

증기발생기 급수조절밸브의 최적 용량 계산

주경인, 손석훈, 김영보, 정종식, 고창균
한국원자력연구소

요 약

영광 3,4호기 시운전시 저출력에서 증기발생기 수위 자동 조절이 어려웠던 점을 바탕으로 급수 조절밸브의 용량을 검토하여 급수조절밸브의 최적 용량 계산을 하였다. 급수조절밸브의 성능을 모사하기 위해 계통성능해석 전산코드인 LTC 코드를 이용하였다. 급수조절밸브의 최적 용량 계산 결과 기존의 경우보다 용량이 증가되었으며 LTC 코드로 성능을 모사하여 분석한 결과 기존의 저출력 운전시 발생하였던 문제점들이 해결될 수 있을 것으로 판단되었다.

1. 서 론

주급수계통은 적절한 온도, 압력 및 수질 조건으로 급수를 증기발생기에 공급하여 일차계통에서 생성된 열을 효과적으로 제거하고 터빈발전기에 필요한 증기를 생산할 수 있도록 하는 중요한 역할을 수행하는 계통이다. 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기의 주급수계통 설계는 이전에 지어진 발전소와는 달리 급수를 증기발생기의 downcomer와 economizer 노즐로 공급하며, 각각의 배관에 급수조절밸브가 설치되어 있다. 원자로 출력 5% 에서 20% 사이에서는 downcomer 급수조절밸브만 사용하여 증기발생기 downcomer 노즐로 급수를 공급하고, 20% 출력 이상에서는 economizer 급수조절밸브와 함께 사용한다. 그리고 100% 출력 운전시에는 downcomer 급수조절밸브로 전체 급수량의 10% 유량이 흐르도록 하고, economizer 급수조절밸브로는 90% 유량이 흐르도록 설계하였다.

영광 3,4호기 및 울진 3,4호기의 주급수제어계통은 증기발생기 당 1개씩 설치되어, 5% 출력 이상에서 정상 상태 및 부하 변동시 증기발생기 수위를 일정하게 유지하도록 급수 유량을 자동으로 조절한다. 5%에서 20% 까지의 저출력 운전시는 증기발생기 수위 신호를 이용하여 필요한 급수량을 지시하는 출력 신호를 발생하고 이 신호는 downcomer 급수조절밸브의 위치를 조절하는데 사용되며, 이 때는 downcomer 급수 배관으로만 급수를 공급하므로 economizer 급수조절밸브는 닫고 주급수펌프의 속도는 최소값으로 일정하게 운전된다. 20% 출력 이상에서는 증기발생기 수위, 증기 유량, 급수 유량을 사용하여 필요한 출력 신호를 발생시켜 economizer 급수조절밸브의 위치와 주급수펌프의 속도를 조절하며, 이때 downcomer 급수조절밸브의 개도는 일정하게 고정된다.

영광 3,4호기의 시운전 기간 동안 저출력에서의 주급수제어계통의 자동 운전을 시험한 결과 증기발생기 수위 조절에 어려움을 겪었으며 이는 downcomer 급수조절밸브와 급수 배관 설계가 적절하지 않아 downcomer 급수조절밸브의 개도 변화폭이 크고 주급수제어계통의 설계 개념과는

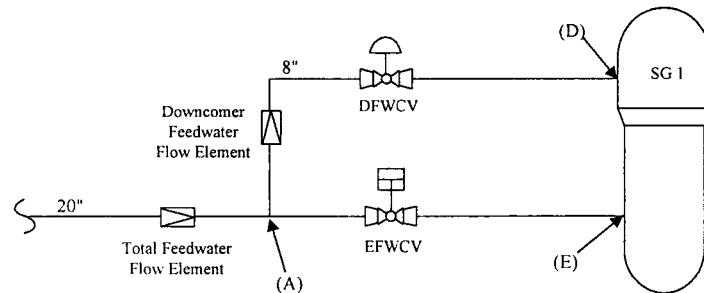
달리 주급수펌프의 속도가 변하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 발전소종합설계자가 주급수펌프 보호를 위해 설치한 재순환 계통을 통해 탈기저장탱크로 우회하는 유량이 증기발생기로 공급되는 급수 유량보다 상대적으로 커서 주급수제어계통에 큰 영향을 미친 것으로 나타났다. 따라서 저출력 운전시 주급수제어계통 및 주급수펌프의 재순환 계통의 유량 조절 방법과 급수조절밸브의 성능 개선이 바람직하다. 본 논문에서는 현재 주급수계통 배관 설계 및 주급수제어계통의 운전 방식을 그대로 유지하면서 영광 3,4호기 시운전시 나타난 문제점을 해결하기 위하여 급수조절밸브의 최적 용량을 계산하였다.

2. 급수조절밸브 최적 용량 계산

이 계산에는 주급수펌프 재순환 유량 조절 계통의 운전 모드에 따라 급수조절밸브의 용량을 계산하였으며, 저출력시 양쪽 급수 배관의 정확한 유량 분배 및 급수조절밸브에 실제로 걸리는 압력차를 계산하여 적용하였다.

2.1 급수조절밸브 용량 계산 방법

먼저 100% 출력 운전시 downcomer 급수 배관으로 전체 급수 유량의 10% 유량이 흐르도록 급수조절밸브의 개도를 설정한다.



위의 그림은 급수조절밸브를 포함한 주급수계통 배관을 간략하게 나타낸 그림이며, 이 그림을 바탕으로 배관 설계의 기본방정식인 비압축성 유체에 적용되는 Bernoulli's Equation을 이용하였다. Economizer 급수 배관(A 지점에서 E 지점)과 downcomer 급수 배관(A 지점에서 D 지점)에 각각 적용하면 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{V_A^2}{2g} = \frac{P_D}{\gamma} + Z_D + \frac{V_D^2}{2g} + h_{LD} \quad \text{①}$$

$$\frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{V_A^2}{2g} = \frac{P_E}{\gamma} + Z_E + \frac{V_E^2}{2g} + h_{LE} \quad \text{②}$$

① 식에서 ② 식을 빼고 정리하면 ③ 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma (h_{LD} - h_{LE}) = P_E - P_D - \gamma (Z_D - Z_E) - \gamma \left(\frac{V_D^2 - V_E^2}{2g} \right) \quad ③$$

여기서,

h_{LD} : Downcomer 급수 배관에서의 유동 손실

h_{LE} : Economizer 급수 배관에서의 유동 손실

A : 급수 배관의 임의의 지점

D : 증기발생기 downcomer 노즐

E : 증기발생기 economizer 노즐

③ 식을 계산한 결과 양쪽 배관의 유동 손실차는 약 8.4 psi 이며, 이것은 100% 출력 운전시 downcomer 급수 배관에서의 압력 강하가 economizer 급수 배관보다 8.4 psi 정도 커야 한다는 결과이다. 그런데 현재의 설계는 downcomer 급수 배관의 압력 강하가 economizer 급수 배관 보다 5.2 psi 정도 작으므로 downcomer 급수조절밸브 양단의 압력차가 economizer 급수조절밸브 보다 14 psi 정도 커야 한다. 따라서 economizer 급수조절밸브 양단의 압력차를 40 psi 로 보면 downcomer 급수조절밸브 양단의 압력차는 약 54 psi 가 되어야 한다.

밸브의 크기를 나타내는 것으로 밸브용량계수라고 불리우는 Cv 값이 사용된다. 밸브용량계수 Cv는 60°F의 물이 밸브 양단의 압력차가 1 psi 일 때 흐르는 유량을 gpm으로 표시한 수치이다. 밸브용량계수의 일반적인 수식은 다음과 같다.

$$Cv = Q \sqrt{\frac{\rho}{(\Delta P \times 62.4)}}$$

여기서,

Q : 유량 (gpm)

ρ : 유체의 밀도 (lb/ft³)

ΔP : 밸브 압력차 (psi)

위에서 구한 downcomer 급수조절밸브 양단의 압력차를 대입하여 밸브용량계수를 구하면 192.1이 된다. Downcomer 급수조절밸브는 20% 출력 운전부터 100% 출력 운전시까지 밸브 위치가 일정하게 고정되므로 여기서 구한 downcomer 급수조절밸브 양단의 압력차와 밸브용량계수를 바탕으로 하여 저출력 운전시의 급수조절밸브의 용량을 계산한다.

그 다음 단계는 economizer 급수조절밸브가 열린 직후인 20(+)% 출력 운전에서 downcomer 급수 배관과 economizer 급수 배관으로 흐르는 정확한 급수 유량을 구한다. 먼저 downcomer 급수 배관으로 흐르는 유량을 가정하고 이 유량에 대한 downcomer 급수조절밸브 양단의 압력차를 계산한다. 그 다음 downcomer 유량과 균형을 이루는 economizer 급수 유량을 구하여 주급수펌프의 최소 속도를 구한다.

마지막 단계로 downcomer 급수조절밸브가 최대로 열리는 20(-)% 출력 운전에서의 downcomer 급수조절밸브의 용량을 산정한다.

2.2 급수조절밸브 용량 계산 결과

가. 주급수펌프 재순환 유량 조절 계통 수동 운전시

주급수펌프 재순환 유량 조절 계통을 수동으로 운전할 경우에는 재순환 유량이 항상 일정하게 흐르도록 하는 경우이다. 계산 결과는 표 1과 같다.

표 1. 주급수펌프 재순환 유량 조절 계통 수동 운전시의 급수조절밸브 용량

| Power | FWCV | Flow Rate (lb/hr) | Valve DP (psi) | Valve Cv | 비 고 |
|--------|------------|------------------------------------|-------------------|----------|---------------|
| 20(+)% | Economizer | 4.41×10^3 | 67 | 111.6 | |
| | Downcomer | 6.04×10^5 (9.4% flow) | 42.4 | 192.1 | |
| | Total Flow | 1.045×10^6 | | | |
| 20(-)% | Downcomer | 1.079×10^6 | 13 | 620.6 | DFWCV max. Cv |
| 18% | Economizer | 2.74×10^3 | 87.2 | 60.5 | EFWCV min. Cv |
| | Downcomer | 6.49×10^5 (10.1% flow) | 48.5 | 192.1 | |
| | Total Flow | 9.23×10^5 | | | |
| 5% | Downcomer | 2.054×10^3 | 112.2 | 39.6 | DFWCV min. Cv |

나. 주급수펌프 재순환 유량 조절 계통 자동 운전시

주급수펌프 재순환 유량 조절 계통을 자동으로 운전할 경우에는 주급수펌프로 공급되는 유량은 항상 일정하며 재순환되는 유량은 필요한 급수 유량을 제외한 나머지 유량이 흐르도록 하는 경우이다. 계산 결과는 표 2와 같다.

표 2. 주급수펌프 재순환 유량 조절 계통의 자동 운전시 급수조절밸브 용량

| Power | FWCV | Flow Rate (lb/hr) | Valve DP (psi) | Valve Cv | 비 고 |
|--------|------------|---------------------|----------------|----------|---------------|
| 20(+)% | Economizer | 4.67×10^3 | 60 | 124.8 | |
| | Downcomer | 5.78×10^5 | 38.8 | 192.1 | |
| | Total Flow | 1.045×10^6 | | | |
| 20(-)% | Downcomer | 1.079×10^6 | 16 | 559.4 | DFWCV max. Cv |
| 18% | Economizer | 3.64×10^3 | 61.8 | 95.4 | EFWCV min. Cv |
| | Downcomer | 5.59×10^5 | 35.0 | 192.1 | |
| | Total Flow | 9.23×10^5 | | | |
| 5% | Downcomer | 2.054×10^3 | 37.5 | 68.6 | DFWCV min. Cv |

3. 토의 및 결론

주급수계통 배관 설계를 바탕으로 실제로 급수조절밸브 양단에 걸리는 압력차 및 정확한 급수 유량 분배율을 고려하고 주급수펌프 재순환 유량 조절 계통의 운전 모드 별로 급수조절밸브의 최적 용량을 계산한 결과, 주급수펌프 재순환 유량을 수동으로 운전할 경우가 자동으로 운전할 경우 보다 downcomer 급수조절밸브의 용량이 큰 값을 나타내었으며, 영광 3,4호기의 경우 downcomer 급수조절밸브의 최대 밸브용량계수는 313.6인데 비해 계산된 값은 620.6으로 나타났다.

그림 1에서 4는 현재 사용중인 downcomer 급수조절밸브의 밸브용량계수와 본 논문에서 계산된 downcomer 급수조절밸브의 밸브용량계수인 620.6을 입력 자료로 하여 계통성능해석 전산코드인 LTC 코드로 분석하여 비교한 결과이다. 그림 1은 원자로 출력이 15%에서 20% 까지 분당 0.2%의 비율로 증가할 때의 증기발생기 수위를 나타낸 그림이고 그림 2는 downcomer 급수조절밸브의 위치를 나타냈으며, 그림 3은 주급수제어계통의 출력 신호를 나타내었고, 그림 4는 주급수펌프의 속도를 나타내었다.

그림에서 나타난 것과 같이 변경 전에는 주급수펌프의 속도가 증가하고 있으나 수정된 값에서는 최소 속도로 일정하게 유지되고 있으며, 급수조절밸브의 개도도 이전 값에서는 완전히 열리게 되어 밸브의 조절이 불가능하였으나 수정된 값에 대해서는 적절한 밸브의 개도 상태를 유지하고 있으며, 급수제어계통의 출력 신호도 예상한 값과 유사하게 나타났다. 따라서 저출력 운전시의 적절한 운전을 위해서는 급수조절밸브의 용량을 증가시킬 필요가 있으며, 실제 설계에 적용하기 위해서는 연계사항에 대한 검토도 아울러 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

[1] ABB-CE LTC User's Manual, Dec. 1986.

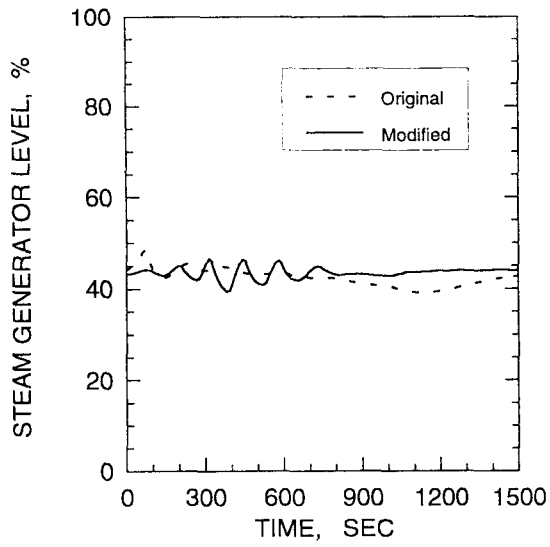


그림 1. 원자로출력이 15%에서 20% 까지 분당 0.2%의 비율로 증가할 때의 증기발생기 수위 변화

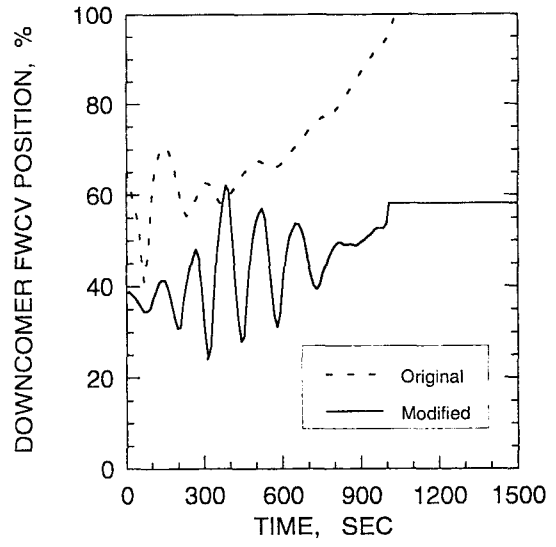


그림 2. 원자로출력이 15%에서 20% 까지 분당 0.2%의 비율로 증가할 때의 Downcomer 급수조절밸브의 위치 변화

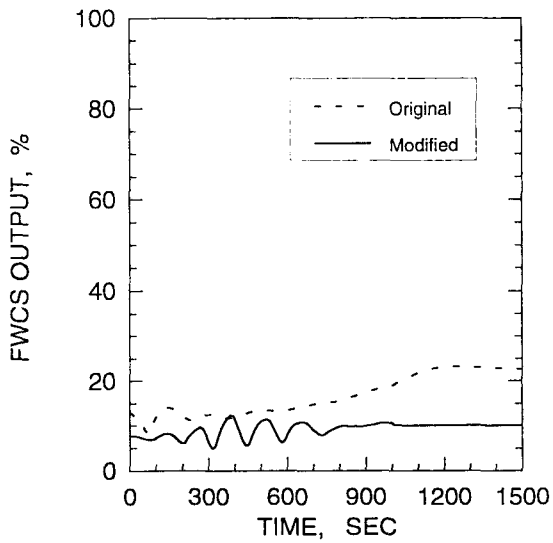


그림 3. 원자로출력이 15%에서 20% 까지 분당 0.2%의 비율로 증가할 때의 주급수제어 계통의 출력 변화

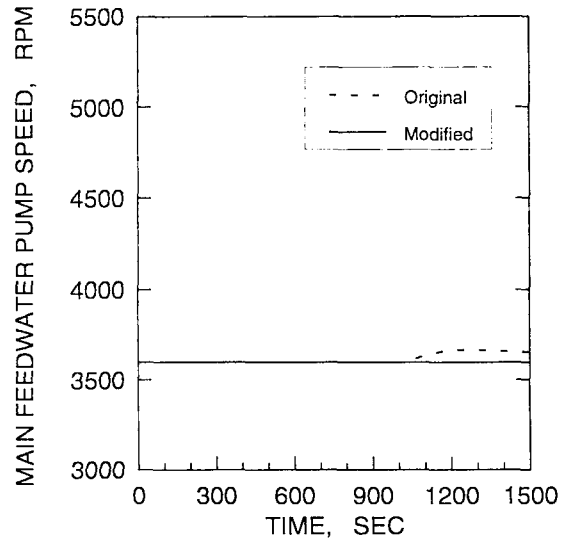


그림 4. 원자로출력이 15%에서 20% 까지 분당 0.2%의 비율로 증가할 때의 주급수펌프 속도 변화