

울진 4호기 NSSS 제어계통 성능평가

The Performance Evaluation of NSSS Control System for UCN 4

손석훈, 송인호, 손종주, 최종호, 서종태

한국전력기술(주)

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

NSSS(핵증기공급계통) 제어계통은 발전소 출력운전중에 발생된 과도상태를 운전원의 조치없이 자동으로 발전소를 빠른 시간내에 안정된 상태로 복구시켜 주는 역할을 담당하고 있다. 본 논문에서는 한국형 표준원전인 울진 4호기 출력상승시험(PAT) 기간중에 수행되었던 과도상태 시험중 모든 NSSS 제어계통의 유기적인 작동을 대표적으로 관찰할 수 있는 주급수 펌프 한 대 상실시험과 부하감발시험 결과를 설계단계에서 제어논리 개발과 설정치 계산에 사용되었던 KISPAC 전산코드에 의한 모사결과와 비교 분석함으로써 NSSS 제어계통의 기능과 성능을 평가하였고 저출력 운전시의 주급수제어계통에 의한 증기발생기 수위제어 성능을 평가하였다. 그 결과 NSSS 제어계통은 적절히 설계되었으며 제어성능이 우수한 것으로 평가되었고 설계시 사용된 전산코드의 예측능력도 우수한 것으로 판명되었다.

Abstract

NSSS Control System automatically mitigates the transient conditions and leads to a stable plant condition without operator actions when the transient occurs during normal power operation. In this paper, the function and performance of NSSS control system were examined and evaluated by comparing the predicted results with the measured data for the selected events. Loss of a Main Feedwater Pump and Load Rejection to House Load Operation events were selected for the evaluation among the transient tests performed during the Power Ascension Test(PAT) of UCN unit 4. The overall schematic control actions of NSSS control system can be evaluated easily through the observation of these two typical events. The selected events were analyzed by the KISPAC computer code[1] which had been used in developing the control logic and determining the control setpoints during the plant design. Additionally, the performance of FWCS during low power operation was evaluated. The result of evaluation showed that the NSSS control system was designed properly and the performance of the NSSS control system was excellent and also the computer code had a good prediction capability.

1. 서 론

NSSS 제어계통은 주급수제어계통(FWCS), 증기우회제어계통(SBCS), 원자로출력조절계통(RRS), 원자로출력급감발계통(RPCS) 그리고, 가압기 압력/수위 조절계통(PPCS/PLCS)로 구성되어 있으며 이들 계통들은 자

동운전 모드하에서 5%/min 부하경사(ramp)변화 및 10% 부하단계(step)변화, 임의의 크기의 부하감발, 주급수펌프 2대 운전중 1대 상실, 기타 성능관련설계기준사건(PRDBE) 등과 같은 발전소 과도상태시 주요 제어 변수를 신속히 안정화시켜줌으로써 운전원들이 여타 이상상태 확인 및 조치업무에 전념할 수 있도록 하며 궁극적으로는 다음과 같은 허용기준을 만족시키며 발전소를 안정화시킬 수 있어야 한다.

- (1) 발전소 보호계통(PPS)이나 다양성 보호계통(DPS)이 원자로정지를 유발시키지 않는다.
- (2) 공학적안전설비(ESF)가 동작되지 않는다.
- (3) 1차측과 2차측의 안전밸브가 개방되지 않는다.
- (4) 운영기술지침서(Technical Specification)를 위배하지 않는다.

본 논문에서는 한국형 표준원전인 울진 4호기 출력상승시험 기간중에 수행되었던 주요 과도상태 시험중 모든 제어계통의 유기적인 작동을 관찰할 수 있는 대표적인 시험인 주급수펌프 한 대 상실시험[3]과 부하감발시험[2,4]을 관찰대상으로 선정하였다. 동 시험들은 각각 1999년 3월 5일과 3월 6일에 상기 허용기준을 만족하면서 성공적으로 수행되었다. 만약, 위의 시험동안 NSSS 제어계통과 관련 기기들의 적절한 동작이 없었다면 원자로는 가압기 고압력이나 증기발생기 저수위/고수위에 의하여 정지되었을 것이다. 본 논문에서는 먼저 NSSS 제어계통을 소개하였고, 다음으로 위에서 선정한 성능관련설계기준사건의 시험결과와 울진 3,4호기 설계단계에서 제어계통의 논리 개발과 제어설정치 계산에 사용되었던 KISPAC 전산코드로 동 사건들을 모사한 결과를 비교 분석함으로써 동 설계기준사건중에 NSSS 제어계통의 역할과 성능을 평가하였고 아울러 울진 3,4호기 설계에 사용된 KISPAC 전산코드의 성능을 검증하였다. 또한, 저출력 운전시 FWCS에 의한 증기발생기 수위제어 능력을 평가하였다.

2 NSSS 제어계통

2.1 주급수제어계통 (FWCS)

주급수제어계통의 주된 기능은 5%에서 100% 출력 운전사이에서 증기발생기 Downcomer 수위를 자동으로 제어하는 것이다. 주급수제어계통은 원자로 출력 20%이상의 고 출력 영역에서는 증기발생기 수위, 주급수유량 및 주증기유량의 3가지 변수를 제어입력 신호로 사용하여 제어신호인 유량요구신호(Flow Demand Signal)를 발생시키는 3요소(3-element)제어기법이 사용되고 반면에 원자로출력 20% 이하인 저 출력 영역에서는 주급수유량 및 주증기유량의 낮은 신뢰도로 인하여 증기발생기 수위만을 입력으로 하여 유량요구신호를 발생시키는 1요소(1-element) 제어기법이 사용되고 있으며 발생된 유량요구신호에 따라 주급수펌프 속도, Economizer 및 Downcomer 급수조절밸브가 조절됨으로써 증기발생기 수위를 제어하도록 설계되어져 있다. 저출력 제어모드에서는 Economizer 급수조절밸브는 닫혀있고 주급수펌프 속도 설정치 값은 최저값으로 유지되도록 프로그램 되어있어 실제적인 급수유량 조절기능은 Downcomer 급수조절밸브에 의하여 이루어지며 고출력 제어모드에서는 Downcomer 급수조절밸브는 전체 급수유량의 약 10%를 통과시킬 수 있는 개도로 고정되고 급수유량 조절기능은 Economizer 급수조절밸브와 주급수펌프 속도에 의하여 이루어진다.

그러나, 울진 4호기의 경우, 원자로 출력 13% 이상에서 3요소제어가 가능하도록 설정치를 변경하였다. 그 결과 Turbine Rolling이나 계통병입시에 더욱 안정된 증기발생기 수위 자동제어가 가능하여 운전원의 부담이 현격히 경감되었으며 운전원은 계통병입등의 업무에 전념할 수 있었다.

2.2 증기우회제어계통 (SBCS)

증기우회제어계통은 출력운전중 터빈정지등의 부하감소시 RPCS와 조화를 이루어 원자로 정지없이 1

차계통과 2차계통의 에너지 평형상태를 유지하는 역할을 수행한다. 원자로출력과 터빈출력 사이에 차이가 날 경우 총 8개의 터빈우회밸브를 적절히 작동시켜 원자로출력과 부하사이의 불일치되는 잉여에너지를 방출한다. 작동모드는 부하감소의 정도에 따라 Quick open 모드와 Modulation 모드가 있다. Modulation 모드는 비교적 작은 과도상태시 주증기 헤더압력이 프로그램된 설정치보다 높을 경우 터빈우회밸브를 조절하여 증기를 방출하는 작동모드이다. Quick open모드는 부하상실등 큰 과도상태 발생시 주증기유량의 감소량에 따라 Quick open 신호를 발생시킨다. Quick open 신호는 Modulation 신호를 우선(Override)하게 되며 그룹 X와 그룹 Y로 나뉘어져 있는 터빈우회밸브를 부하감소의 양에 따라 순차적으로 열게 된다.

2.3 원자로출력조절계통 (RRS)

NSSS는 감속재 온도계수와 도플러 계수로 인한 부반응도 궤환효과로 인하여 고유의 부하추종 특성을 지니고 있다. 그러나, 이들 계수들의 크기는 노심주기에 따라 변하게 되며 노심초기와 노심말기에 동일 부하변화에 대하여 일차측 온도와 이차측의 효율이 상당히 다르게 변화된다. 따라서, 원자로 출력조절계통은 냉각재 평균온도를 터빈부하의 함수로 프로그램된 기준온도 설정치와 일치하도록 유지시킴으로써 터빈 부하변화에 따라 원자로 출력을 조절하는 역할을 한다. 원자로 출력계통은 TLI(Turbine Load Index, 터빈 1단 압력계기에 의해서 발생하는 선형 출력신호), 냉각재 평균온도, 그리고 원자로 출력을 입력으로 받아 제어봉구동장치제어계통(CEDMCS)에 제어봉 삽입이나 인출요구 신호, 제어봉 구동속도 요구신호, AMI(Automatic Motion Inhibit) 신호를 발생시킨다.

2.4 원자로출력감발계통 (RPCS)

원자로출력감발계통은 운전중인 2대의 주급수펌프 중 1대 상실이나 대규모 부하상실시에 SBCS와 더불어 발전소 보호계통 또는 안전밸브의 작동없이 NSSS를 적정출력에서 안정시키기 위해 설계되었다. 원자로출력감발계통에 의해 삽입될 제어봉 그룹은 발전소 전산계통의 제어봉 선택 알고리즘에 의해 자동적으로 선택된다. 원자로출력감발계통이 작동한 후에 원자로 출력이 터빈출력보다 클 경우에는 1차측의 온도와 압력이 올라가게 되는데 이는 SBCS와 RRS에 의해 조절되어 2차측 출력과 평형을 이루게 된다. 만약, 원자로출력감발계통이 작동한 후 원자로출력이 터빈출력보다 낮을 경우에는 1차측 온도 및 증기발생기 압력이 감소하게 되고, 이에 따라 SBCS내의 터빈 runback 논리회로가 작동되어 추가적인 2차측 출력 감발이 이루어짐으로써 1차측 및 2차측 출력은 균형을 이루게 된다.

2.4 가압기압력제어계통 (PPCS)

가압기는 냉각재 평균온도의 변화에 의한 밀도변화에 따라 증가 혹은 감소하는 냉각재 부피를 수용하는 완충탱크의 역할을 한다. 냉각재 평균온도가 낮아져서 체적이 감소하면 가압기에서 유출(outsurge)이 발생하고 상대적으로 증기영역이 팽창되어 가압기 압력이 감소하게 된다. 반대로 냉각재 온도가 높아지면 냉각재가 팽창되어 가압기로 유입(insurge)되고 가압기 내부에 있는 증기가 압축되어 가압기압력은 상승한다. 가압기압력제어계통은 압력 과도상태시에 가압기 압력을 기 설정된 압력설정치(2250psia)로 제어하기 위하여 가열기 및 가압기 살수유량을 적절히 조절하도록 설계되어 있다. 따라서, 이러한 가압기 고유 역할에 따른 압력변화를 최소화하기 위하여 가압기압력제어계통이 설계되었다.

2.4 가압기수위제어계통 (PLCS)

가압기수위제어계통은 화학 및 체적제어계통의 충전유량과 유출유량을 제어함으로써 가압기 수위를 적절히 제어한다. 냉각재 평균온도가 낮아져서 체적이 감소하면 가압기에서 유출(outsurge)이 발생하고 가압기 수위가 감소하게 된다. 반대로 냉각재 온도가 높아지면 냉각재가 팽창되어 가압기로 유입(insurge)되어 가압기 수위는 상승하게 된다. 가압기수위제어계통은 이러한 냉각재 온도변화에 따른 냉각재 체적변

화와 수위과도상태를 수용하기 위하여 증전펌프 운전대수와 유출조절밸브를 제어한다.

NSSS 제어계통들은 서로 신호를 주고 받으면서 유기적으로 동작하게 된다. 그림 1은 제어계통들 간의 이러한 신호연계를 도식화한 것이다.

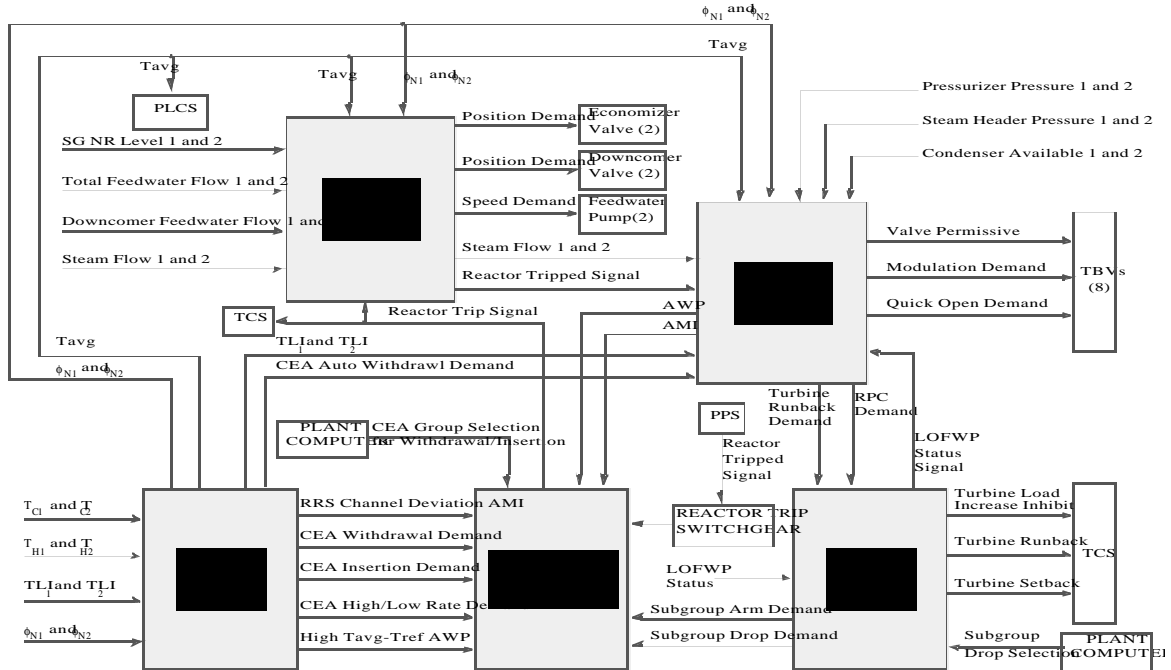


그림 1. NSSS 제어계통 간의 신호연계

3. 발전소 과도상태시 NSSS 제어계통의 역할 및 성능

본 절에서는 NSSS 제어계통 성능평가를 위하여 선정된 물진 4호기 주급수펌프 한 대 상실시험과 부하감발 시험결과를 KISPAC 전산코드로 모사한 결과와 비교 분석함으로써 모든 NSSS 제어계통들의 사건추이에 따른 역할을 파악하고 제어계통의 성능과 설계시 사용된 KISPAC 전산코드의 예측능력을 평가하였다. 아울러, 저출력 운전시 주급수제어계통에 의한 증기발생기 수위제어능력도 평가하였다.

3.1 주급수펌프 한 대 상실(LOMFP)

주급수펌프 한 대 상실사건은 주급수펌프 두 대가 운전되는 100% 출력운전 중에 한 대의 펌프가 갑자기 정지하는 경우로써 NSSS 제어계통의 신속한 동작이 없으면 증기발생기 저수위로 인한 원자로 정지가 일어나게 된다.

주급수펌프 정지가 발생되면 RPCS에서 주급수펌프 정지신호를 수신하여 즉각적으로 원자로 출력급감발 신호와 터빈 Setback 신호를 발생시키게 된다. 이때 발생한 출력급감발 신호를 CEDMDS에서 수신하여 발전소 전산계통의 제어봉 선택 알고리즘에 의해 자동으로 기 선택된 제어봉 그룹을 노심으로 삽입함에 따라 원자로출력은 그림2에서와 같이 급감발된다. 그리고, 터빈제어계통에서는 터빈 Setback 신호를 수신하여 터빈출력을 초당 10%의 비율로 60%까지 급감발시킨다(그림6). 또한, 주급수펌프 한 대 상실에 따른 급수유량 감소(그림9)와 터빈 Setback에 따른 증기유량 감소(그림9)에 의하여 유량편차가 증가(그림9)하게 되며 동시에 터빈 Setback에 따른 증기발생기 압력증가(그림7)로 인한 수축현상에 의해 수위편차

도 증가(그림8)하게 되어 FWCS는 주급수펌프 속도와 Economizer 급수조절밸브 개도를 증가시키게 된다.

이상과 같이 주급수펌프 상실사건에 따른 즉각적인 제어동작이 완료되면, 터빈출력과 원자로출력의 평형을 유지하기 위하여 RRS에서는 제어봉 삽입요구신호를 CEDMCS에 보내고 PLCS는 원자로출력 감발로 인해 원자로냉각재 평균온도(그림3)가 낮아짐에 따라 유출유량을 늘려 가압기수위를 설정치에 유지시키고(그림5) TCS는 터빈 Setback후에 SBCS로부터 Runback 신호를 받아 터빈을 144%/hr의 비율로 터빈출력을 48%까지 낮추고(그림6) SBCS는 증기발생기 압력제어를 위해 Modulation 모드로 터빈우회밸브를 열기 시작한다. 또한, 주급수펌프는 총 요구급수유량의 65%정도의 유량을 낼 정도로 승속한 후 증기발생기 수위는 약간의 overshoot후 안정된다(그림8), PLCS는 원자로 냉각재 평균온도가 낮아짐에 따라 유출유량을 줄여 가압기 수위를 설정치에 유지시키고(그림5) PPCS는 가압기 가열기와 살수를 이용해서 가압기압력을 2250 psia에 유지시킨다(그림4).

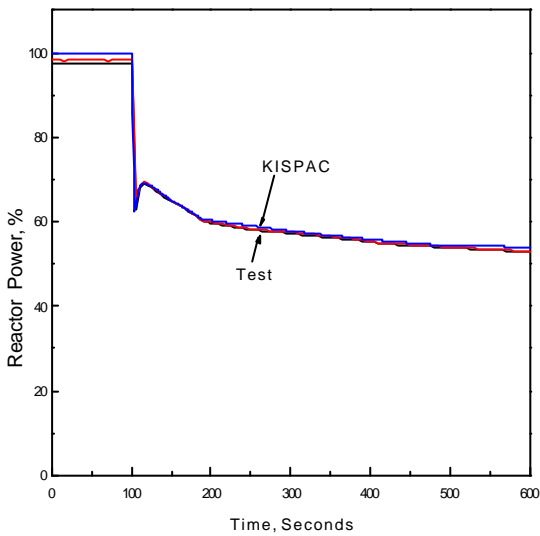


그림 2. 급수펌프 상실시 원자로출력

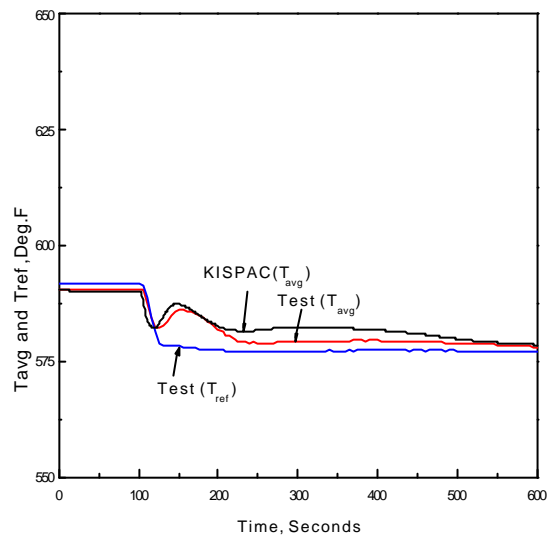


그림 3. 급수펌프 상실시 원자로냉각재 평균온도

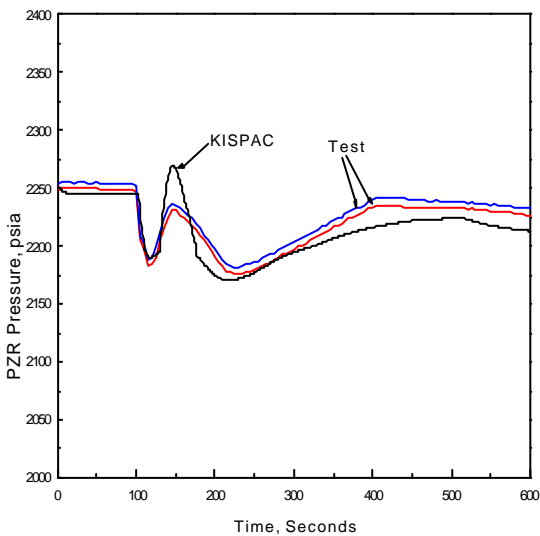


그림 4. 급수펌프 상실시 가압기 압력

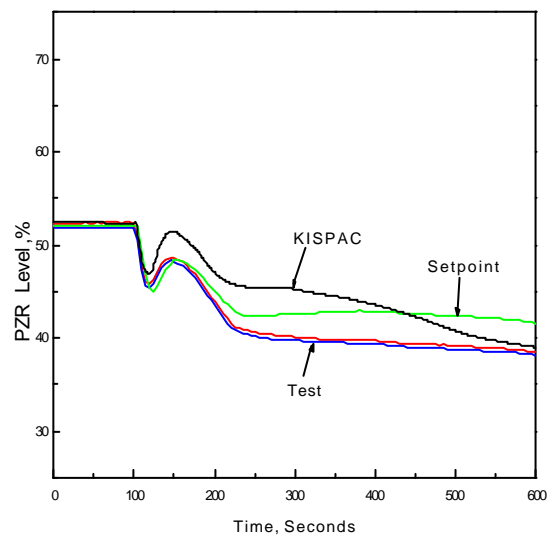


그림 5. 급수펌프 상실시 가압기 수위

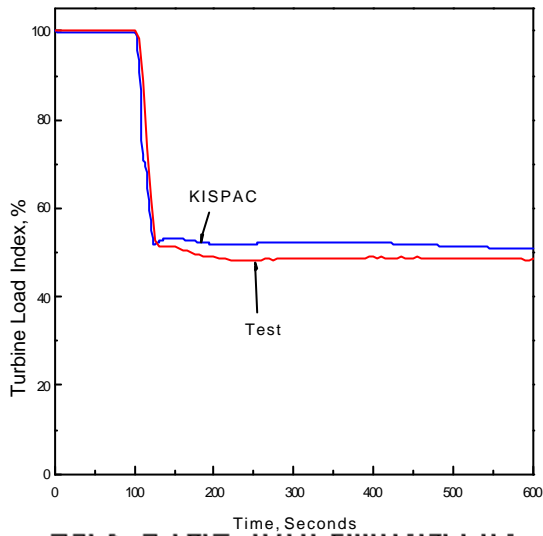


그림 6. 급수펌프 상실시 터빈부하지수신호

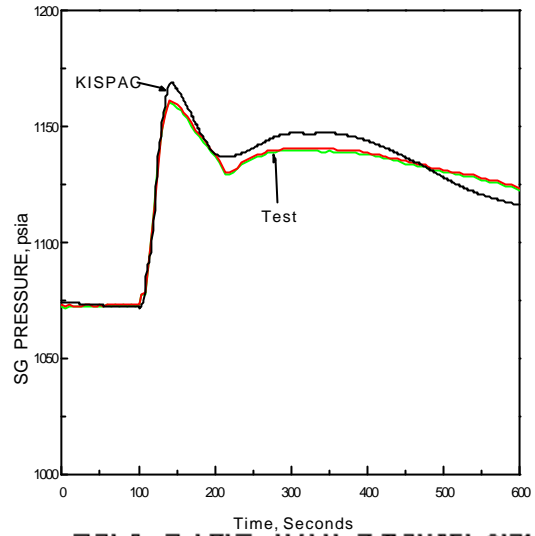


그림 7. 급수펌프 상실시 주증기헤더 압력

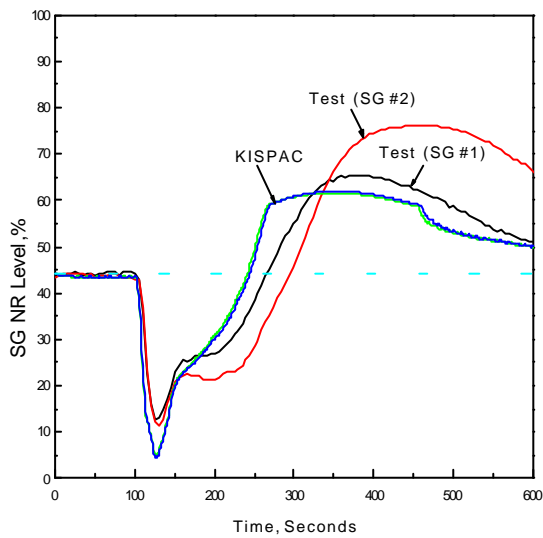


그림 8. 급수펌프 상실시 증기발생기 수위

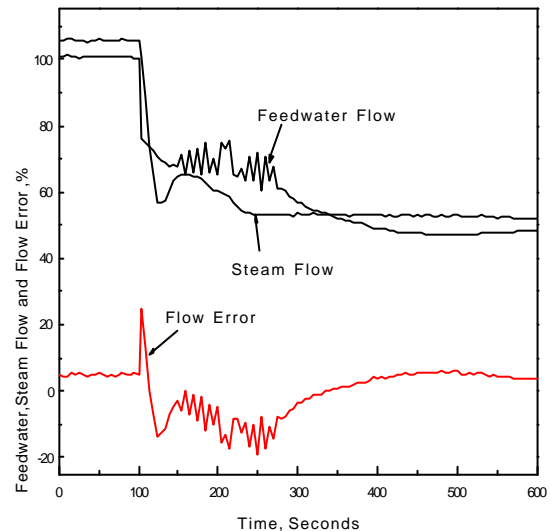


그림 9. 급수펌프 상실시 유량편차신호

3.2 부하탈락 (Load Rejection to House Load Operation)

정상운전중 전력계통의 문제로 주차단기가 개방되는 경우로써 NSSS 제어계통과 터빈제어계통의 신속한 동작이 없으면 가압기 고압력이나 증기발생기 저수위로 인한 원자로 정지 혹은 터빈 과속도에 의한 터빈정지가 발생된다.

부하탈락사건이 발생하면, 터빈출력은 터빈제어계통의 PLU(Power Load Unbalance)신호에 따라 소내 부하로 급감발되고(그림14) SBCS에서는 주증기유량의 급격한 감소(그림17)를 감지하여 터빈우회밸브 개방을 위한 Quick open 요구신호를 발생시키고 발생된 Quick open 신호에 의하여 터빈우회밸브가 1초이내에 개방되어 증기발생기 압력상승을 완화하게 된다(그림15). SBCS의 용량을 초과하는 부하감소의 경우 RPCS에 출력급감발 요구신호를 보내게 된다. RPCS는 SBCS로부터 출력급감발 요구신호를 받아 CEDMCS에 원자로 출력감발신호를 발생시키면 선택된 제어봉 그룹이 노심으로 낙하하여 원자로출력은

급감발하게 된다(그림10). 한편, 터빈으로의 증기유량이 감소됨에 따라 급수유량과 증기유량의 유량편차가 감소(그림17)하게 되며 증기발생기 압력은 급격히 상승(그림15)하게 된다. 압력상승에 의한 수축현상으로 인해 증기발생기 수위는 급격히 줄어들어 수위편차 또한 증가(그림16)하게 된다. FWCS는 이러한 편차들을 입력으로 하여 주급수펌프 속도와 Economizer 급수조절밸브 개도를 조절하게 된다. 또한, 일차측에서 이차측으로의 열전달 감소로 인해 가압기 압력은 상승하게 되며 PPCS는 살수조절밸브를 열고 비례가열기를 비여자시켜서 가압기 압력증가를 둔화시키게 된다(그림12).

이상과 같이 부하탈락사건에 따른 제어시스템의 즉각적인 제어동작이 완료되면 1차측 출력과 2차측 출력의 평형을 유지하기 위하여 RRS는 터빈출력과 원자로출력의 평형을 유지하기 위하여 CEA 삽입요구신호를 CEDMCS로 보내며 SBCS는 초기 Quick open이후의 증기발생기 압력제어를 위해 Modulation 모드로 터빈후회밸브를 열기 시작한다. 한편, 증기발생기 수위는 약간의 Overshoot 후 FWCS의 제어에 의하여 설정치에 안정된다(그림16). 또한, PLCS는 원자로냉각재 평균온도가 낮아짐(그림11)에 따라 유출유량을 줄여 가압기수위를 설정치에 유지시키고(그림13) PPCS는 가압기압력을 2250 psia에 유지시키기 위해 가압기 가열기와 살수를 조절한다(그림12).

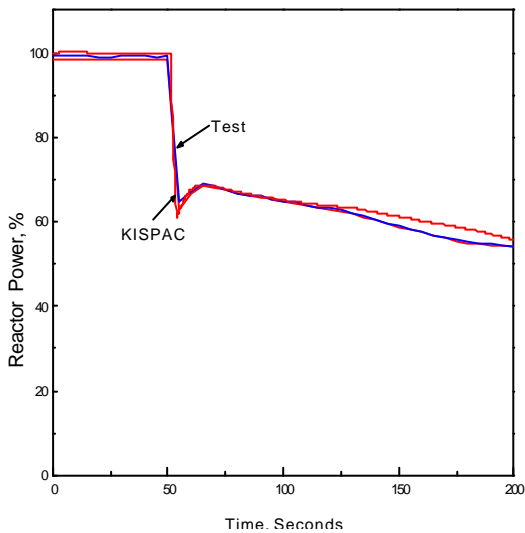


그림 10. 부하탈락시 원자로출력

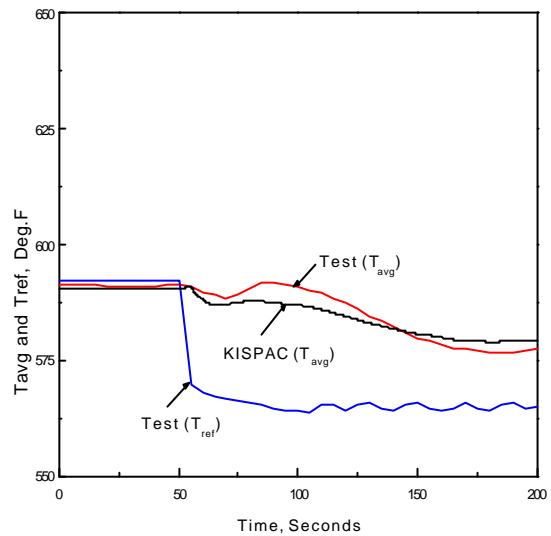


그림 11. 부하탈락시 원자로냉각재 평균온도

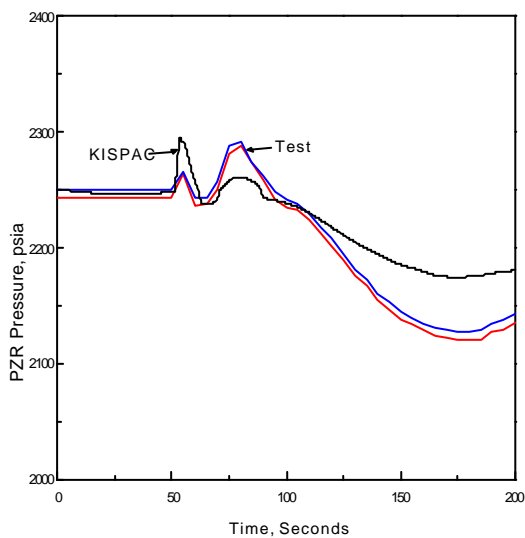


그림 12. 부하탈락시 가압기 압력

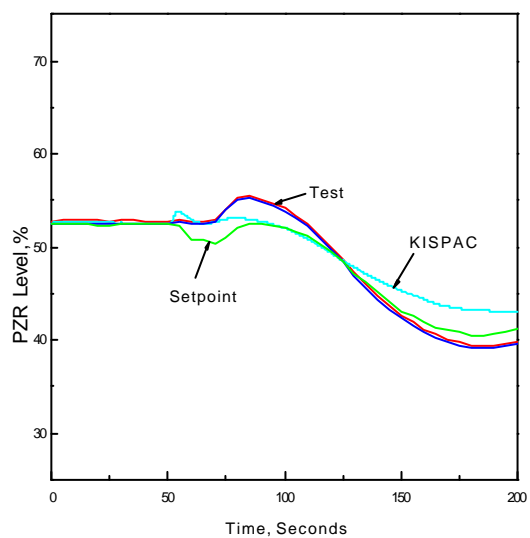


그림13. 부하탈락시 가압기 수위

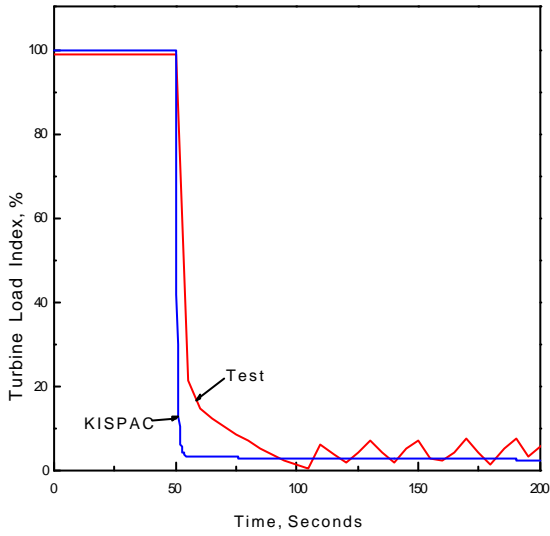


그림 14. 부하탈락시 터빈부하지수신호

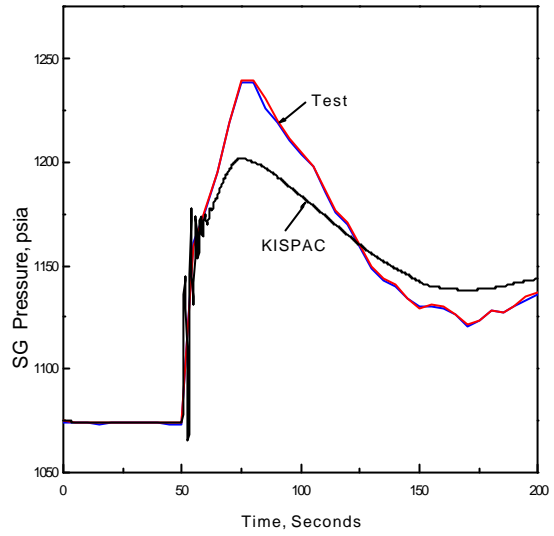


그림 15. 부하탈락시 주증기헤더 압력

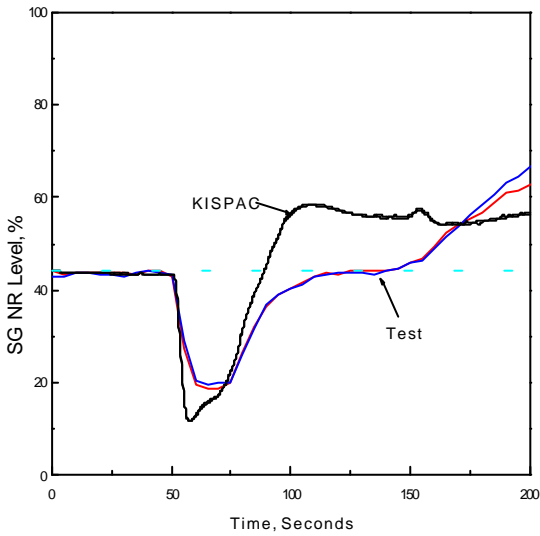


그림 16. 부하탈락시 증기발생기 수위

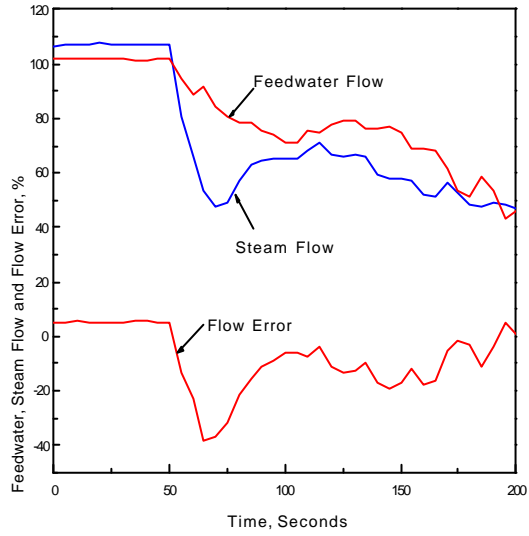


그림 17. 부하탈락시 유량편차신호

3.3 저출력 운전시 증기발생기 수위제어

저출력시 증기발생기 수위는 일반적으로 낮은 급수온도에 의한 증기발생기 고유의 열수력학적 동특성 (Shrink 및 Swelling현상)으로 인하여 수위의 안정적인 제어가 쉽지 않으며 안정적인 수위제어를 위하여 운전원은 많은 노력을 기울이고 있으나 실제로 저출력시 불안정한 증기발생기 수위로 인한 원자로정지 사례가 적지 않게 보고되고 있다. 따라서, 저출력시 안정적인 증기발생기 수위 자동제어를 위하여 한국표준원전인 물진 3,4호기 설계과정에서 최적의 설정치 계산을 위하여 많은 노력을 기울였으며 또한, 시운전 과정에서 현장 조정을 통하여 안정적인 자동수위제어가 가능하도록 하였다. 특히, 현장 조정 과정에서 기존의 20% 출력에서부터 적용되던 3요소제어를 13% 출력부터로 현장 적용하였으며 급수유량과 증기유량

의 낮은 신뢰도로 인한 주급수제어시스템의 오동작을 막기 위해 유량 10%이하에서는 일정한 값이 주급수 제어시스템의 입력으로 사용되게 하였다. 그림 19는 현장에서 17% 출력에서부터 3요소제어가 가능하도록 조정한 후 출력을 상승(그림18)시킬때의 수위변화를 보여주고 있다. 정확히 17%부터 시작하지 않는 이유는 125%출력을 100%로 환산한 값이 설정치로 제어시스템에 설치되는데 소숫점 2째자리 이하는 절사되기 때문이다. 약 2800초경부터 3요소제어의 특징인 톱니바퀴 모양의 수위가 나타나고 있음을 볼 수 있으며 저출력시 주급수제어시스템의 제어목표인 수위설정치 $\pm 5\%$ 보다 더 나은 수위설정치 $\pm 2\%$ 이내로 수위가 안정되고 있음을 볼 수 있다.

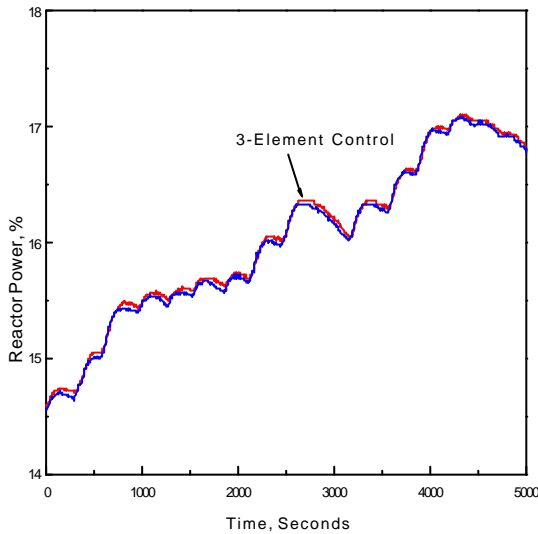


그림 18. 몰진4호기 저출력운전시 원자로출력

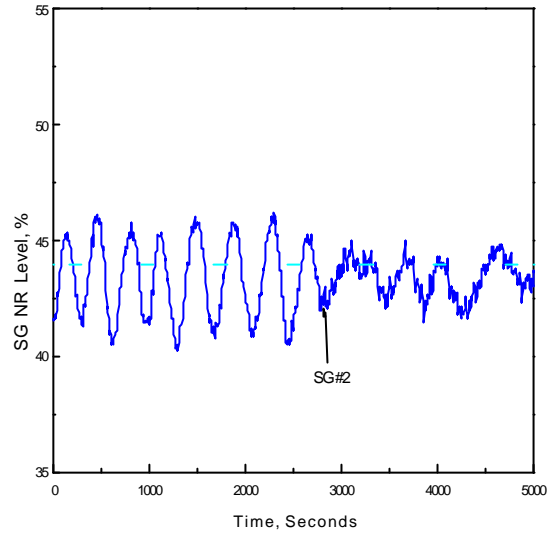


그림 19. 몰진4호기 저출력운전시 증기발생기 수위

이상에서 몰진4호기 출력상승시험 결과와 KISPAC 전산코드로 모사한 결과를 비교 분석한 결과 몰진4호기 NSSS 제어시스템은 적절히 설계되었으며 시험과정에서도 그 성능이 매우 양호한 것으로 입증되었다. 또한, 설계시 사용한 KISPAC 전산코드의 예측능력도 매우 우수한 것으로 판명되었다.

4. 결 론

한국표준원전의 NSSS 제어시스템은 주급수펌프 한 대 상실사건과 부하감발사건시의 급격한 과도상태에서도 매우 우수한 성능을 발휘하였으며 몰진 4호기의 경우 NSSS 제어시스템과 기기들의 적절한 동작으로 출력상승 시험 기간중 단 한번의 원자로 물시정지도 없이 성공적으로 수행될 수 있었다. 향후 정상운전중에 성능관련 설계기준사건이 발생하더라도 NSSS 제어시스템의 검증된 성능으로 인하여 발전소는 원자로 정지없이 안정될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 저출력시 주급수제어시스템의 적절한 설정치 설계 및 조정에 의하여 저출력 운전시에도 보다 안정적인 운전이 가능하게 되었고 운전원의 부담을 경감시키게 되었다. 아울러 설계 전산코드의 신뢰성이 확인되어 후속호기 설계시 신뢰성 높은 설계가 가능하리라 기대된다.

참고문헌

- [1] 한국전력기술 : Technical Manual for KISPAC, Rev. 0, 1999.
- [2] S. W. Sohn, et al., "Evaluation of Load Rejection to House Load Test at 100% Power for UCN 3", *Proc. of the KNS Fall Meeting*, Seoul, Korea, October (1998).
- [3] S. W. Sohn, et al., "Evaluation of Loss of a Main Feedwater Pump Test for UCN 3", *Proc. of the KNS Fall Meeting*, Seoul, Korea, October (1998).
- [4] J. J. Sohn, et al., "Evaluation of Load Rejection to House Load Test at 100% Power for YGN 4" *Proc. of the KNS Autumn Meeting*, Seoul, Korea, October (1995).
- [5] 손석준 외3명, "올진 3,4호기 가압기고압력 원자로정지여유도 민감도 분석", *Proc. of the KNS Spring Meeting*, Cheju, Korea, May (1996).