

고리2호기 주급수차단밸브 구동용 질소 고압연동신호 제거

윤덕주

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

고리 2호기 주급수 차단밸브의 경우 다른 호기와는 달리 구동용 질소압력 측정스위치에 의한 단힘 연동신호가 설치되어 있다. 이러한 연동신호는 밸브 구동용 반구내 질소 압력 스위치 “고” 오동작에 의한 밸브차단 가능성이 있으며 이경우 질소압력스위치가 저/고 경보창에 COMMON되어 있어 원인 규명에 어려움이 있다. 또한 질소압력 스위치 고장 및 질소가스 누설시 작업수행이 어렵고 위험이 따른다. 이러한 70년대 발전소 설계의 과잉설비를 제거하므로써 최적인전과 경제성 향상에 기여할 수 있으며 아울러 유지정비의 용이성과 밸브 불시단힘을 미연에 예방할 수 있으리라 예상된다. 이와 관련하여 발전소 계통안전성, 기기안전성을 평가한 결과 기존의 안전해석결과가 유효하며 또한 FSAR 수정없이 이러한 설비변경이 가능하다는 결론에 도달하였다.

1. 개요

고리 2호기 주급수차단밸브는 공기구동펌프를 구동시켜 질소반구에 고압(2250 psig)을 형성하여 밸브를 차단하고 개방한다. 이러한 고압의 질소압력을 감시하기 위하여 압력스위치가 4개 설치되어 있으며 이중 2개는 질소압력 “고”에 의한 주급수 차단밸브의 단힘연동신호, 2개는 질소압력 “저”에 의한 경보를 제공한다. 주급수 차단신호의 목적은 주증기관 파단사고, 복수계통 또는 주급수 계통의 오동작시 사고를 완화시키기 위하여 증기발생기를 격리시키는 것이다. 주급수 차단신호는 안전주입, 수동 안전주입신호, 1개 증기발생기 고고수위이며 차단시점은 신호발생이후 5초이내이다. 고리2호기의 경우 타호기와는 달리 추가적인 안전성 관련 구동용 질소압력 “고” 압력스위치에 의한 주급수 차단신호가 설치되며 구동용 질소압력 “고” 발생시 주급수차단밸브가 닫히도록 연동신호를 제공한다. 설계 근거는 주증기관 파단시 주급수차단밸브 부근의 온도상승으로 인한 질소반구에 과도한 압력상승이 일어나기 전에 밸브가 닫히도록 하기위함이다. 이러한 신호의 문제점은 질소 압력 “고” 스위치 오동작에 의한 밸브차단 가능성이 있으며 이경우 원인규명에 어려움이 있다. 또한 질소압력 스위치 고장 및 질소가스 누설시 작업수행이 어렵고 위험이 따른다. 여기서 이러한 단힘 연동신호는 발전소의 정지요인이 되므로 이를 제거하여 발전소 계통 및 기기 안전성에 미치는 영향이 없음을 증명하고 FSAR 관련 내용을 평가하고자 한다.

2. 개선방안

연동관련 질소압력 '고'스위치를 경보만 사용하고 연동신호는 제거하는 방안과 연동관련 압력스위치를 추가 설치하여 2/2논리회로로 구성하는 방안이 있으며 그내용은 표1과 같다.

표1. 질소연동신호 개선방안

구분	개선 내용	장단점 및 기대효과
방안1	연동관련 질소압력 '고'스위치를 경보만 사용하고 연동신호는 제거하는 방안	-연동신호 제거 관련 안전성검토 필요 -질소압력 '고' 스위치 오동작에 의한 밸브 불시 차단방지로 발전소 안전운전에 기여
방안2	연동관련 압력스위치를 추가 설치하여 2/2논리회로로 구성하는 방안	-안전성 검토는 필요 없으나 불시단힘예방 등 정비유지측면의 효과는 상대적으로 미미함

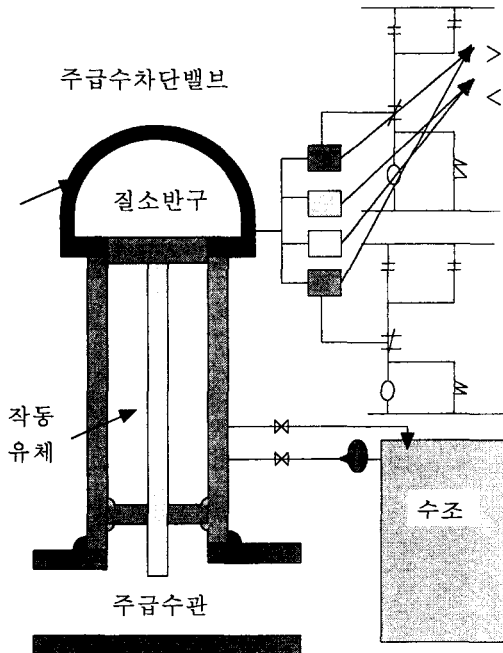


그림1 : 주급수차단밸브 고압연동회로

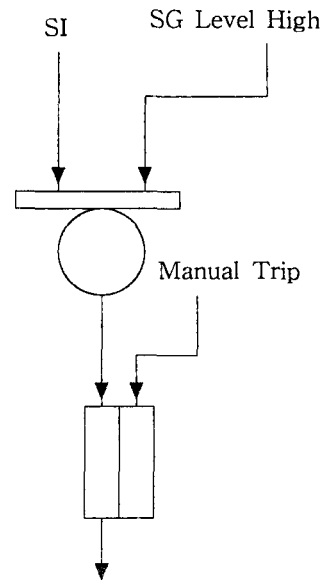


그림2. 차단신호 흐름도

3. 기기안전성 분석

가. 이론식

연동신호제거후 실제 증기관파단사고시 밸브가 닫히지 않는다고 가정할 경우 질소반구가 그 환경에서 견딜수 있는가를 평가한다.

표2. 압력 설정치

종 류	설 정 치(Psig)
실린더 질소반구측의 운전압력	2,225(최대, 115 °F)
실린더 작동유체측의 운전압력	4,250(최대, 115 °F)
실린더 질소반구측 하한 설정치	1,960
실린더 질소반구측 상한 설정치	2,800

질소온도와 압력과의 상관식은 아래와 같다.

$$PV = CMRT \quad (1)$$

여기서 C(압축계수=1.1)는 보수적으로 적용했으며 V(반구체적), M(질소질량), R(기체상수) 등 상수는 아래식과 같이 구해진다.

$$P_{N_2}(\text{psi}) = 1.1 \times 3.2727 \times T(^{\circ}\text{F}) + 1,573.6 \quad (2)$$

한계 상한압력설정치(2,800Psig)에 도달하기 위해서는 질소반구의 온도가 340.7°F까지 상승하여야 한다. 주중기 파단사고시 증기의 온도가 513 °F 이므로 보수적으로 질소반구의 온도를 513 °F 까지 상승한다고 가정할 경우 압력은 3420 psig에 도달 한다. 즉, 정리하면 표4와 같다.

표3. 신호제거전후 최대압력

구 분	신호 제거전	신호 제거후	비 고
최 대 온 도	340.7 °F	513 °F	
최 대 압 력	2800 psi	3420 psi	

질소반구의 밑부분을 실린더로 가정할 경우 질소압력에 의해 발생하는 응력은 다음과 같다.

$$\sigma_r = \frac{P_{N_2} R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2} \right) = P_{N_2} \quad (3)$$

$$\sigma_\phi = \frac{P_{N_2} R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_1^2} \right) = P_{N_2} \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (4)$$

$$\sigma_z = \frac{F}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} = \frac{\pi R_1^2 (P_{N_2})}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} = P_{N_2} \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (5)$$

질소반구의 윗부분을 구(Sphere)로 가정할 경우 질소압력에 의해 발생하는 응력은 다음과 같다.

$$\sigma_r = \frac{P_{N_2} R_1^3}{R_2^3 - R_1^3} \left(\frac{R_2^3 - R_1^3}{R_1^3} \right) = P_{N_2} \quad (6)$$

$$\sigma_\phi = \frac{P_{N_2} R_1^3}{R_2^3 - R_1^3} \frac{R_2^3 + 2R_1^3}{2R_1^3} = P_{N_2} \frac{R_2^3 + 2R_1^3}{2(R_2^3 - R_1^3)} \quad (7)$$

여기서 R_2, R_1 는 질소반구의 바깥반지름과 안쪽반지름 이며 P_{N_2} 는 질소반구내의 질소압력이 다. R_1/R_2 의 값을 4/5 라 가정하면서 이러한 계산식에 대입하여 질소반구를 실린더로 가정시 발생하는 최대응력은 다음과 같다.

$$\sigma_\phi = P_{N_2} \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} = 4.556 P_{N_2} \quad \sigma_r = P_{N_2} \quad (8)$$

$$\sigma_z = P_{N_2} \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} = 1.778 P_{N_2} \quad (9)$$

질소반구를 구(Sphere)로 가정시 발생하는 최대응력은 다음과 같다.

$$\sigma_r = P_{N_2} \quad (10)$$

$$\sigma_\phi = P_{N_2} \frac{R_2^3 + 2R_1^3}{2(R_2^3 - R_1^3)} = 2.074 P_{N_2} \quad (11)$$

나. 연동신호 제거전 안전여유도

1) 최대주응력이론(Maximum Stress Theory)

조합하중하에서 주응력값이 항복강도에 도달했을때 파손된다는 이론이다.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_\phi + \sigma_r}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_\phi - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{\phi r}^2} \quad (12)$$

전단응력은 0 이므로 발생가능 최대응력은 $\sigma_1 = \sigma_\phi = 4.556P_{N_2}$, 최소응력은 $\sigma_2 = \sigma_r = P_{N_2}$ 이다.

$$\sigma_1 = 4.556P_{N_2} = 4.556 \times 2,800 = 12,756 \leq 38,000 = \sigma_y \quad (13)$$

그리고 안전여유도는 아래와 같이 정의되며 안전하다는 것을 알수 있다.

$$\text{안전여유도} = \frac{\text{허용응력}}{\text{최대응력}} - 1 = \frac{38,000}{12,756} - 1 = 1.98 \quad (14)$$

2) 최대전단응력이론(Maximum Shear Theory)

최대전단응력이 전단파괴응력에 도달했을때 파손된다는 이론이다. 즉 아래에서 전단파괴응력보다는 작다.

$$\sigma_\phi - \sigma_r = 3.556 \times P_{N_2} = 3.556 \times 2,800 = 9,956 < 38,000 = \sigma_y \quad (15)$$

$$\text{안전여유도} = \frac{\text{허용응력}}{\text{최대응력}} - 1 = \frac{38,000}{9,956} - 1 = 2.82 \quad (16)$$

3) Von Mises 이론

비틀림에너지가 인장파괴에너지에 도달할때 파손이 일어난다는 이론이다. 즉, 다음의 등식이 성립할때 파손이 일어난다.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[(\sigma_\phi - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\phi)^2]} = \sigma_y \quad (17)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[3.556^2 + 2.778^2 + 0.788^2]} = 3.238P_{N_2} = 9,066 < 38,000 = \sigma_y \quad (18)$$

$$\text{안전여유도} = \frac{\text{허용응력}}{\text{최대응력}} - 1 = \frac{38,000}{9,066} - 1 = 3.19 \quad (19)$$

다. 연동신호 제거후 안전여유도

1) 최대주응력이론(Maximum Stress Theory)

$$\sigma_1 = \sigma_\phi = 4.556P_{N_2} = 4.556 \times 3,420 = 15,582 < 38,000 = \sigma_y \quad (20)$$

$$\text{안전여유도} = \frac{\text{허용응력}}{\text{최대응력}} - 1 = \frac{38,000}{15,582} - 1 = 1.44 \quad (21)$$

2) 최대전단응력이론(Maximum Shear Theory)

$$\sigma_\phi - \sigma_r = 3.556P_{N_2} = 3.556 \times 3,420 = 12,162 < 38,000 = \sigma_y \quad (22)$$

$$\text{안전여유도} = \frac{\text{허용응력}}{\text{최대응력}} - 1 = \frac{38,000}{12,162} - 1 = 2.13 \quad (23)$$

3) Von Mises 이론

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[3.556^2 + 2.778^2 + 0.788^2]} = 3.238 P_{N_2} = 11,074 < 38,000 = \sigma, \quad (24)$$

$$\text{안전여유도} = \frac{\text{허용응력}}{\text{최대응력}} - 1 = \frac{38,000}{11,074} - 1 = 2.43 \quad (25)$$

다. 기기안전성 검토결과

질소 고압력에 의한 밸브단합 연동신호를 제거할 경우에도 주증기관 파단사고시 SI 신호에 의하여 밸브가 닫히므로 반구내의 질소압력은 상승하지 않는다. 만약 주증기관파단사고시 SI 신호에 의하여 밸브가 닫히지 않을 경우 압력이 현재의 설계상한압력설정치보다 올라갈 수 있으나 허용응력 범위내이다. 그러나 지금도 질소반구 정상압력설정치와 “고압력경보” 압력설정치사이에는 상당한 여유가 있으므로 실제압력이 경보설정치 이상으로 상승할 경우 적절한 조치를 취하는 것이 바람직하다.

표4. 신호 제거전후 계산결과 비교

유 형	신호 제거전	신호 제거후	비 고
반구 최대 온도	340.7 °F (2800 psig에 해당)	513 °F (주증기 온도에 해당)	
최대 도달 압력	2800 psi	3420 psi	
최 대 응 력	12,756 psi	15,580 psi	$\frac{R_1}{R_2} = \frac{4}{5}$ 로 가정
허 용 응 력	38,000 psi	38,000 psi	SA516 Grade 70
안 전 여 유 도	1.98	1.44	최대주응력이론

4. 질소고압 연동신호 제거시 계통영향 분석

가. 주급수계통 관련 사고

고리2호기 최종안전성분석보고서 15장 사고해석중 주급수차단밸브 구동용 질소고압 연동신호 제거와 관련하여 평가하여야 할 사고는 주증기관 파단사고, 주급수배관 파단사고, 주급수 상실사고 및 주급수계통 malfunction에 의한 과도한 열제거 4가지로서 다음과 같다.

1) 주증기관 파단사고

이 사고는 주증기관이 파단되어 증기가 과도하게 흐름으로써 일차측으로부터 열 제거량이 증가하게 되고 이로 인해 노내로 유입되는 냉각재의 온도가 떨어지게 되는 사고이다. 음의 냉각재 온도계수 효과로 노심 출력은 증가하게 된다. 이에 대한 노심의 주요 보호계통으로는 안전주입, OPΔT/OTΔT, 혹은 고 증성자속 트립이다. 그리하여 안전주입신호에 의해 주급수차단신호가 발생한다 이 사고분석에서 주급수차단밸브 구동용 질소고압연동신호를 제거하더라도 어떠한 영향을 미치지 않으므로 허용가능하다.

2) 주급수관 파단사고

주급수관 파단사고는 증기발생기 2차측에 주급수를 공급/유지할 수 없을 정도의 큰 배관파단사고를 말한다. 주급수파단사고시 가압기고압력, 증기발생기수위 저저, 안전주입신호, OTΔT의 보호신호에 의해 원자로가 정지되며 또한 보조급수유량 공급신호가 발생된다. 그리하여 안전주입신호에 의해 주급수차단신호가 발생한다. 이 사고분석에서 주급수차단밸브 구동용 질소고압연동신호를 제거하더라도 어떠한 영향을 미치지 않으므로 허용가능하다.

3) 주급수상실사고

주급수상실사고(펌프상실, 밸브오동작, 전원상실)는 노심의 붕괴열을 제거하는 증기발생기 2차측 냉각력의 감소를 가져오기 때문에 이를 방지하기 위하여 첫째 한개의 증기발생기 수위 저저에 의한 원자로정지 둘째 한개의 증기발생기 주급수 저유량에 의한 원자로정지(증기발생기 저수위 상태에서 증기-급수유량 불일치) 셋째 보조급수유량 작동하는 보호계통이 작동한다. 이 사고 분석에서 주급수차단밸브 질소고압연동신호를 제거하더라도 어떠한 영향을 미치지 않으므로 허용 가능하다.

4) 주급수계통 Malfunction에 의한 과도한 열제거

주급수온도의 감소 혹은 과도한 급수유량 공급에 의해 노심의 온도가 감소하여 음의 냉각재온도 계수효과로 노심출력증가를 가져온다. 이러한 과도상태는 일차측과 이차측의 열용량에 의해 완화된다. 또한 OPΔT/OTΔT 트립신호에 의해 핵비등이탈을 방지한다. 급수제어계통의 오동작에 의해 급수조절밸브가 열림으로서 과도한 급수유량이 공급될 시에는 증기발생기 수위 고고에 의해 원자로정지가 일어나고 급수밸브가 차단된다. 이 사고분석에서 주급수차단밸브 구동용 질소고압 연동신호를 제거하더라도 어떠한 영향을 미치지 않으므로 허용 가능하다.

나. 연동신호 제거시의 사고해석 영향 평가

주급수계통과 관련되는 사고해석의 입력자료 검토결과 주급수 차단밸브의 질소고압 연동신호와 관련되는 내용은 없다. 주급수차단신호로서 Low Steam Line Pressure, Low Pressurizer Pressure, High Containment Pressure, 1개 증기발생기 고수위 등이며 주급수차단이 요구되는 사고발생시 질소고압 연동신호와 관계없이 급수차단밸브는 닫히게 된다. 질소고압 연동신호 제거시에도 주증기관 파단사고, 복수계통의 오동작, 주급수 계통의 오동작등의 사고시 주급수 차단신호가 발생되어 사고완화 기능을 수행하므로써 계통안전성에 영향을 미치지 않는다.

표5. 사고해석에 영향을 미치는 주요 입력자료

사 고	사고해석에 영향을 미치는 주요 입력자료
주증기관 파단사고	<ul style="list-style-type: none"> · 주증기유량 · 보조급수유량 · 증기발생기와 보조급수 배관사이의 주급수 배관의 체적등
주급수배관 파단사고	<ul style="list-style-type: none"> · 보조급수 최소온도 · 보조급수 유량 · 증기발생기와 보조급수배관 체크밸브 사이의 주급수배관의 체적 등
주급수 상실사고	<ul style="list-style-type: none"> · 증기발생기에 유입되는 최소 보조급수유량 · 증기발생기와 보조급수배관사이의 주급수배관의 체적 등
주급수계통 오동작에 의한 과도한 열제거	<ul style="list-style-type: none"> · 증기발생기에 유입되는 최대급수유량 · 주급수배관의 Piping, Isometrics, 등

다. 계통영향 평가결과

주급수차단신호 발생시 FSAR요건인 5초이내 닫히게 되므로 질소 고압 연동신호 제거시 계통안전성에 미치는 영향은 없다. 주증기관 파단사고시 주급수차단밸브 부근의 온도상승으로 인한 질소반구의 과도한 압력상승이 일어나기 전에 밸브가 닫히도록 하기 위하여 구동용 질소압력 “고” 발생시 주급수차단밸브 닫힘연동신호를 설계하였으나 주증기관 파단사고시 2.1초 후에 안전주입신호가 발생함으로써 질소고압 연동신호와 관계없이 주급수격리신호가 발생한다.

5. 결론

고리2호기 FSAR의 관련내용중 주급수차단밸브 구동용 질소고압연동신호와 관련되는 내용은 없으며 고리2호기 주급수차단밸브 구동용 질소 연동신호 제거시 계통영향평가 결과 기존의 안전해석이 유효하며 구조안전성분석에서 설계안전율이 충분하다는 결론에 도달했다. 그러므로 연동신호를 제거하는 방안을 채택하는 것이 바람직하다. 그러나 연동신호제거후에 실제압력이 설계상한압력까지 상승할 경우 적절한 조치를 취하는 것이 바람직하다.

6. 참고문헌

1. Mechanical Engineering Design Input - Main Feedwater System
2. 주급수차단밸브 O&M 메뉴얼
3. 고리2호기 최종안전분석보고서(FSAR)
4. WCAP 7878, "Westinghouse LOFTRAN Code Description and User's Manual", 1989
5. Westinghouse, KNFC, "Reload Transition Safety Report for Kori Unit 1" 1995.5
6. ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III,
7. Stress Analysis Report for Kori Unit 2, 1972.10