

영광 5호기 NSSS 제어계통 성능평가

The Performance Evaluation of NSSS Control System for YGN 5

손석훈, 송인호, 김신환, 손종주, 서종태

한국전력기술(주)

대전광역시 유성구 덕진동 150

곽택헌, 이두영

한국수력원자력(주)

요 약

NSSS(핵증기공급계통) 제어계통은 발전소 출력운전중에 발생된 과도상태를 운전원의 조치없이 자동으로 발전소를 빠른 시간내에 안정된 상태로 복구시켜 주는 역할을 담당하고 있다. 본 논문에서는 영광 5호기 출력상승시험(PAT) 기간중에 수행되었던 과도상태 시험중 모든 NSSS 제어계통의 유기적인 작동을 대표적으로 관찰할 수 있는 주급수 펌프 한 대 상실시험과 부하탈락시험을 선정하여 그 결과를 설계단계에서 제어논리 개발과 설정치 계산에 사용되었던 KISPAC 전산코드에 의한 모사결과와 비교 분석함으로써 NSSS 제어계통의 기능과 성능을 평가하였다. 그 결과 NSSS 제어계통은 적절히 설계되었으며 제어성능이 우수한 것으로 평가되었다. 또한, 전산코드 모사결과는 몇 가지 차이를 제외하고는 실제 발전소 거동을 잘 모사하고 있는 것으로 평가되었다.

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 YGN unit 5 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 YGN unit 5. The overall schematic control actions of NSSS control system can be evaluated 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. 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 code simulation well predicted real plant response except some differences.

1. 서론

NSSS 제어계통은 주급수제어계통(FWCS), 증기우회제어계통(SBCS), 원자로출력조절계통(RRS), 원자로출력급감발계통(RPCS) 그리고, 가압기 압력/수위 조절계통(PPCS/PLCS)으로 구성되어 있다. 이들 제어 계통들은 자동운전 모드하에서 발전소 과도상태 발생시 주요 변수들을 제어하여 발전소를 안정화시킨다. 한국표준원전 설계에 고려되는 과도상태로는 5%/min 부하경사(ramp)변화 및 10% 부하단계(step)변화, 임의의 크기의 부하감발, 주급수펌프 2대 운전중 1대 상실, 기타 성능관련설계기준사건(PRDBE) 등과 같은 사건들이 있으며 제어계통들은 궁극적으로 이러한 과도상태하에서 다음과 같은 허용기준을 만족시키며 발전소를 안정화시킬 수 있는 능력을 보유하고 있어야 한다.

- (1) 발전소 보호계통(PPS)이나 다양성 보호계통(DPS)이 원자로를 정지시키지 않는다.
- (2) 공학적안전설비(ESF)가 동작되지 않는다.
- (3) 1차측과 2차측의 안전밸브가 개방되지 않는다.
- (4) 최종적으로 운전제한치 이내로 계통을 안정화 시킨다.

과도상태 발생시 발전소의 과도상태를 신속히 완화시키고 발전소를 안정화시키기 위해서는 NSSS 제어계통 설정치들을 최적화 시켜야 한다. 설정치 최적화를 위해 설계단계에서는 KISPAC 전산코드를 이용하여 제어계통 변수들에 대한 민감도 분석을 수행하게 된다. KISPAC 전산코드는 최적화된 제어계통 설정치 선정을 위해 설계에 사용되는 전산코드으로써 영광 5,6호기 설계개선 사항들이 모두 반영되어있다. 영광 5,6호기 설계개선 사항은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 화학 및 체적제어계통(CVCS)이 유출조절밸브와 증전펌프에 의한 제어방식으로부터 유출수 Orifice 격리밸브와 원심펌프 및 증전조절밸브를 통한 제어방식으로 바뀐 것이다. 둘째로 NSSS 제어계통들의 하드웨어가 한 단계씩 업그레이드가 되었다. 즉, Analog 제어방식인 Foxboro Spec. 200 하드웨어를 사용하던 PPCS와 PLCS는 Digital 제어방식인 Foxboro Spec. 200 micro로 바뀌었으며 Digital 제어방식이던 RRS, FWCS 그리고, SBCS는 PLC(Programmable Logic Controller)의 Omron CV500으로 하드웨어가 업그레이드 되었다. 하드웨어 업그레이드로 인한 제어논리의 변경은 없었으며 NSSS 제어계통들이 참조발전소와 동일한 성능을 갖도록 관련 소프트웨어들이 작성되어졌다. 제어논리 변경이 없었으므로 이로 인한 전산코드 변경은 없었다.

KISPAC 전산코드를 이용한 민감도 수행 결과로 얻어지는 최종 설정치들은 발전소 제어계통에 설치되어진다. 따라서, 설정치 선정에 사용된 전산코드로 모사한 과도상태 결과와 실제 발전소의 과도상태 거동을 비교해서 전산코드가 실제 발전소 거동을 잘 모사하고 있다는 사실이 검증된다면 발전소에 설치되어 있는 제어계통 설정치들은 최적화 된 상태임을 확인할 수 있게 된다. 따라서, 본 논문에서는 비교적 심각한 과도상태를 유발하는 주급수펌프 한 대 상실시험[3]과 부하감발 시험[2,4]을 관찰대상으로 선정하여 KISPAC 전산코드 모사결과와 실제발전소 거동을 비교하여 KISPAC 전산코드의 성능을 검증하였다. 이 두 시험들은 영광 5호기 출력상승시험 기간중에 수행되었던 주요 과도상태 시험중 모든 제어계통의 유기적인 작동을 관찰할 수 있는 대표적인 시험으로 각각 2002년 2월 19일과 4월 30일에 상기 허용기준을 만족하면서 성공적으로 수행되었다. 만약, 위의 시험동안 NSSS 제어계통과 관련 기기들의 적절한 동작이 없었다면 원자로는 가압기 고압력 이나 증기발생기 저수위/고수위에 의하여 정지되었을 것이다. 본 논문에서는 먼저 NSSS 제어계통을 소개하고, 다음으로 위에서 선정한 두 시험들의 시험결과와 KISPAC 전산코드 모사결과를 비교 분석함으로써 영광 5호기 NSSS 제어계통의 역할과 성능을 평가하였다.

2. NSSS 제어계통

2.1 주급수제어계통 (FWCS)

주급수제어계통의 주된 기능은 5%에서 100% 출력 운전사이에서 증기발생기 Downcomer 수위를 제어하는 것이다. 주급수제어계통은 원자로 출력 15%이상의 고 출력 제어모드에서는 증기발생기 수위, 주급수유량 및 주증기유량의 3가지 변수를 제어입력 신호로 사용하여 제어신호인 유량요구신호(Flow Demand Signal)을 발생시키는 3요소(3-element)제어기법이 사용되는 반면에 원자로출력 15% 이하인 저 출력 제어모드에서는 주급수유량 및 주증기유량의 낮은 신뢰도로 인하여 증기발생기 수위만을 입력으로 하여 유량요구신호를 발생시키는 1요소(1-element) 제어기법이 사용되고 있다. 발생한 유량요구신호는 주급수펌프 속도, Economizer 및 Downcomer 급수조절밸브 요구신호들을 생성하며 생성된 각 급수기기들의 요구신호들은 해당 급수기기들을 조절해 증기발생기 수위를 제어하게 된다.

원자로 출력 20% 이하의 저출력 영역에서는 Economizer 급수조절밸브는 닫혀있고 주급수펌프 속도 설정치 값은 최저값으로 유지되도록 프로그램 되어있어 실제적인 급수유량 조절기능은 Downcomer 급수조절밸브에 의하여 이루어지며 20% 출력 이상의 고출력 영역에서는 Downcomer 급수조절밸브는 전체 급수유량의 약 10%를 통과시킬 수 있는 개도로 고정되고 급수유량 조절기능은 Economizer 급수조절밸브와 주급수펌프 속도에 의하여 이루어진다.

2.2 증기우회제어계통 (SBCS)

증기우회제어계통은 출력운전중 터빈정지등의 부하감소시 RPCS와 조화를 이루어 원자로 정지없이 1차계통과 2차계통의 에너지 평형상태를 유지시켜 주는 역할을 수행한다. 이를 위해 SBCS는 원자로출력과 터빈출력 사이에 차이가 발생하는 경우 총 8개로 구성되어 있는 터빈우회밸브를 적절히 작동시켜 원자로출력과 부하사이의 불일치되는 잉여에너지를 방출하게 된다. 작동모드로는 Quick open 모드와 Modulation 모드가 있다. Modulation 모드는 비교적 작은 과도상태가 발생했을 때 주증기 헤더압력이 프로그램된 설정치보다 높을 경우 터빈우회밸브를 순차적으로 조절하여 증기를 방출하는 작동모드이다. Quick open모드는 부하상실등 큰 과도상태가 발생했을 때 주증기유량의 감소량을 감지하여 터빈우회밸브들을 급속히 열어 잉여에너지를 방출하는 작동모드이다. Quick open 신호는 Modulation 신호를 우선(Override)하게 되며 부하감소(주증기 유량 감소)의 양에 따라 급속히 열리는 밸브의 수가 결정된다. 부하 감소량이 크지 않을 경우 그룹 X에 속해있는 TBV #1에서 TBV #4까지의 밸브만 급속히 열어주게 되며 감소량이 클 경우 그룹 X뿐 만 아니라 그룹 Y에 속해있는 TBV #5에서 TBV #8까지 모든 밸브를 열어주게 된다. 또한, 감소량이 증기우회제어계통의 용량을 초과할 경우 RPCS로 원자로 출력 급감발 요구신호를 보내게 된다.

2.3 원자로출력조절계통 (RRS)

NSSS는 감속재 온도계수와 도플러 계수로 인한 부반응도 케환효과로 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 기준 온도 설정치와 일치하도록 유지시킴으로써 터빈 부하변화에 따라 원자로 출력을 조절하는 역할을 한다. 원자로 출력계통은 TLI(Turbine Load Index, 터빈 1단 압력계기에 의해서 발생되는 선형 부하지수), 냉각재 평균온도, 그리고 원자로 출력을 입력으로 받아 제어봉구동장치제어계

통(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 일/이차측 안전밸브의 작동없이 NSSS를 적정출력에서 안정시키기 위해 설계되었다. 원자로출력감발계통에 의해 삽입될 제어봉 그룹은 발전소 전산계통의 제어봉 선택 알고리즘에 의해 자동적으로 선택된다. 주급수펌프 1대 상실사건의 경우, 원자로출력감발계통이 작동한 후에 원자로 출력이 터빈출력보다 클 경우에는 1차측의 온도와 압력이 상승하게 되는데 이는 SBCS와 RRS 및 PPCS에 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 출력감발이 이루어짐으로써 1차측 및 2차측 출력은 균형을 이루게 된다.

2.5 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 고유역할에 따른 압력변화를 최소화하기 위하여 가압기압력제어계통이 설계되었다.

2.6 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 체적변화와 수위과도상태를 수용하기 위하여 유출수 Orifice isolation 밸브들과 충전조절밸브를 제어한다. 영광 5,6호기는 참조발전소인 울진 3,4호기의 유출조절밸브와 충전펌프에 의한 유출/충전유량 제어방식에서 유출수 Orifice isolation 밸브들과 원심펌프 및 충전조절밸브를 통한 유출/충전유량 제어방식으로 설계가 개선되었다.

3. 발전소 과도상태시 NSSS 제어계통의 역할 및 성능

본 절에서는 NSSS 제어계통 성능평가를 위하여 선정된 영광 5호기 주급수펌프 한 대 상실시험과 부하감발 시험결과를 KISPAC 전산코드로 모사한 결과와 비교 분석함으로써 NSSS 제어계통들의 사건추이에 따른 역할을 파악하고 제어계통의 성능과 설계시 사용된 KISPAC 전산코드의 예측능력을 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 제어시스템의 신속한 동작이 없으면 증기발생기 저수위로 인한 원자로 정지가 일어나게 된다. 그림 1은 주급수펌프 1대 상실시 제어시스템간의 신호 연계를 도식화 한 것이다.

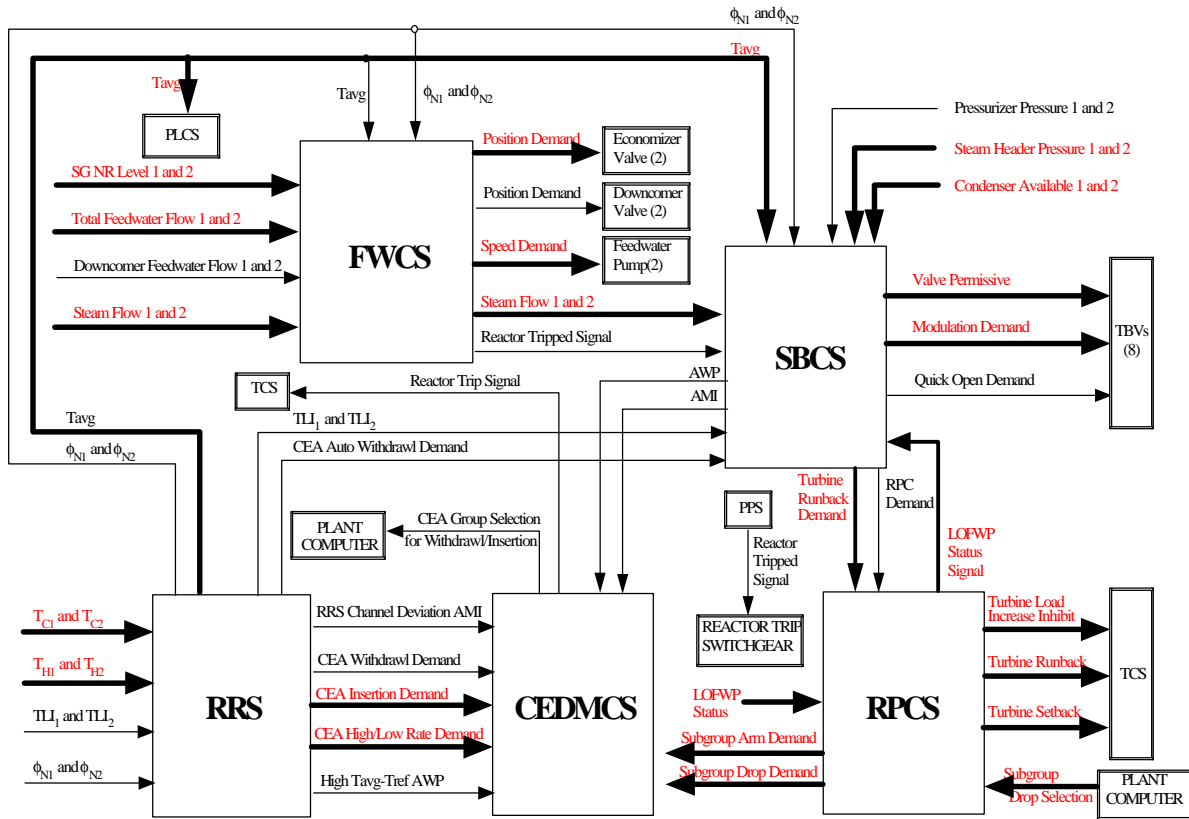


그림 1. 주급수펌프 1대 상실시 NSSS 제어시스템 간의 신호연계

주급수펌프 정지가 발생되면 RPCS에서는 주급수펌프 정지신호를 수신하여 즉각적으로 원자로 출력급감발 신호와 터빈 Setback 신호를 발생시키게 된다. 발생된 출력급감발 신호는 CEDMCS로 보내져 발전소 전산시스템의 제어봉 선택 알고리즘에 의해 자동으로 선택된 제어봉 그룹이 노심으로 삽입된다. 제어봉 그룹의 삽입에 따라 원자로출력은 그림 2에서와 같이 급감발된다. 그리고, 발생된 터빈 Setback 신호는 터빈제어시스템으로 보내져 터빈출력을 초당 10%의 비율로 60%까지 급감발시킨다 (그림 6). 이후 TCS는 터빈 Setback후에 SBCS로부터 Runback 신호를 받아 TLI신호가 60%될 때까지 터빈을 144%/min의 비율로 감소시킨다 (그림 6). 증기발생기 수위는 주급수펌프 한 대 상실에 따른 급수유량 감소와 터빈 Setback에 따른 증기발생기 압력증가(그림 7)로 인한 수축현상에 의해 협역수위 13%까지 떨어지게 된다. FWCS는 급수유량과 증기유량의 유량편차와 수위편차의 증가에 따라 주급수펌프 속도와 Economizer 급수조절밸브 개도를 급속히 증가시켜 추가적인 수위하락을 방지하고 증기발생기 수위를 설정치로 복귀시킨다 (그림 8). 이상과 같이 주급수펌프 상실사건에 따른 즉각적인 제어동작이 완료되면, RRS는 터빈출력과 원자로출력의 평형을 유지하기 위하여 제어봉 삽입요구 신호를 CEDMCS에 보내 제어봉을 삽입시킨다. 원자로냉각재 평균온도(그림 3)는 원자로출력 감발로 인해 낮아지게 된다. 냉각재 평균온도가 낮아지면 체적이 감소하여 가압기에서 유출이 발생하게 되며 가압기 수위(그림 5)와 압력(그림 4)은 감소하게 된다. PLCS는 추가적인 가압

기 수위감소를 방지하고 가압기 수위를 설정치로 복귀시키기 위해 충전유량을 증가시키고 PPCS는 가압기 가열기를 이용해 가압기압력을 설정치로 복귀시킨다. SBCS는 증기발생기 압력제어를 위해 Modulation 모드로 터빈우회밸브를 순차적으로 열기 시작한다.

그림 2에서 그림 8까지의 그림들을 보면 KISPAC 전산코드 모사결과는 다음 몇 가지 부분을 제외하고는 대체적으로 실제 발전소 거동을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 첫째, 터빈 Runback 완료 후 TLI 값은 증기발생기 압력 감소에 따라 약 120초부터 감소하고 있다. 이는 터빈 1단 증동실 압력이 증기발생기 압력에 영향을 받기 때문인데 이러한 현상으로 인해 T_{REF} 값(그림 3)도 변화하게 된다. RRS의 설정값인 T_{REF} 가 달라짐에 따라 RRS의 거동이 KISPAC 전산코드 모사와 달리 나타나게 되며 원자로 출력도 그에 따라 차이가 나게 된다(그림 2). 둘째, 증기발생기 압력증가량(그림 7)이 모사결과보다 높은 현상이 나타난다. 이는 SBCS에 의한 TBV 동작이 KISPAC 전산모사 결과보다 다소 늦기 때문에 발생하는 것으로 밝혀졌다. 그러나, TBV 동작이 늦어진 이유에 대해서는 아직 완전히 밝혀내지 못했으며 영광 6호기에서는 관련변수들을 SBCS로부터 직접 취득하여 원인을 분석할 예정이다. 마지막으로, 150초 이후 원자로 냉각재 평균온도의 감소량과 기울기가 KISPAC 전산코드에 비해 큰 현상이 나타난다. 영광 5호기 주급수펌프 한 대 상실(LOMFP)시험의 경우 참조발전소인 울진 3,4호기 LOMFP 시험보다 터빈출력의 감소가 많았으며 터빈출력의 과다감소에 대해선 원인이 밝혀지지 않았다. 영광 6호기에서는 이러한 문제들을 해결하기 위해 제어계통내의 관련변수 취득을 추진하고 있다.

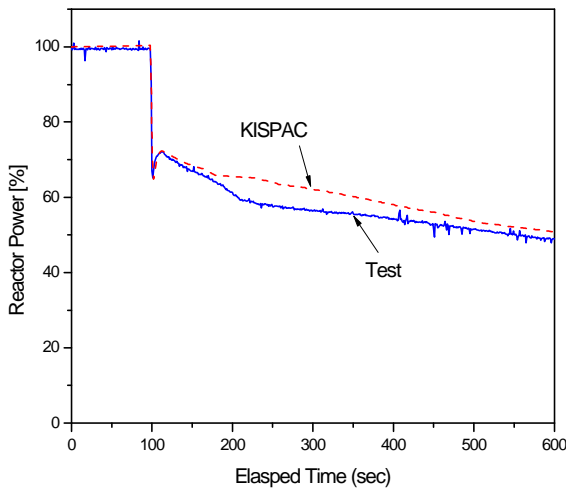


그림 2. 급수펌프 상실시 원자로출력

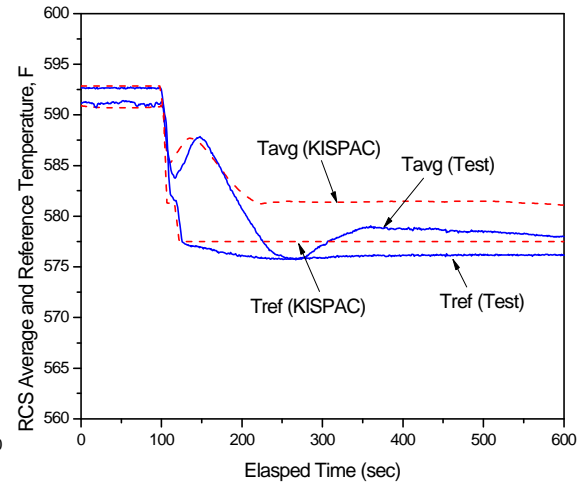


그림 3. 급수펌프 상실시 원자로냉각재 평균온도

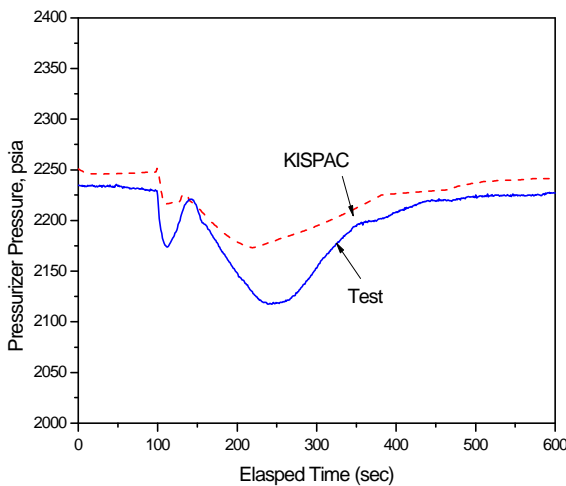


그림 4. 급수펌프 상실시 가압기 압력

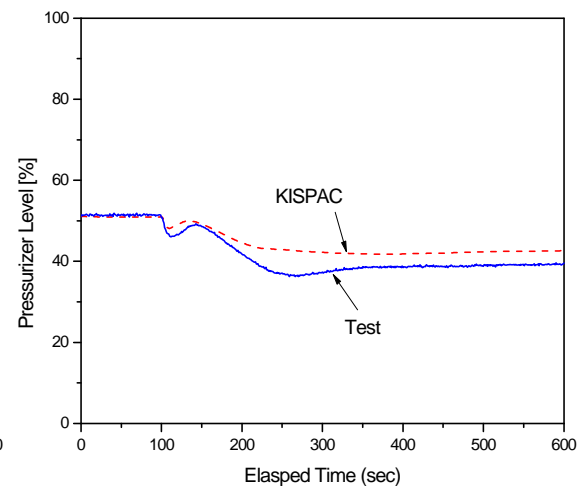


그림 5. 급수펌프 상실시 가압기 수위

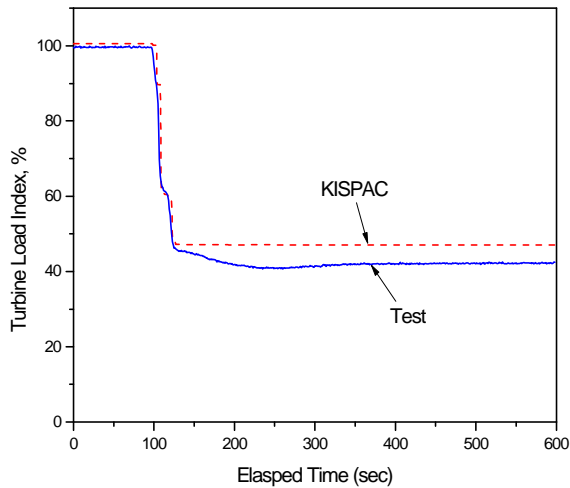


그림 6. 급수펌프 상실시 터빈부하지수신호

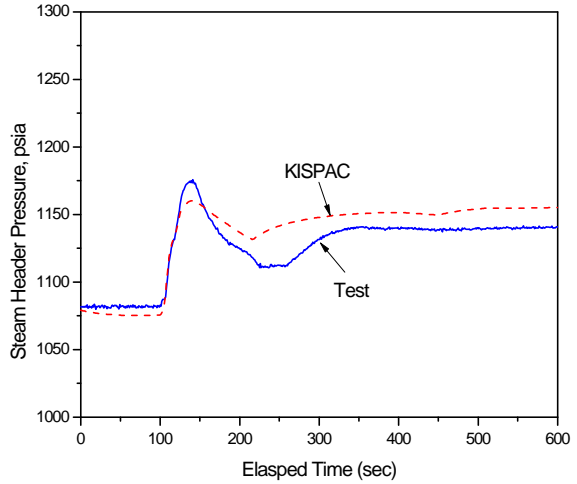


그림 7. 급수펌프 상실시 주증기헤더 압력

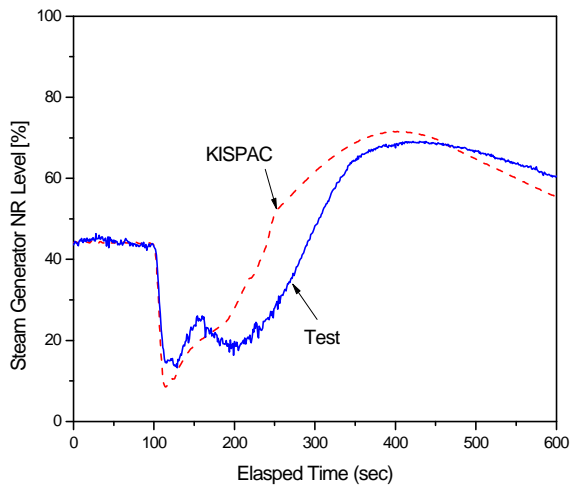


그림 8. 급수펌프 상실시 증기발생기 수위

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. 그림 9는 100% 출력에서 부하탈락이 발생할 때 NSSS 제어계통들 간의 신호연계사항을 도식화한 그림이다.

부하탈락사건이 발생하면, 터빈출력은 터빈제어계통의 PLU(Power Load Unbalance)신호에 따라 소내부하로 급감발된다 (그림 14). 터빈으로의 증기유량이 차단됨에 따라 주증기 유량은 급격히 감소하게 되며 증기발생기 압력은 급격히 증가하게 된다. 이러한 증기발생기 압력의 급격한 상승을 완화하기 위해 SBCS는 부하탈락 초기에 주증기 유량의 급격한 감소를 감지하여 터빈우회밸브들을 1초이내에 Quick open시켜 잉여에너지를 복수기와 공기중으로 방출한다 (그림 15).

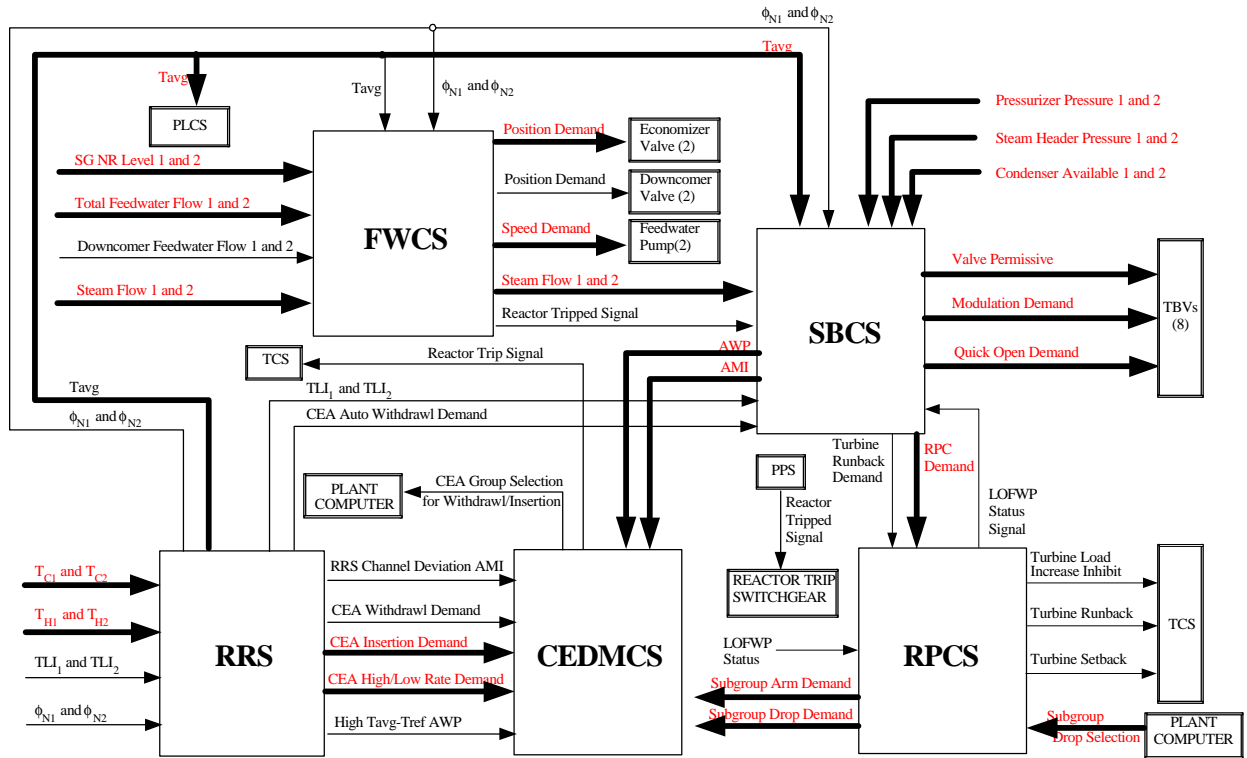


그림 9. 부하탈락시 NSSS 제어계통 간의 신호연계

부하 감발의 크기에 따라 그룹 X(그림 17)에 속해 있는 TBV #1에서 #4까지만 Quick open 시키거나 그룹 X와 그룹 Y(그림 18)에 속해 있는 TBV 즉, 모든 TBV를 Quick open 시키게 된다. 또한, SBCS의 용량을 초과하는 부하감소의 경우 RPCS에 출력급감발 요구신호를 보내게 된다. RPCS는 SBCS로부터 출력급감발 요구신호를 받아 CEDMCS에 원자로 출력감발신호를 발생시켜 선택된 제어봉 그룹을 노심으로 낙하시킨다. 제어봉 삽입에 따라 원자로출력은 그림 10과 같이 급감발하게 된다. 한편, 증기발생기 수위는 증기발생기 압력증가(그림 15)로 인한 수축현상에 의해 협역수위 17%까지 떨어지게 된다. FWCS는 초기에는 증기유량 감소에 따라 Output을 줄여주나 수위편차가 커짐에 따라 Output을 점차 늘려 증기발생기 수위를 설정치로 복귀시킨다. 증기발생기 압력상승으로 인해 일차측에서 이차측으로의 열전달은 감소하게 된다. 열전달 감소로 인해 원자로냉각재 평균온도는 증가하게 되며 이로 인해 가압기 압력은 상승하게 되며 가압기 수위도 상승하게 된다. PPCS는 살수조절밸브를 열어 가압기 압력의 급격한 상승을 완화시키게 된다 (그림12).

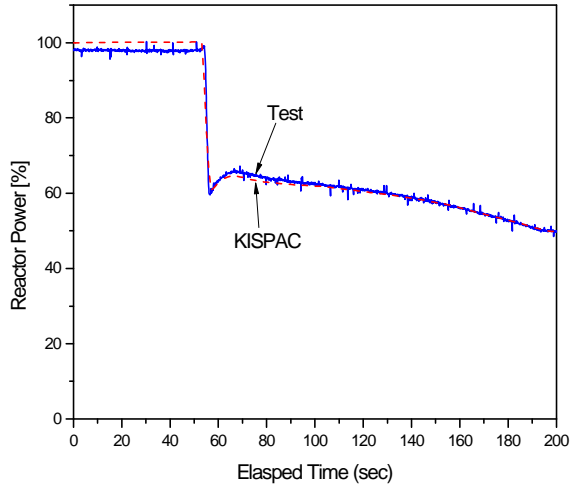


그림 10. 부하탈락시 원자로출력

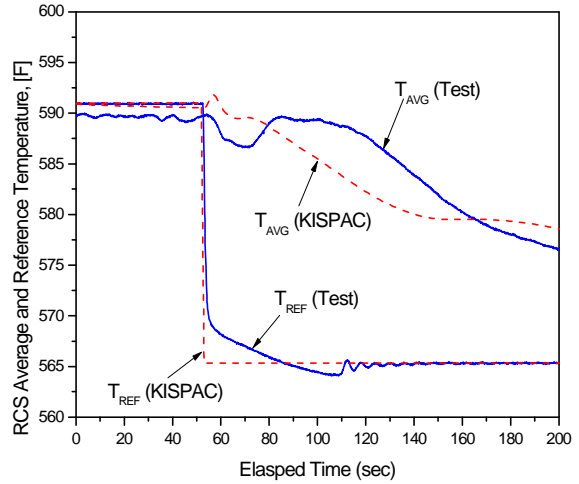


그림 11. 부하탈락시 원자로냉각재 평균온도

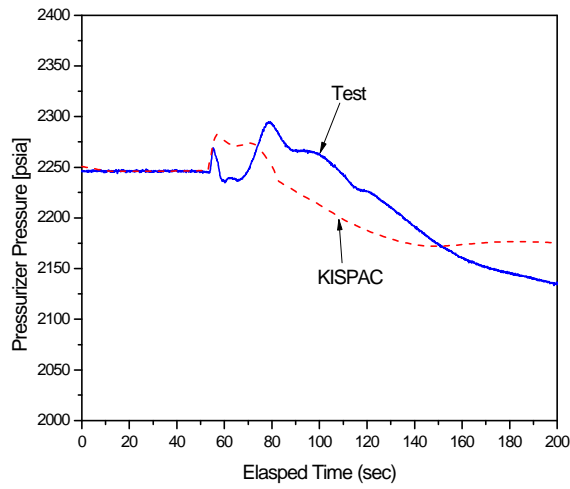


그림 12. 부하탈락시 가압기 압력

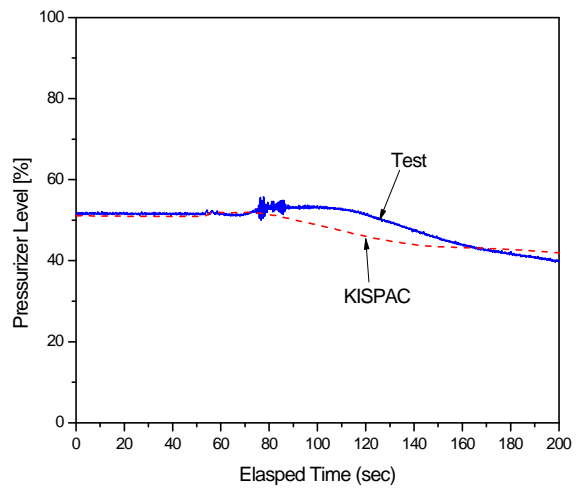


그림 13. 부하탈락시 가압기 수위

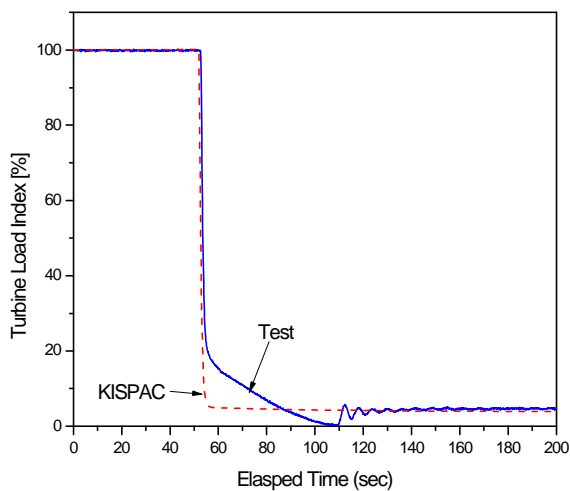


그림 14. 부하탈락시 터빈부하시수신호

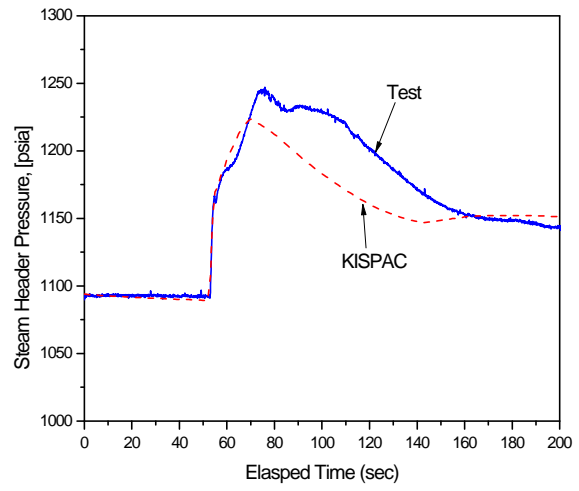


그림 15. 부하탈락시 주증기헤더 압력

이상과 같이 부하탈락사건에 따른 제어시스템의 즉각적인 제어동작이 완료되면 RRS는 원자로 출력이 운전원이 정해놓은 AMI(자동동작금지) 설정치까지 제어봉 삽입요구신호를 CEDMCS로 보내게 된다. RPCS에 의한 원자로 출력감소가 AMI 설정치 이하일 경우 제어봉은 움직이지

않으며 추가적인 RRS의 동작은 행해지지 않는다. SBCS는 Quick open모드 동작 이후에 증기 발생기 압력제어를 위해 Modulation 모드로 터빈우회밸브들을 순차적으로 열기 시작한다. PLCS는 유출유량을 줄여 가압기수위를 설정치에 유지시키고(그림 13) PPCS는 가압기압력을 설정치에 유지시키기 위해 가압기 가열기와 살수를 조절한다(그림12).

그림 10에서 그림 18을 보면 KISPAC 전산코드는 주급수펌프 한 대 상실에 비해 보다 정확하게 발전소 과도상태를 예측하고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 부하탈락 초기에 원자로 냉각재 평균온도(그림 11)가 떨어져 약 14초정도 머물다 다시 올라가는 현상은 좀 더 연구되어야 할 문제이다. 이로 인해 초기 가압기 압력(그림 12)과 수위(그림 13)에 있어 KISPAC 전산코드와 발전소 자료가 차이를 보이고 있다. 부하탈락에서도 역시 증기발생기 압력이 전산코드 모사결과보다 높게 상승하는 현상을 관찰할 수 있다.

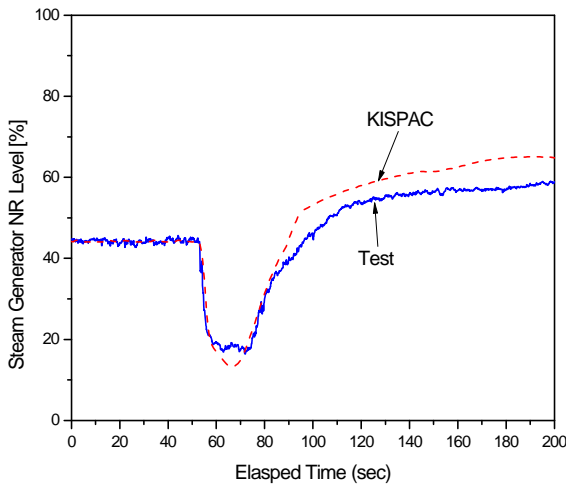


그림 16. 부하탈락시 증기발생기 수위

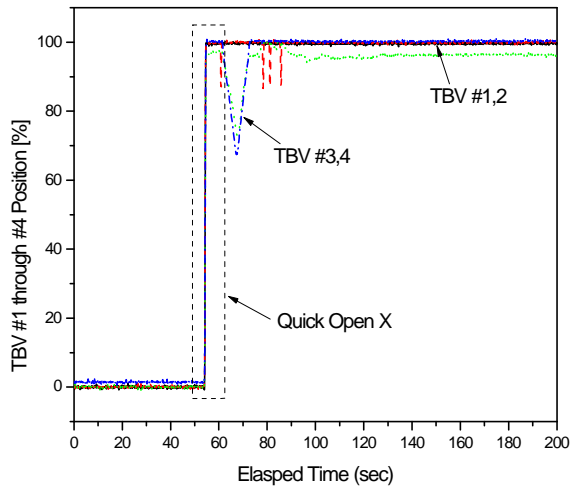


그림 17. 부하탈락시 TBV #1-#4 개도

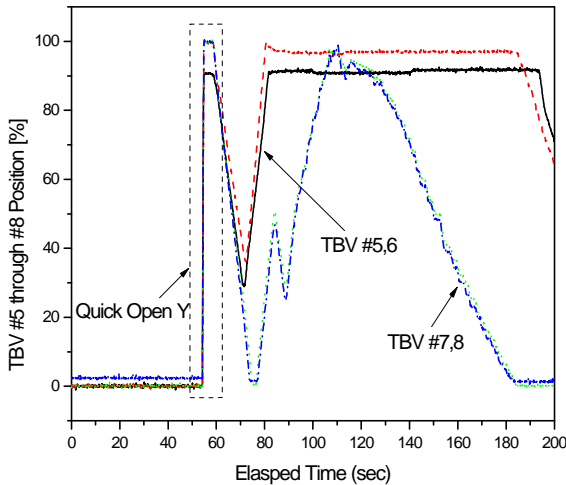


그림 18. 부하탈락시 TBV #7-#8 개도

3.3 평가 결과

3.1절과 3.2절에 걸쳐 영광 5호기 출력상승시험 결과와 KISPAC 전산코드로 모사한 결과를 비교 분석해 보았다. 전체적인 과도상태 완화능력은 전체적으로 상당히 양호한 것으로 입증되었다. 영광 5,6호기의 NSSS 제어계통 하드웨어는 울진 3,4호기와는 달리 PLC(Programmable

Logic Controller)를 이용하여 Software로 구성되어 있다. 그러나, 이로 인한 별다른 문제는 발생하지 않았으며 모든 시험이 성공적으로 수행되었다. 단지 주급수펌프 한 대 상실사건시 터빈 출력이 전산코드 모사 결과에 비해 다소 많이 떨어지는 현상과 부하탈락시 원자로 냉각재 평균온도가 떨어졌다 올라가는 현상 그리고, 과도상태 발생시 증기발생기 압력증가량이 KISPAC 전산코드로 예측하고 모사한 결과보다 다소 많이 나오는 현상에 대해서는 보다 자세한 분석이 요구된다. 이를 위하여 영광 6호기에서는 NSSS 제어계통내의 운전변수를 취득하는 방안을 추진 중에 있으며 아울러, 전산코드도 보다 자세한 분석을 위하여 모델을 개선하고 있다. 이러한 전산코드 모델개선과 발전소 현장 제어계통 변수취득은 상기 문제점들의 정확한 원인규명을 가능하게 하며 그에 대한 해결책을 제시해 줄 것으로 기대되고 있다.

4. 결 론

한국표준원전의 NSSS 제어계통은 주급수펌프 한 대 상실사건과 부하감발사건의 급격한 과도 상태에서도 매우 우수한 성능을 발휘하였다. 따라서, 향후 정상운전중에 성능관련설계기준사건이 발생하더라도 NSSS 제어계통의 검증된 성능으로 인하여 발전소는 원자로 정지없이 안정될 수 있을 것으로 판단된다. 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] 손석훈 외4명, "The Performance Evaluation of NSSS Control Systems for UCN 4", Journal of the KNS Volume 33, Number 3, pp.339-348, June, 2001.