

울진 3,4호기의 가압기 고압력 원자로정지여유도 민감도 분석

손석훈, 서호태, 정원상, 서종태, 이상근

한국원자력연구소

요 약

가압기 고압력 원자로정지여유도(high pressurizer pressure trip margin)에 영향을 주는 요인들에 대한 민감도 분석을 울진 3,4호기 성능해석코드인 LTCUCN computer code를 이용하여 수행하였다. 그 결과, 초기 가압기 압력, 증기우회제어계통의 quick open 지연시간, 터빈우회밸브의 quick opening 시간, 원자로출력 감발계통의 용량, 원자로출력감발 제어봉 낙하시간, 가압기 살수작동 설정치 등이 완전부하상실시 가압기 압력을 상승시키는 주요인자임을 알 수 있었으며, 증기우회제어계통 및 가압기 살수계통의 용량은 최대 가압기 압력에 미치는 영향이 미미한 것으로 판명되었다. 울진 3,4호기의 참조발전소인 영광 3,4호기의 as-built 자료를 토대로 울진 3,4호기의 원자로정지여유도를 계산한 결과 울진 3,4호기는 완전부하상실사건시 37 psi의 정지여유도를 가질 수 있는 것으로 판단된다. 그러나, 원자로출력감발계통이 있는 ABB-CE type의 울진 3,4호기에서는 완전부하상실사건보다 원자로출력감발계통이 동작하지 않는 부하감발사건이 최대 가압기 압력을 유발하는 사건이고, 다양한 부하상실사건중에도 운전여유도는 확보하고 있음을 알 수 있었다.

1. 서 론

가압기 고압력 원자로정지여유도란 안전해석 결과에 의한 가압기 고압력 원자로정지설정치와 성능관련설 계기준사건중 나타나는 최대 가압기 압력값 사이의 여유도를 지칭하는 것으로서, 가압기 압력 측정기기의 계 기오차(normal performance tolerance) 이상의 충분한 여유도를 가질 수 있도록 설계되어야 한다. 즉, 최 대한의 여유도를 확보하기 위해서는 성능관련설계기준사건중 나타나는 최대 가압기 압력을 가능한 한 낮게 유지해야 한다. 성능관련설계기준사건중 가압기 고압력을 유발하는 대표적인 사건은 부하상실사건이며, 동 사건의 가압기 압력에 영향을 주는 요인으로는 초기 가압기 압력, 증기우회제어계통 quick open 신호지연시 간, 터빈우회밸브 quick opening 시간, 증기우회제어계통의 용량, 원자로출력감발계통의 용량, 원자로출력감 발 제어봉의 낙하시간, 가압기 살수계통의 용량, 가압기 살수 작동 설정치 등이 있다. 따라서, 가압기 고압력 원 자로정지여유도는 상기 관련 요소들의 종합적인 영향에 의해서 결정되어진다. 본 논문에서는 먼저 각각의 요인들이 가압기 압력에 미치는 영향을 울진 3,4호기 성능해석 코드인 LTCUCN computer code^[1]를 사용 하여 분석하고, 울진 3,4호기의 참조발전소인 영광 3,4호기의 as-built 자료를 토대로 울진 3,4호기에서의 가압기 고압력 원자로정지여유도를 예측하였다.

2.0 본 문

2.1 설계기준사건 도출

총 48개의 울진 3,4호기 성능관련설계기준사건중^[2] 최대 가압기 압력을 유발하는 사건은 이차 축의 열 제거기능이 급격히 감소하는 소내부하운전(turbine generator runback to house load)이다. 하지만, 일반적으로 소내부하운전사건 대신에 완전부하상실사건(total loss of load)을 설계기준사건으로 택한다. 동 완전부하상실사건은 성능관련설계기준사건일 뿐만 아니라 안전관련설계기준사건에도 포함되며 이 경우 터빈/발전기 및 NSSS 제어계통들에 신뢰(credit)를 인정하지 않는 것이 큰 차이점이다. 이는 설계 및 해석상의 여유를 갖고자 하는 것으로서, 원자로냉각계통의 과압보호(overpressure protection) 능력 분석시 사용되는 설계기준사건을 완전부하상실사건으로 선정한 것파도 일치한다^{[3],[4]}. 참고문서 4의 경우 안전해석 측면에서 보수적으로 해석하기 위해 NSSS의 모든 제어계통은 비안전등급(non-safety grade)이므로 사건을 완화하는 방향으로 작동하지 않는다고 가정하나, 본 논문은 성능해석 측면에서 NSSS 제어계통들이 정상적으로 자동 작동하는 완전부하상실사건을 채택하였다.

2.2 완전부하상실 (Total Loss of Load) 사건

완전부하상실사건은 NSSS와 무관한 터빈 및 발전기 자체의 트립 또는 외부부하의 상실에 의한 터빈 및 발전기트립이 일어나는 사건으로서, 이 경우 원자로 트립 혹은 일차측 및 이차 축의 안전밸브(safety valve)의 작동이 일어나지 않도록 설계하는 것이 발전소 성능요구조건이다^[5]. 완전부하상실사건이 발생하면 터빈정지밸브가 닫히게 되고 증기압력이 급격히 상승하여 증기발생기의 압력 및 온도를 상승시키며, 아울러 이차 축의 열전달 기능 상실로 인한 일차측의 온도가 상승하게 되고 이로 인한 가압기 압력의 급격한 상승이 일어나게 된다. 이 때, 관련 NSSS 제어계통의 원활한 작동이 일어나지 않으면 가압기과압력에 의한 원자로정지가 일어나게 된다. 이러한 완전부하상실사건시 사고를 완화하기 위해 설계된 NSSS 제어계통의 작동구조는 다음절에서 기술된다.

2.3 NSSS 제어계통

완전부하상실사건시 NSSS 제어계통의 작동구조는 그림 1에 나타난 바와 같다. 앞 절에서 기술한 바와 같이 터빈정지밸브의 닫힘으로 인한 급격한 증기유량 감소는 증기우회제어계통의 터빈우회밸브 quick open 작동 설정치를 초과하게 되고, quick open signal delay time인 약 0.5초 이후 터빈우회밸브는 약 1초 이내에 완전히 열리게 된다. 울진 3,4호기의 증기우회제어계통의 최소 열전달계거능력은 전 출력의 55%가 되도록 설계되어 있으며, 증기우회제어계통의 출력신호에 의해 터빈우회밸브가 열리기 시작하면 증기발생기의 압력이 강하게 된다. 이 증기우회제어계통의 출력신호는 한편으로 원자로출력감발계통의 작동신호를 발생시키며 원자로출력감발계통은 제어봉 bank 5 혹은 bank 5 및 bank 4를 중력에 의해 낙하시켜 원자로출력을 bank 5 혹은 bank 5 및 4의 반응도(reactivity)만큼 감소시키게 된다. 여기서, bank 4의 낙하필요성은

발전소전산계통(Plant Computer)의 하나인 Plant Monitoring System(PMS)에 의해 결정되며, 제어봉 낙하에 의한 원자로출력 감소량이 최소 25%, 최대 80% 범위 내에 있도록 설계되어있다. 한편, 증기발생기의 압력상승에 따른 shrink 현상 및 증기의 방출 감소에 의한 증기발생기의 수위는 초기 급격히 감소한 후 원자로출력감발계통에 의해 형성된 원자로출력 및 증기우회제어계통에 의한 열 방출이 일치되는 시점에서 주급수제어계통에 의해서 조절된다. 한편, 이차 축의 열전달 기능 상실로 인하여 가압기압력이 상승하게 되면 가압기압력을 정상운전범위인 2225 psia에서 2275 psia를 유지하도록 가압기압력제어계통은 가압기살수제동을 작동시켜 가압기압력을 낮추게 되며, 아울러 가압기수위제어계통은 letdown 및 charging system을 적절히 작동시켜 가압기 수위를 조절하게 된다.

3.0 결과 및 검토

3.1절에서는 최대 가압기 압력에 주요 영향을 미칠 수 있는 인자들의 변화에 따른 영향을 분석하고 3.2절에서는 올진 3,4호기의 참조발전소인 영광 3,4호기의 as-built 자료를 토대로 완전부하상실사건시와 여러 가지 부하감발사건에 대한 올진 3,4호기의 정지여유도를 계산하였다.

3.1 민감도 분석 결과

3.1.1. 초기 가압기압력 (Initial Pressurizer Pressure)

그림 2는 완전부하상실시 가압기 초기압력을 올진 3,4호기의 정상운전시 가압기압력 설정치인 2250 psia에서 5 psi 만큼씩 증가했을 경우 나타나는 가압기 거동을 비교한 것이다. 현재 올진 3,4호기의 가압기 고압력 원자로정지설정치는 2383 psia이고, 원자로보호계통(Reactor Protection System)에서 가압기압력 측정기기의 측정오차는 27 psi이므로 최소 원자로정지설정치는 2356 psia가 된다. 이 그림에 나타난 바와 같이 초기 가압기 압력을 2250, 2255, 2260, 2265, 2270, 2275 psia로 증가시킬 때 최대 가압기 압력은 이에 비례하여 2320.5, 2323.7, 2327.1, 2330.4, 2333.5 psia로 증가하며, 따라서 정지여유도는 37.1, 35.5, 32.3, 28.9, 25.6, 22.5 psi로 감소함을 알 수 있다.

3.1.2. 증기우회제어계통의 quick open 신호 지연 시간 (SBCS quick open signal delay time)

그림 3은 증기우회제어계통의 quick open 신호지연시간이 0.0에서 1.5초까지 변할 경우의 가압기압력 거동을 나타낸 것이다. 여기서 quick open 신호지연시간이란 quick open 신호 발생 시각부터 터빈우회밸브의 작동 시작 시각까지의 지연시간을 뜻하며, 영광 3,4호기의 출력상승시험 결과 등 지연시간이 약 0.5초인 것으로 판명되었다. 이 그림에 나타난 바와 같이 지연시간이 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50초로 변할 때의 최대 가압기 압력은 지연시간의 변화에 비례하여 2304.4, 2311.3, 2318.9, 2326.7, 2332.1, 2346.2 psia로 증가되며, 따라서 정지여유도는 51.6, 44.7, 37.1, 29.3, 23.9, 9.8 psi로 감소함을 알 수 있다.

3.1.3. 터빈우회밸브 quick opening 시간 (Turbine Bypass Valve quick opening time)

본 절은 터빈우회밸브의 quick opening 시간, 즉, quick open 신호 발생시 밸브가 완전 잠김 상태에서

완전개방 될 때까지 걸리는 시간의 변화에 따른 가압기고압력 원자로정지여유도를 분석한 것이다. Quick open mode시 터빈우회밸브의 응답시간은 부하상실사고시 일차측 압력에 직접적인 영향을 미치는 변수로써 가압기 고압력에 의한 원자로정지 설정치와의 운전여유도 확보를 위해 빠른 응답특성이 요구되고 있으며, 동 응답시간 요구조건은 밸브의 기계적 특성을 고려하여 결정되어지며 영광 3,4호기와 울진 3,4호기의 경우 모두 1.0초이내가 되도록 설계되어있다. 그림 4는 quick opening 시간이 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 2.00 초로 변할 때의 가압기압력 거동을 나타낸 것으로서, 최대 가압기 압력은 quick opening 시간의 변화에 비례하여 2311.8, 2315.5, 2318.9, 2322.1, 2325.0, 2330.2 psia로 증가되며 따라서 정지여유도는 44.2, 40.5, 37.1, 33.9, 31.0, 25.8 psi로 감소함을 알 수 있다.

3.1.4. 증기우회제어계통 용량 (SBCS capacity)

영광 3,4호기 및 울진 3,4호기의 경우 증기우회제어계통의 용량은 최소 55%, 최대 88%가 설계요건이며, 영광 4호기의 출력상승시험 결과 그 용량이 약 73%인 것으로 판명되었다. 증기우회제어계통 용량 변화에 따른 가압기압력의 거동은 그림 5에 나타나 있으며, 사건 발생 직후에 나타나는 최대 가압기 압력은 증기우회제어계통 용량 변화에 무관하게 일정하며 약 10초이후에 그 영향이 미약하게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 완전부하상실사건시에 최대 가압기 압력을 낮추는데는 최소 요구조건 이상의 증기우회제어계통의 용량이 전혀 기여를 하지 못함을 알 수 있다.

3.1.5. 원자로출력감발계통 용량 (Reactor Power Cutback System capacity)

영광 3,4호기 및 울진 3,4호기의 경우 원자로출력감발계통의 용량은 최소 25%, 최대 80%가 설계요건이며 이는 제어봉의 Bank 5와 4의 reactivity worth에 의해 결정되고, 영광 3,4호기의 출력상승시험 결과 제어봉 bank 5의 용량은 약 35%인 것으로 판명되었다. 그림 6은 원자로출력감발계통의 용량이 25, 30, 35, 40, 45%로 증가할 때 가압기압력에 미치는 영향을 분석한 것으로서, 용량이 증가함에 따라 가압기압력은 2318.9, 2316.8, 2314.9, 2313.1, 2311.6 psia로 감소하게 되고, 따라서 정지여유도는 37.1, 39.2, 41.1, 42.9, 44.4 psi로 증가함을 알 수 있다.

3.1.6. 원자로출력감발 제어봉 낙하시간 (RPC Control Element Assembly drop time)

영광 3,4호기 및 울진 3,4호기의 경우 제어봉 낙하시간에 대한 설계요건은 최대 4.0초이며 영광 3,4호기의 출력상승시험 결과 약 2.5초 소요되었다. 그림 7은 원자로출력감발 제어봉의 중력에 의한 낙하시간 변화가 가압기압력에 미치는 영향을 분석한 것이다. 이 그림에 나타난 바와 같이 낙하시간이 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0초인 경우 최대 가압기 압력은 낙하시간에 비례하여 2310.5, 2313.1, 2315.6, 2317.4, 2318.9 psia로 증가하게 되고, 따라서 정지여유도는 45.5, 42.9, 40.4, 38.6, 37.1 psi로 감소하였다.

3.1.7. 가압기살수계통의 용량 (Pressurizer Spray System capacity)

본 절은 가압기살수계통의 살수용량 변화에 따른 정지여유도 영향을 분석한 것으로서, 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기의 살수용량에 대한 설계요건은 최소 375gpm, 최대 750 gpm이다. 그림 8은 가압기 살수계통의 용량 변화에 따른 가압기압력에 미치는 영향을 분석한 것으로서, 사건 발생 직후에 나타나는 최대 가압기

압력은 가압기살수계통의 용량 변화에 무관하게 일정하다. 따라서, 완전부하상실사건시에 최대 가압기 압력을 낮추는 데는 가압기살수계통의 용량이 전혀 기여할 하지 못함을 알 수 있다.

3.1.8. 가압기살수밸브 작동설점치 (Pressurizer spray actuation setpoint)

본 절은 가압기살수의 작동시점 및 중지시점에 관한 설정치 변화에 따른 정지여유도의 영향을 분석한 것으로서 작동과 중지사이의 deadband는 모두 25 psi로 하여 비교 분석이 용이하도록 관련 설정치를 설정하였으며 올진 3,4호기의 경우 가압기 압력이 2275 psia일 때 살수밸브가 열리기 시작해서 2300 psia때 완전히 열리도록 관련 설정치가 설정되어 있다. 그림 9는 가압기살수계통의 작동설점치 변화에 따른 가압기 압력에 미치는 영향을 분석한 것으로서, 그 작동시점이 2265, 2270, 2275, 2280, 2285 psia인 경우 최대 가압기 압력은 비례하여 2315.2, 2317.1, 2318.9, 2320.8, 2322.6 psia로 증가하게 되고, 따라서 정지여유도는 40.8, 38.9, 37.1, 35.2, 33.4 psi 로 감소함을 알 수 있다.

3.2 올진 3,4호기 가압기고압력 원자로정지여유도 분석 결과

올진 3,4호기 가압기고압력 원자로정지여유도 분석을 위해 상기 민감도 분석결과를 토대로 초기조건을 (1) 초기 가압기압력이 2250 psia, (2) 증기우회제어계통의 quick open 지연시간이 0.50초, (3) 터빈우회밸브 Quick opening 시간이 1.00초, (4) 증기우회제어계통 용량이 55%, (5) 원자로출력감발계통 용량이 25%, (6) 원자로출력감발 제어봉의 낙하시간이 4.0초, (7) 가압기살수계통 용량이 375 gpm, (8) 가압기 살수밸브가 2275 psia에서 열리기 시작해서 2300 psia에서 완전 열리도록 설정한 후 다음 분석을 수행하였다.

3.2.1 100% 부하상실사건 (Loss of Load)

그림 10은 올진 3,4호기의 100% 부하상실사건시 나타나는 가압기압력의 거동을 보여주고 있으며 최대 가압기 압력은 2318.9 psia가 되며 가압기고압력 원자로정지설점치 2383 psia 및 channel 오차 27 psi를 고려하면 올진 3,4호기의 가압기고압력 원자로정지여유도는 37.1 psi가 됨을 알 수 있다.

3.2.2 여러 가지 부하감발사건

그림 11은 초기 출력이 100%에서 100%, 75%, 50%, 25%만큼의 부하가 상실될 경우와 75%출력에서 부하가 완전 상실될 경우 나타나는 가압기압력의 거동을 비교한 것이다. 이 그림에 나타난 바와 같이 초기 출력 100%에서 100%, 75%, 50%, 25% 만큼의 부하감발 및 75%에서 완전부하상실인 경우 최대 가압기 압력은 순서대로 2318.9, 2286.7, 2341.0, 2325.6, 2291.7 psia가 되며 따라서 정지여유도는 37.1, 69.3, 15.0, 30.4, 64.3 psi가 되었다. 사고 발생 직후 나타나는 가압기 최대 압력은 100%출력에서 완전부하상실 경우가 가장 높게 나왔으나 원자로출력감발계통이 작동하지 않는 100%에서 50% 및 25%의 부하상실 경우는 사건 발생후 약 15초 이후에 가압기 압력이 최대가 됨을 알 수 있다.

4.0 결 론

울진 3,4호기의 가압기고압력 원자로정지여유도를 평가하기 위하여 울진 3,4호기 NSSS 설계에 사용되고 있는 최적 성능해석코드인 LTCUCN 컴퓨터 코드를 사용하여 부하상실시 최대 가압기 압력에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자들에 대한 민감도분석을 한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 초기 가압기압력, 증기우회제어계통의 quick open 신호지연시간, 터빈우회밸브의 quick opening 시간, 원자로출력감발계통의 용량, 원자로출력감발 제어봉 낙하시간, 가압기살수 작동설정치는 완전부하상실시 최대 가압기압력에 직접적인 영향을 미치는 인자였으며, 특히 현재 영광 3,4호기 시운전 결과 나타난 증기우회제어계통의 quick open 지연시간은 매우 중요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 하지만, 증기우회제어계통 및 가압기살수계통의 용량은 최대 가압기 압력에 미치는 영향이 미미한 것으로 판명되었다.
- (2) 한편, 이미 가동중인 영광 3,4호기 시운전 결과 나타난 상기 주요 인자들의 as-built 자료를 사용하여 분석해 보면, 울진 3,4호기의 경우 완전부하상실시 최대 가압기압력이 2318.9 psia로 예상되며 37.1 psi의 정지여유도를 확보할 것으로 판단된다.

Further Study

원자로출력감발계통이 있는 원자로에서는 완전부하상실사건보다 원자로출력감발계통이 동작하지 않는 부하감발사건이 최대 가압기 압력 치를 유발함을 알 수 있었다. 따라서, 원자로출력감발계통이 동작하지 않는 부하감발사건을 설계기준사고으로 선정할 후 운전여유도를 보다 더 확보할 수 있는 연구가 수행되어야 할 것이다.

5.0 참고문헌

- (1) KAERI, "Software Verification and Validation Report for LTCUCN Code", N0291-SA-VV030-00, Rev.00, Dec. 1993.
- (2) KAERI, "Performance Related Design Bases Events for UCN 3&4", N0291-SA-PB020-00, Rev.01, Feb. 1992.
- (3) U. S. NRC, "Standard Review Plan Section 5.2.2 Overpressure Protection", NUREG-0800 Rev.2, Jul. 1981.
- (4) KEPCO, "UCN 3&4 FSAR, Appendix 5A".
- (5) "NSSS System Design Contract for UCN 3&4", KHI/KRI-91-UCN 3&4.

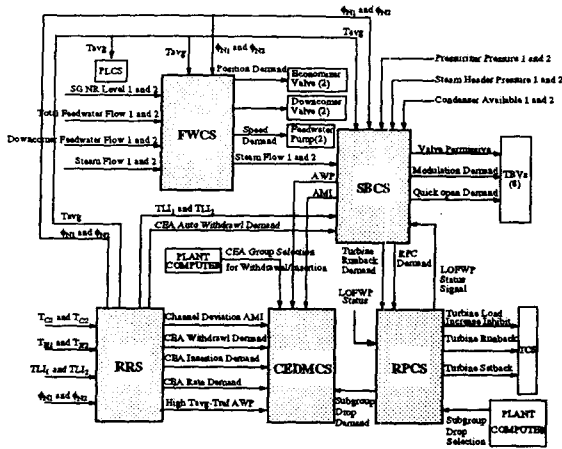


Figure 1. NSSS Control System Interface

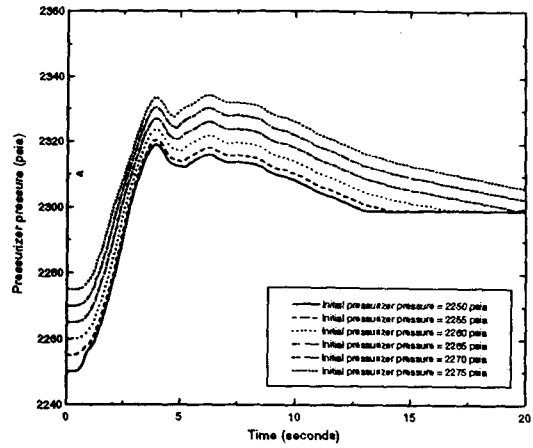


Figure 2. Pressurizer Pressure Transient during Loss-of-Load Event for Initial Pressurizer Pressure

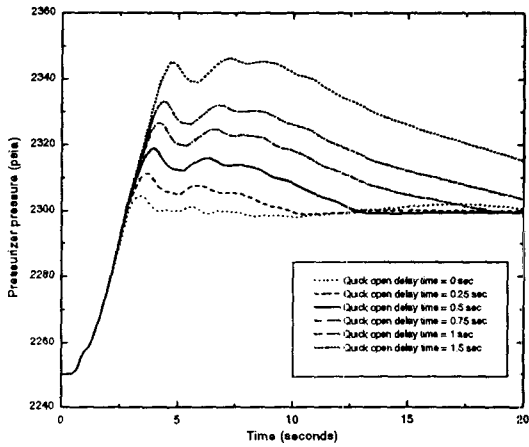


Figure 3. Pressurizer Pressure Transient during Loss-of-Load Event for Various SBCS Quick Open Delay Time

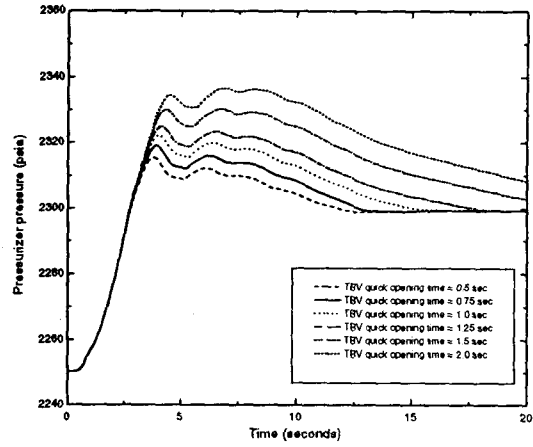


Figure 4. Pressurizer Pressure Transient during Loss-of-Load Event for Various TBV Quick Opening Time

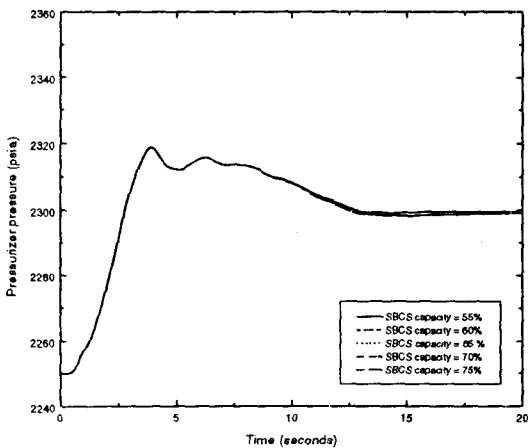


Figure 5. Pressurizer Pressure Transient during Loss-of-Load Event for Various SBCS Capacity

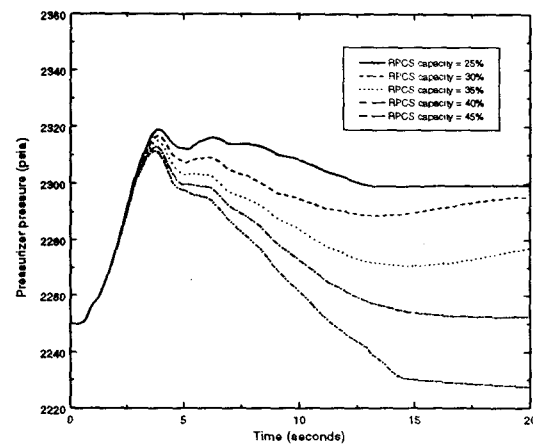


Figure 6. Pressurizer Pressure Transient during Loss-of-Load Event for Various RPCS Capacity

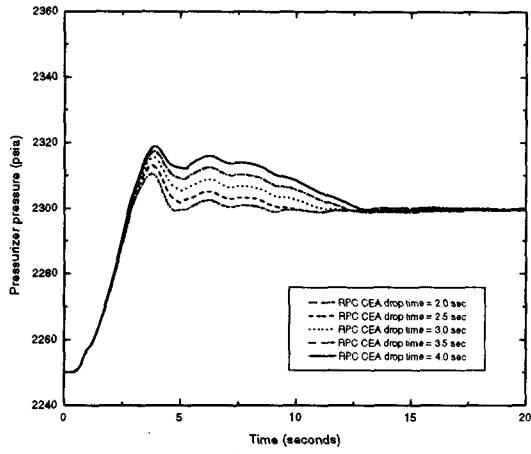


Figure 7. Pressurizer Pressure Transient during Loss-of-Load Event for Various RPC CEA Drop Time

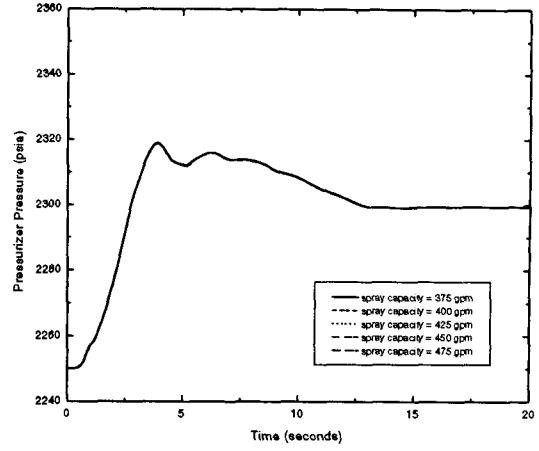


Figure 8. Pressurizer Pressure Transient during Loss-of-Load Event for Various Spray Capacity

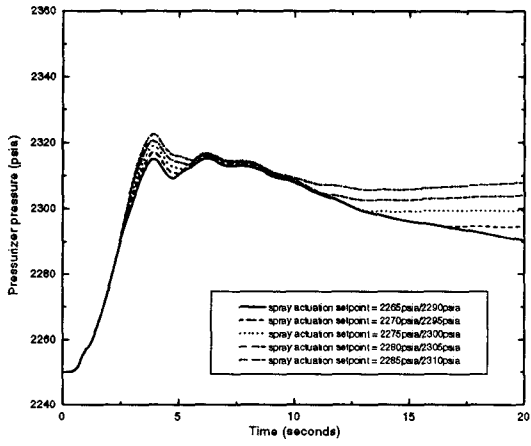


Figure 9. Pressurizer Pressure Transient during Loss-of-Load Event for Various Spray Actuation Setpoint

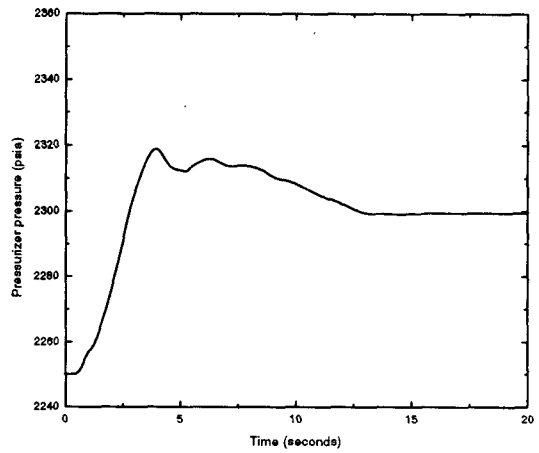


Figure 10. Pressurizer Pressure Transient during Loss-of-Load Event

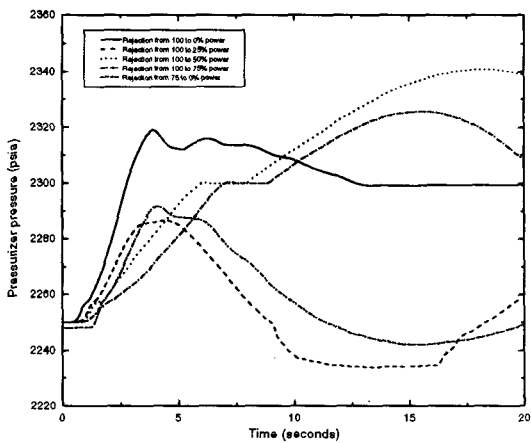


Figure 11. Pressurizer Pressure for Various Load Change