

고압터빈의 압력 제어 알고리즘 구현

신재호*, 정태원**
(주)삼창기업*, 충남대학교**

Realization of the First Stage Pressure Control Algorithm for High-pressure Turbine

Jae-Ho Shin*, Tae-Won Jung**
Samchang Enterprise Corporation*, ChungNam University**

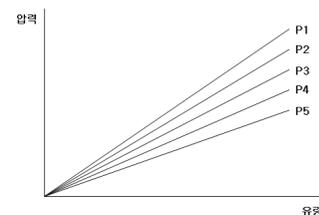
Abstract - 터빈으로 유입되는 증기유량을 제어하여 속도를 제어하는 시스템 즉, 터빈제어시스템은 발전소에서 주요한 설비 중 하나이다. 터빈제어시스템의 검증된 제어 알고리즘 기능은 발전소 계통의 안정성 증진 및 전력 생산의 품질을 향상시키고 경제적 손실을 경감시킨다.

$$Q = A \cdot K \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} = K1 \cdot \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} = K2 \cdot \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} \text{----- (5)}$$

유체의 온도가 일정하면 압력 P₁은 유량 Q에 정비례하며 터빈의 유입 증기량은 식 (6)으로 간단히 쓸 수 있다.

$$Q = \text{Constant} \cdot P_1 \text{----- (6)}$$

또, 언급한 바와 같이 터빈은 노즐의 연속으로 볼 수 있고 각 노즐 사이의 압력비는 일정하므로 증기의 온도가 일정하면 그림 4와같이 압력분포를 나타낸다. 결국, 증기유량과 발전기 출력은 열에너지 입력과 전기출력의 관계로서 열소비율을 고려하면 정비례의 관계(MW = Q · $\frac{1}{\text{HeatRate}}$)이므로 주증기 압력과 발전기 출력도 정비례의 관계를 나타낸다.



<그림 1> 유량에 대한 고압터빈 단의 압력

1. 서 론

터빈제어시스템의 터빈제어기능 중에는 선택된 밸브를 열고 닫는 밸브시험 기능이 있다. 이 기능은 밸브의 고착상태를 방지하고 제어상태를 검증하기 위한 목적이며 발전소 출력이 100%인 정상운전 중에 주기적으로 수행된다. 발전소가 정상운전시 선택된 밸브를 시험하면서 터빈에 유입되는 증기유량과 압력이 변동되며 변동된 증기유량과 압력으로 인하여 발전소의 출력이 변화된다. 발전소 출력의 변화에 큰 영향을 미치는 발전소 출력과 비례하는 고압터빈의 1단 압력을 제어하여 밸브시험 중에도 발전소 출력을 유지할 수 있다.

2. 본 론

2.1 고압터빈 압력과 발전기 출력 및 증기유량 관계

주증기 압력, 주증기 유량 및 발전기 출력 관계를 살펴보면, Q를 유량, C₀를 유량계수, f(x)를 밸브 개도, ΔP를 밸브 입·출구 차압이라 하면 유량과 압력의 관계는 식 (1)과 같다.

$$Q = C_1 \cdot f(x) \sqrt{\Delta P} \text{----- (1)}$$

엔탈피는 온도와 압력을 알면 증기표로부터 알 수 있고, 정상 운전시 과열기의 출구 온도와 압력은 보일러 제어시스템에 의하여 거의 일정하게 유지되므로 엔탈피도 일정하다. 따라서 유량만 알면 터빈에 전달된 에너지를 구할 수 있다. 터빈은 노즐의 연속으로 생각할 수 있고 과열증기는 이상기체의 상태방정식을 적용할 수 있으므로 주증기 제어밸브의 개도가 일정할 경우 J를 열의 일상당량, h₁을 터빈입구 증기의 kg당 엔탈피, h₂를 터빈출구 증기의 kg당 엔탈피, V₂를 터빈 출구 증기의 분출 속도라 하면 식 (2)가 성립한다.

$$Jh_1 = Jh_2 + \frac{V_2^2}{2g} \text{----- (2)}$$

식(2)을 분출속도 V₂에 대하여 풀면 식 (3)과 같다.

$$V_2 = \sqrt{2gJ(h_1 - h_2)} \text{----- (3)}$$

여기서, h = C_pT를 적용하고, 이상기체의 엔탈피 식, 엔트로피 팽창 방정식 즉, P_v^k = C, 그리고 이상기체의 상태 방정식, P_v = RT, T₂/T₁ = (P₂/P₁)^{k+1/k} 및 정압비열과 비열비의 관계식을 고려하여 유량 Q를 구하면, 식 (4)와 같다.

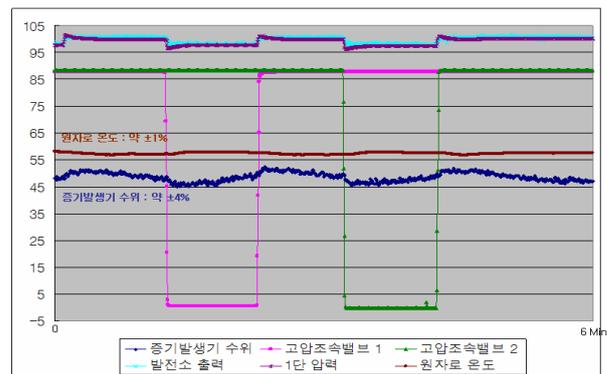
$$Q = A \sqrt{\frac{2gk}{k-1} \cdot \frac{P_1}{v_1} (r^{\frac{2}{k}} - r^{\frac{k+1}{k}})} \text{----- (4)}$$

- Q : 증기유량(T/hr)
- h : 유체의 단위 무게당 엔탈피
- T : 유체의 온도
- k : 비열비(C_p/C_v)
- A : 노즐 면적
- C_p : 유체의 정압 비열
- R : 기체 상수
- v : 유체의 비체적

γ : 압력비(P₂/P₁)
만약 압력비가 일정하게 유지된다면 식 (5)로 정리할 수 있다.

2.2 기존 제어 알고리즘 기능 분석

밸브 시험은 닫는 시험과 열리는 시험으로 구분되며 운전원에 의한 수동보상이 이루어지는 고압 조속 밸브를 닫은 후에 고압 정지 밸브를 닫는 것이 닫는 시험이고 반대로 고압 정지 밸브를 열은 후에 운전원에 의한 수동보상이 이루어지는 고압 조속 밸브가 열리는 것이 열리는 시험이다.

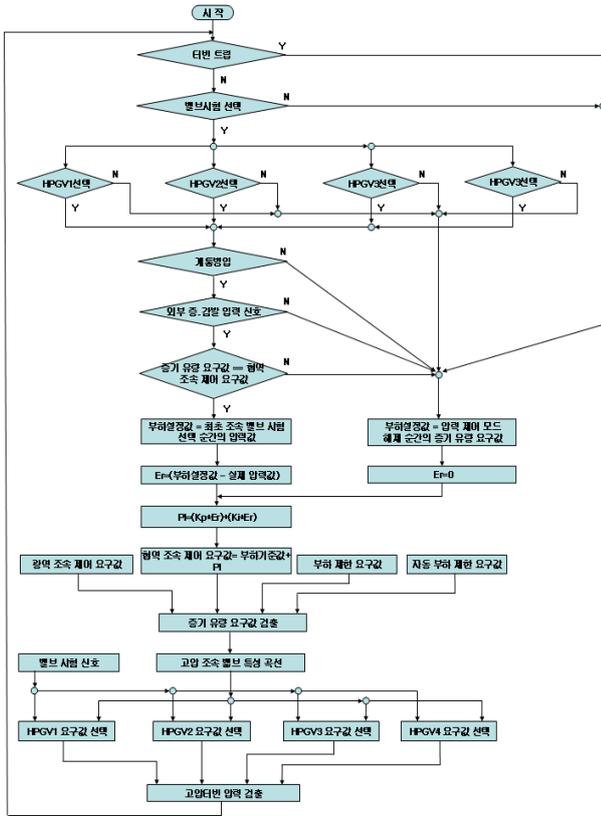


<그림 2> 기존 제어 시스템의 고압조속밸브시험

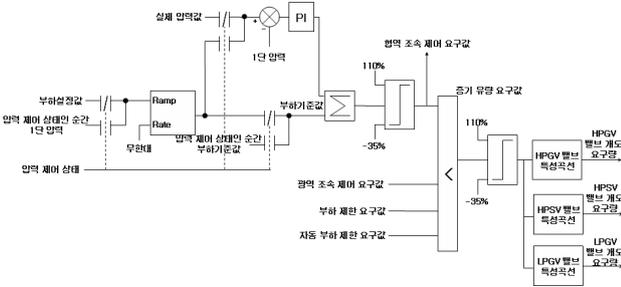
기존 제어 시스템의 고압조속밸브 시험 결과는 그림 2와 같으며 고압조속밸브의 닫는 시험에서 발전소의 출력이 1006MW에서 981MW까지 감발되고 열리는 시험에서 1006MW로 복귀되었다. 이 시험에는 25MW 정도의 출력이 변동되는 것을 확인하고 임의의 고압조속밸브가 닫히거나 열리면서 시험외의 고압조속밸브 개도가 일정하게 유지됨을 확인하였다. 1차계통의 원자로 온

도나 증기발생기 수위의 변화도 이 시험을 동안에 변화되는 것을 확인하였다.

2.3 압력 제어 알고리즘 구현



〈그림 3〉 압력 제어 알고리즘 작업 순서도



〈그림 4〉 압력 제어 기능 블록도

압력 제어 상태는 부하 운전 중 고압 조속 밸브 시험과정에서 발전소의 출력과 비례하는 고압터빈의 1단 압력을 제어하여 발전소의 출력을 유지하기 위한 기능이다. 압력 제어 기능은 협역 조속 제어 기능에 포함되며 고압 조속 밸브 시험에서 압력 제어 상태이면 협역 조속 제어 요구 값에 압력 제어로 보상되는 값이 가중되어 증기 유량 요구 값으로 선택된다. 시험대상인 밸브가 닫히거나 열리면서 변화되는 1단 압력을 유지하도록 증기 유량 요구 값이 증가하거나 감소하여 나머지 밸브를 제어하게 된다.

밸브 시험 상태에서 고압 조속 밸브를 선택하면 압력 제어 상태가 된다. 밸브시험 동안에 임시적으로 제어에 영향을 미치지 않는 부하설정값을 밸브시험이 시작되는 순간의 압력 값으로 치환한다. 고압 조속 밸브의 개도상태에 따라서 변화되는 실제 압력 값을 치환된 부하설정값에 일치시키도록 압력 제어의 보상 값이 변화된다. 이 보상 값은 증기 유량 요구 값을 증·감시켜 시험의 고압 조속 밸브를 제어하여 고압터빈의 압력을 유지하며 발전소의 출력을 유지한다. 또한 제어 상태가 되면 부하기준 값은 밸브시험이 시작되는 순간의 부하기준값으로 치환되어 부하설정값의 변화에 따라서 변화되지 않도록 한다.

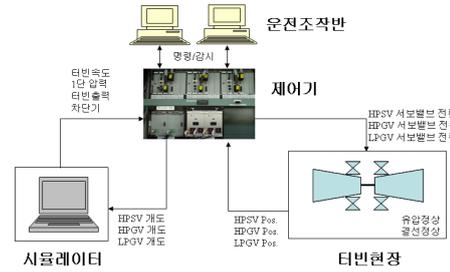
압력 제어 해제상태에서는 밸브시험이 시작되는 순간의 압력

값으로 치환된 부하설정값은 압력 제어 해제되는 순간의 증기 유량 요구 값으로 치환되어 발전기 출력의 변화가 없도록 한다.

그림 3은 압력 제어 알고리즘을 구현하기 전에 압력 제어 알고리즘의 작업 순서도이며 그림 4는 그림 3을 기반으로 코딩된 프로그램을 간략하게 블록화한 것이다.

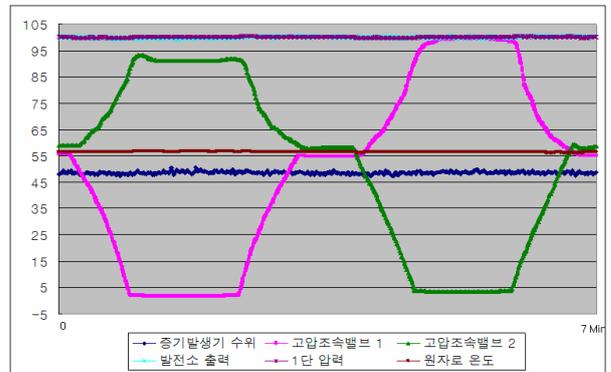
2.4 알고리즘의 현장 적용 시험 및 시운전

1단 압력 제어 알고리즘 기능을 검증하기 위한 현장 적용 시험을 실시하였다. 이 시험은 실제 증기가 없고 현장의 각종 밸브를 제어하고 있는 상태에서 1단 압력 제어 알고리즘에 의한 현장 밸브의 제어 성능을 시험하고 현장 밸브의 제어가 안정적인지 않을 경우에 압력 제어 알고리즘의 기능을 시험하기 위함이다. 현장적용시험 구성도는 그림 5와 같으며 운전원에 의한 터빈속도와 부하설정값의 조작 명령이 발생되면 모든 조절밸브는 제어기 명령에 의해서 개폐되고 모든 밸브 개도는 터빈속도와 발전기의 출력을 발생하기 위해 제어기를 경유하여 시뮬레이터에 입력된다. 시뮬레이터는 개도 변화에 의해서 터빈속도와 발전기의 출력을 연산하며, 터빈속도와 발전기의 출력 신호는 제어기에 전달되어 제어기는 설정값에 따라 밸브를 제어한다.



〈그림 5〉 현장적용시험 구성도

그림 6은 압력제어 알고리즘의 시운전의 결과를 나타낸다. 고압조속밸브1의 시험중에는 고압조속밸브2가 보상되며 반대로 고압조속밸브2가 시험중에는 고압조속밸브1이 보상되어 발전기 출력과 1단압력을 유지한다. 두 차례의 시험에서도 1차계통의 원자로 온도나 증기발생기 수위가 일정하게 유지되는 것을 확인하였다.



〈그림 6〉 압력제어에 의한 고압조속밸브 시험

3. 결 론

현장적용 시험을 통해 압력제어 알고리즘 기능을 검증하고 시운전을 통해 고압 조속 밸브 시험시 기준에는 발전소 출력 변화량이 25MW인 반면에 1단 압력 제어 알고리즘을 적용한 밸브 시험에서는 발전소 출력 변화량이 6MW로 약 20MW의 전력손실이 감소되었다. 또한, 1차 계통의 증기발생기 수위 변동의 경감 및 원자로 제어계통의 외란이 감소되어 안정성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사, 원자력발전처, "터빈 조속기 제어계통", 1997
- [2] 한국발전교육원, "보일러터빈제어", 2006
- [3] 발전교육원, 한국전력공사, "화력발전 이론과 실무", 1995