 충동실 압력이 감산기의 궤환신호로 입력되고 동시에 전환스위치를 통과하므로 충동실 압력 설정으로 작용하여 제어기의 입력은 0(零)으로 되므로 출력도 0(零)이다.

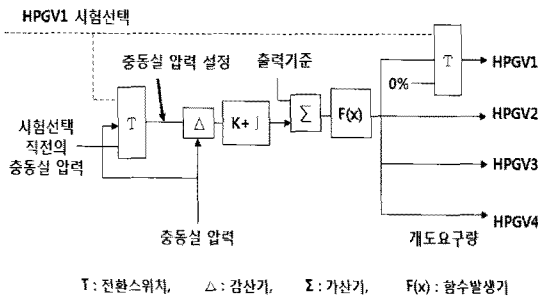


그림 8 제안된 충동실 압력제어 블록도
Fig. 8 Proposed Block Diagram for ICP Control

HPGV1, 2, 3, 4의 개도는 출력기준값에 의해 동일한 값으로 결정된다. 이 상태에서 전부하 운전 중이라면 출력기준은 100%로 되고 함수발생기를 고려하여 각각의 개도요구량으로 분기된다. HPGV1 시험선택 버튼을 누르면 HPGV1의 개도요구량은 0%로 전환되므로 개도 감소에 따라 충동실 압력이 감소하고 동시에 전환 스위치의 출력, 즉 충동실 압력 설정치는 충동실 압력에서 A(시험선택 직전 충동실 압력)로 전환되어 유지된다. 이 값이 현재의 충동실 압력과 비교되어 비례적분 제어기에 의한 보상동작이 발생되어 다른 HPGV2, 3, 4로 입력되어 기설정된 출력기준값을 보상하게 된다. 즉, 시험 대상인 밸브가 닫히거나 열리면서 변동되는 충동실 압력을 일정하게 유지할 수 있도록 시험하고 있지 않은 다른 밸브의 개도요구량이 증감하여 나머지 밸브를 제어하게 된다.

4. 현장 적용을 위한 모의시험

4.1 개요

아날로그 방식 터빈 제어기를 디지털 제어시스템으로 개조하기 위한 현장 설치 공사가 완료된 후, 충동실 압력 제어 알고리즘 기능을 검증하기 위하여 현장 적용을 위한 모의시험을 실시하였다. 이 시험은 실제로는 증기가 없고 제어기가 현장의 밸브를 제어하고 있는 상태에서 충동실 압력 제어 알고리즘의 건전성을 시험하고 적정 초기 제어 파라미터를 선정하기 위한 것으로서 선행 연구에서 활용한 시뮬레이터를 활용하였다.[4]

4.2 시뮬레이터

시뮬레이터는 터빈 디지털 제어시스템에 탑재할 응용 프로그램의 현장 적용력과 하드웨어의 건전성을 확인하기 위한 장치로서 현재 운전되고 있는 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. 증기 에너지가 터빈으로 유입되어 터빈 속도와 발전기 출력으로 전환되는 과정을 열역학적 에너지 방정식을 적용하여 프로그램 하였다. 일정한 압력이 주어지면 밸브의 개도에 따라 증기 유량이 결정되고 터빈에서 발생하는 에너지를 산출하였으며 이는 현장에서 운전되는 실제 데이터를 취득하여 참고하였다. 현장에서 증기발생이 없는 상태에서 시뮬레이터가 속도 및 출력을 발생하고 이에 따라 제어기가 밸브 개도를 조절할 수 있도록 밸브개도 신호를 직접 시뮬레이터에 연결하였다.

4.3 밸브 모델

파이프를 통과하는 증기의 질량유량을 제어하기 위하여 밸브를 이용한다. 밸브 입출구 압력 강하($p_i - p_o$)와 질량 유량 F 는 다음의 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = Kz(y)\sqrt{(p_i - p_o)} \tag{3}$$

여기서, p_i 는 입구압력, p_o 는 출구압력, K 는 밸브 어드미턴스를 나타낸다. 그리고 $z(y)$ 는 밸브 개도 y 의 함수로서 대상 발전소의 운전 데이터로부터 계산된다. 열수력 원리에 의하여 교축과정에서 엔탈피의 변동은 없는 것으로 가정하였다.

4.4 터빈 모델

증기발생기에서 생산된 고온 고압의 증기는 터빈을 통과하면서 각 단에서 팽창하여 속도가 상승한다. 터빈 노즐에서 증기의 압력이 강하하므로 질량 유량이 제한된다. 증기 터빈의 질량 유량과 압력 강하의 관계는 1927년에 Stodola가 개발하였다.[5] 각 단에서 압력강하와 질량 유량의 관계는 다음의 식 (4)와 같이 Stodola 방정식으로 표현된다.

$$F = K\sqrt{p_i \frac{(p_i^2 - p_o^2)}{p_i}} \tag{4}$$

여기서 F , K , p_i , p_o 는 각각 질량 유량, 어드미턴스, 입구 증기밀도, 입구 증기압력 그리고 출구 증기압력을 나타낸다. 어드미턴스 K 는 운전 데이터로부터 계산되었다. h_o 를 출구 엔탈피, h_i 를 입구엔탈피라 할 때 각 단의 출구에서 엔탈피는 이상기체의 열역학 관계에서 다음의 식 (5)와 같이 표현된다.

$$h_o - h_i = \eta_T(h_{os} - h_i) \tag{5}$$

여기서

$$h_o - h_i = -\frac{\gamma}{\gamma - 1} p_i v_i \left[1 - \left(\frac{p_o}{p_i} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] \quad (6)$$

단, η_T 는 터빈 효율, v 는 비체적, γ 는 비열비이다. 그리고 h_{os} 는 단일 과정의 출구 엔탈피로서 식 (6)에 제시된 바와 같이 이상기체의 상태방정식을 사용하여 유도할 수 있다. 증기로부터 터빈 각 단의 회전자에 전달되는 열량 P_{th} 는 다음의 식 (7)과 같이 표현된다.

$$P_{th} = F(h_i - h_o) \quad (7)$$

따라서, 발전기 출력은 효율 η 를 고려하여 다음의 식 (8)과 같이 표현된다.

$$P_{electric} = \eta P \quad (8)$$

4.5 시뮬레이터를 이용한 모의시험

현장 적용시험 구성도는 그림 9는 같으며 운전원에 의한 조작 명령이 발생되면 모든 조절밸브는 제어기 명령에 의해서 개폐되고 모든 밸브 개도는 터빈속도와 발전기의 출력을 발생하기 위해 제어기를 경유하여 시뮬레이터에 입력된다. 시뮬레이터는 개도 변동에 의해서 터빈속도와 발전기의 출력을 연산하며, 터빈속도와 발전기의 출력 신호는 제어기에 전달되어 제어기는 설정값에 따라 조절밸브를 제어한다.

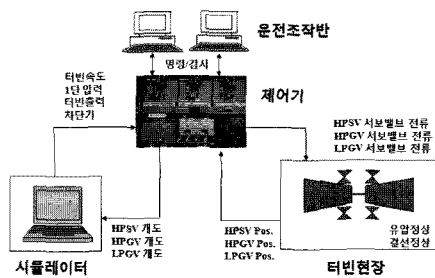


그림 9 모의시험 구성도
Fig. 9 Configuration of Simulation

그림 10과 그림 11에 발전기 출력 98%에서 증동실 압력 제어 알고리즘의 기능을 확인하기 위해서 밸브 시험을 수행한 결과를 나타내었다.

그림 10은 증동실 압력 제어에 의한 보상이 없는 시험으로 발전기의 출력이 983MW에서 시험 대상인 고압조속밸브가 닫히면서 증동실 압력은 감소하고 발전기 출력이 감소되기 시작하여 시험밸브가 완전히 닫힌 시점에는 발전기의 출력이 793MW까지 감발된다. 다음은 닫힌 고압조속밸브를 복귀하는 과정으로 고압조속밸브가 열리면서 증동실 압력이 상승하고 발전기 출력이 증가되기 시작하여 밸브가 완전히 열린 시점에는 밸브가 닫히기 전의 발전기 출력인 983MW로 복귀된다.

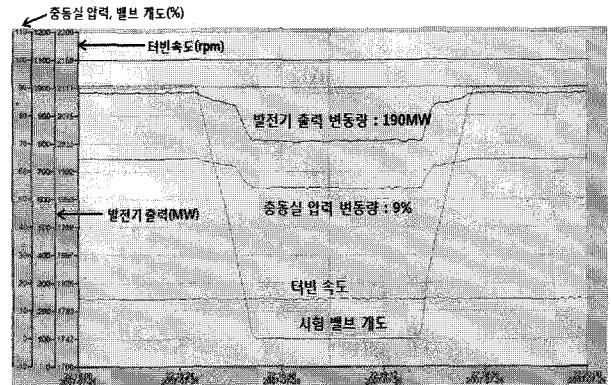


그림 10 모의시험(증동실 압력보상 없음)
Fig. 10 Simulation Test without ICP Compensation

고압조속밸브의 시험에는 190MW정도의 출력이 변동된다. 이것은 시뮬레이터 특성상 초기 설정된 주증기 압력이 일정하게 유지되므로 출력변동이 심하게 나타나는 것이다. 실제 발전소의 경우에는 고압조속밸브를 닫는 경우 주증기 압력이 상승되어 열려있는 다른 밸브 전 후의 차압이 증가하므로 출력 감소량은 40MW로 매우 작다.

그림 11은 증동실 압력 제어에 의한 보상이 있는 시험이다. 발전기 출력 약 847MW에서 고압 정지 및 조속 밸브 시험을 수행하는 과정을 나타내고 있다. 고압조속밸브가 닫히면서 증동실 압력이 감소하고 발전기 출력이 감소되는 듯하나 증동실 압력 제어에 의한 보상 값이 증가하여 나머지 고압조속밸브의 개도를 증가시켜서 증동실 압력이 회복되고 있으나, 50MW의 출력이 변동되고 있다.

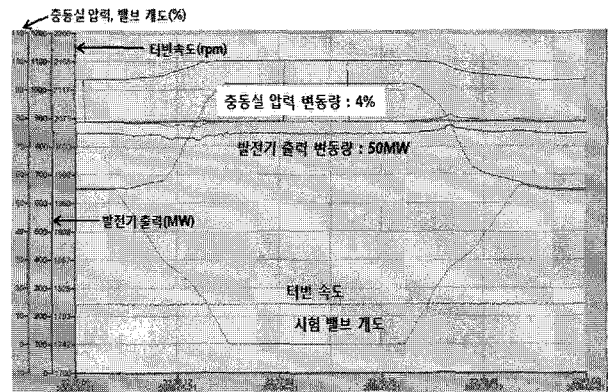


그림 11 모의시험(증동실 압력보상 있음)
Fig. 11 Simulation Test with ICP Compensation

이후 닫힌 고압조속 밸브를 복귀하는 과정에서는 고압조속밸브가 열리면서 증동실 압력이 높아지고 발전기의 출력이 증가되는 듯 하나 증동실 압력 제어에 의한 보상 값이 감소하여 나머지 고압조속밸브의 개도를 감소시켜서 발전기 출력을 유지한다. 페루프 응답특성에 기초를 두고 제어상수를 조정하는 방법에는 한계감도법, 1/4 감쇠법, 고교(高橋)법, Ziegler-Nichols법 등 여러 가지가 있다.[6] 이러한 방법은 계단입력을 인가하거나 진동을 유발하는 등 운전 중인 원자력발전소에 적용하면 대단히 큰 외란으로 원자료가 불

안정하게 되고 출력감발 등 경제적 손실이 예상된다. 따라서, 본 현장 적용시험에서 제시하는 것과 같이 발전소 정지 중에 시뮬레이터를 이용한 현장 적용시험 과정을 통하여 초기 제어상수를 결정하는 방법은 매우 유용하다. 즉, 초기 제어상수는 위와 같은 방법으로 결정하여 플랜트를 기동하고 점차 운전을 수행하면서 시행착오(Trial and Error)법에 의하여 최적의 상수를 찾아서 설정하면 운전 중인 발전소의 제어계에 큰 외란을 발생하지 않음은 물론 경제적 손실도 없이 제어시스템을 교체할 수 있다.[7] 본 논문에서 제안한 현장 적용 시험으로 초기 제어상수를 결정한 후 원자력 발전소에 실증 적용하여 성공적으로 운전되고 있으므로 이에 대한 타당성이 입증되었으며 시뮬레이터를 이용하여 여러 차례 시험한 결과 비레이득을 0.15, 적분이득을 0.1로 결정하였다. 현장 적용 시험 결과 증동실 압력 제어 알고리즘의 건전성이 검증되었으므로 다음 단계는 실제 운전을 수행하여 성능을 확인하는 것이다.

5. 현장 적용 및 평가

5.1 시운전을 통한 최적 제어상수 설정

터빈 발전기를 기동하여 계통 병입을 완료한 후, 출력을 증발하여 원자로 출력 98%에서 실질적인 증동실 압력 제어 알고리즘의 기능을 확인하였다. 이를 위하여 밸브 시험과 증동실 압력 제어 파라미터의 튜닝을 병행하였다. 제어 이득을 교과서적인 방법으로 튜닝할 경우 과도현상이 유발될 가능성이 있으므로 시행착오법을 적용하였으며 이 결과를 그림 12, 그림 13, 및 그림 14에 나타내었다.

그림 12는 시운전의 고압조속밸브 1차 시험으로 발전기의 출력 약 970MW에서 고압 정지 및 조속 밸브 시험을 수행하는 과정 중 고압조속밸브가 닫히면서 증동실 압력이 낮아지고 발전기 출력이 감발되는 듯 하나 증동실 압력 제어에 의한 보상 값이 나머지 밸브의 개도를 보상하면서 증동실 압력이 거의 일정하게 유지되고 있다.

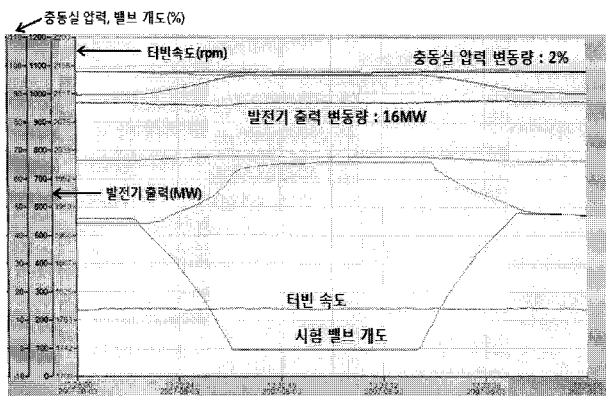


그림 12 1차 실증 시험
Fig. 12 1st Actual Test

이 후 닫힌 고압조속밸브를 복귀하는 과정에서는 고압조속밸브가 열리면서 증동실 압력이 높아지고 발전기 출력이

증발되는 듯 하나 증동실 압력 제어에 의한 보상 값이 감소하여 나머지 밸브의 개도를 닫히도록 제어함으로서 증동실 압력은 거의 일정하게 유지되고 있다. 밸브시험 과정에서 발전기 출력변동량은 약 16MW 정도이다.

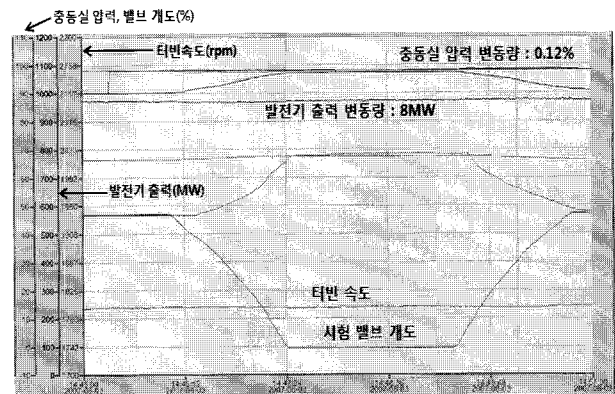


그림 13 2차 실증 시험
Fig. 13 2nd Actual Test

그림 13은 시운전의 고압조속밸브 2차 시험으로 발전기 출력 약 970MW에서 고압 정지 및 조속 밸브 시험을 수행하였으며 시험과정에서 발전기의 출력변동량은 약 8MW 정도이다.

그림 14는 시운전의 고압조속밸브 3차 시험으로 발전기 출력 약 970MW에서 고압 정지 및 조속 밸브 시험을 수행하였으며 시험과정에서 발전기의 출력변동량은 약 6MW 정도이다.

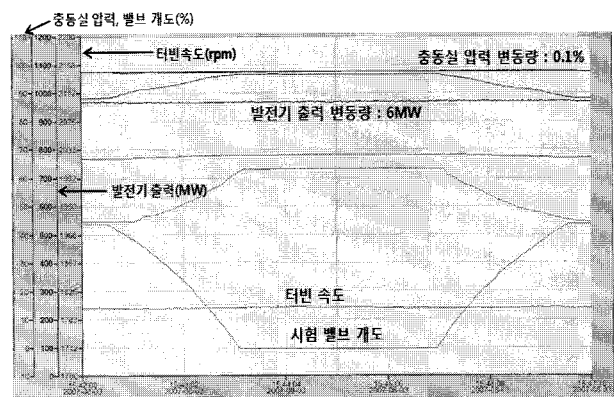


그림 14 3차 실증 시험
Fig. 14 3rd Actual Test

결론적으로 시뮬레이터를 이용한 현장 적용시험을 통하여 도출한 최초의 제어 파라미터를 적용한 후 실제 운전 상황에서는 시행착오법에 의하여 제어 파라미터를 변경하면서 시험한 결과 발전기 출력변동량은 매우 미소하였다. 시험결과를 정리하면 다음의 표 1과 같다.

표 1 제어기 파라미터와 출력 변동량

Table 1 Control Parameter and MW Change

	비레이득	적분이득	출력변동량
1차 시험	0.15	0.1	1.6% = 16MW
2차 시험	0.2	0.2	0.8% = 8MW
3차 시험	0.3	0.4	0.6% = 6MW

5.2 시운전 결과 평가

충동실 압력제어 알고리즘을 원자력발전소에 실제 적용하고 터빈 발전기를 기동하여 계통 병입을 완료한 후, 출력을 증발하여 원자로 출력 98%에서 실질적인 충동실 압력 제어 알고리즘의 기능을 확인하였다. 그림 15는 충동실 압력제어를 적용하지 않은 기존 시스템의 시험 운전 파형이다. 그림 16은 충동실 압력제어 알고리즘을 적용하여 밸브 시험을 수행한 경우 1차 계통의 원자로 온도와 증기발생기 수위 그리고 2차 계통의 충동실 압력과 발전기 출력의 변동을 나타내고 있다. 그림 15와 그림 16의 스케일은 표 2에 정리하였으며 시간 축은 184초이다.

표 2 그림 15와 그림 16의 변수에 대한 스케일

Table 2 Scale for Variables on Fig. 15 and Fig. 16

	스케일		시간 축
	y축	물리량	
증기발생기 수위	0~100%	0~14.2m	184초
고압조속밸브 1 개도	0~100%	0~170.5mm	
고압조속밸브 2 개도	0~100%	0~170.5mm	
발전기 출력	0~100%	0~1,000MW	
충동실 압력	0~100%	0~62.1bar	
원자로 온도	0~100%	277~332℃	

그림 15에서는 고압조속밸브 2를 닫는 경우여 충동실 압력제어 알고리즘이 없으므로 보상하는 밸브가 없으므로 중요 운전 변수의 변동량이 매우 큼을 알 수 있다.

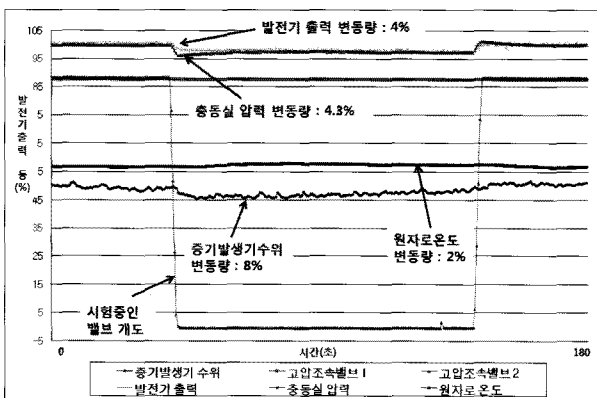


그림 15 기존 시스템 고압조속밸브 시험 운전

Fig. 15 HPGV Test at Old System

그러나, 충동실 압력제어 알고리즘을 적용한 그림 16의 경우는 동일한 시험에 대하여 고압조속밸브 1이 열리므로 1차 계통의 중요 운전변수인 원자로 온도와 증기 발생기 수위의 변동량이 크게 감소하였으며 2차 계통의 충동실 압력과 발전기 출력의 변동량도 크게 감소하였다. 따라서, 충동실 압력제어 알고리즘의 기능은 매우 양호함을 알 수 있다.

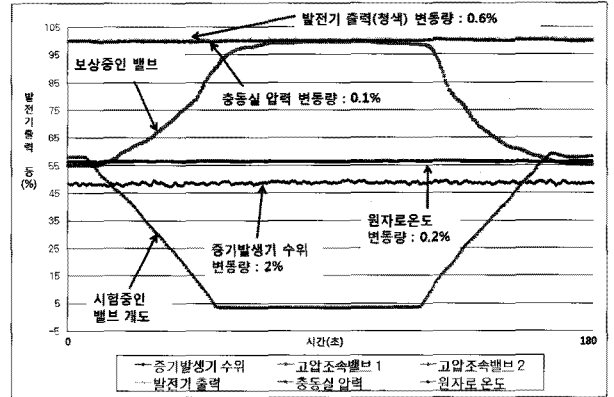


그림 16 충동실 압력제어 고압조속밸브 시험 운전

Fig. 16 HPGV Test with ICP Control

또한, 2007년 8월에 시운전을 완료하고 현재까지 격일로 밸브시험을 수행하여 장기간 시험한 결과 신뢰성이 충분히 확보되었다. 표 3에 충동실 압력제어 알고리즘을 적용한 전후의 주요 운전변수의 변동을 정리하였다.

표 3 충동실 압력제어 적용 전후 주요 변수 변동

Table 3 Major Parameter Change after and before ICP

	증기발생기 수위	발전기 출력	충동실 압력	원자로 온도
적용 전	8%	4%	4.3%	2%
적용 후	2%	0.6%	0.1%	0.2%

6. 결론

본 논문에 언급된 고압터빈의 충동실 압력 제어 알고리즘은 밸브의 고착상태나 제어성을 시험하는 밸브 시험 수행시에 고압 터빈의 압력을 일정하게 유지시켜 발전기의 출력 변동이 최소화 되도록 구현되었다.

이 알고리즘은 열수력적 동특성을 내장한 시뮬레이터를 이용하여 현장적용 시험을 통해 기능을 검증하고 초기 제어 파라미터를 결정하였다. 또, 초기 시운전을 통해 실제 계통의 적정 파라미터를 선정하고 기능을 시험한 결과 고압 조속 밸브 시험시 기존에는 발전기 출력 변동량이 40MW인 반면에 충동실 압력 제어 알고리즘을 적용하여 개선한 경우에는 6MW로 크게 경감되었다. 따라서 1차 계통의 원자로 온도와 증기발생기 수위도 그 변동량이 최소화 되었으므로 원자로 제어계통의 외란이 크게 감소되어 안정성이 한층 증진되었다.

참 고 문 헌

- [1] 민완기 “영흥3,4호기 터빈제어 시스템”, pp. 51-53, 터빈보일러제어 기술교류회 세미나 자료, 한국전력공사 전력연구원, 2008
- [2] “고리3,4호기 운전지침서”, 한국전력공사 고리원자력본부, 2002
- [3] 신상철 “보일러터빈제어”, pp 288-290, 한국발전교육원, 2006
- [4] I. K. Choi, J. A. Kim, et al. “Development of a digital turbine control system in a nuclear power plant” International Journal of Control Automation and System”, Vol. 7, No. 1, pp. 67-73, 2009.
- [5] Ali Chaibaksh, Ali Ghaffari “Steam Turbine Model” Simulation Modeling Practice and Theory, 16, 1145-1162, 2008
- [6] 김동화 “계장제어시스템”, 통일출판사, pp327-331, 2003
- [7] 최인규, 우주희 “원자력발전소 주급수펌프터빈구동용 증기터빈 제어시스템 현장 적용에 따른 초기 제어상수 결정” 한국조명·전기설비학회 논문지 Vol.23, No.4, pp.72~78, 2009



우 주 희 (禹周希)

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

Tel : 010-3505-5319

E-mail : jhwoo@kepco.co.kr



신재호 (申在浩)

1978년 8월 11일생. 2006년 한밭대 전기공학과 졸업. 2009년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 현재 엔텍코아 선임연구원

Tel : 019-401-7043

E-mail : 78sjho@hanmail.net

저 자 소 개



최인규 (崔仁圭)

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

Tel : 010-6423-5781

E-mail : choiik@kepco.co.kr



김종안 (金鍾安)

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

Tel : 019-471-5571

E-mail : jakim@kepco.co.kr



박두용 (朴斗用)

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

Tel : 010-8844-9418

E-mail : papiyon@kepco.co.kr