

2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

RETRAN-3D를 이용한 울진3/4호기 제어계통 모델링 및 성능 평가

Control System Modeling and Performance Evaluation of Ulchin Units 3 and 4 Using RETRAN-3D

이두용, 김용수, 김재학, 홍순준, 박병기, 윤정익
FNC Technology Co.

서울특별시 관악구 봉천7동 산4-2 서울대학교 연구공원내 연구공원 본관 516호

이재용, 김요한, 이동혁, 송동수
한전전력연구원

요 약

핵증기공급계통(NSSS) 제어계통은 원자력발전소의 출력운전중에 발생할 수 있는 과도 상태를 운전원의 조치없이 빠르게 안정상태로 복귀시키는 기능을 수행한다. 따라서 원자력발전소에서 발생할 수 있는 다양한 과도상태에 대한 해석을 수행하기 위해서는 핵증기공급계통 제어계통에 대한 적절한 모델링이 필요하다. 본 논문에서는 최적해석코드 중 제어계통 모델링에 장점을 가지는 RETRAN-3D를 이용하여 한국표준형원전인 울진3/4호기의 Non-LOCA 과도상태 해석을 위한 핵증기공급계통 제어계통을 모델링하였으며 모델링된 제어계통의 성능평가를 위해 터빈정지 해석을 수행하였다. 해석결과는 영광3/4호기에서 수행된 성능해석 결과와 비교하였다. 비교평가결과 대부분의 변수들은 영광3/4호기의 성능해석 결과와 잘 일치하였으나 주급수 제어계통(FWCS)에서 주급수 엔탈피 변화를 반영해야 함을 알 수 있었다. 그리고 RETRAN-3D의 울진3/4호기 핵증기공급계통 제어계통은 적절히 작동하여 발전소보호계통(PPS), 다중보호계통(DPS) 및 1/2차측의 안전밸브의 작동없이 터빈트립과 같은 과도상태에서 안정상태로의 복귀가 이루어짐을 알 수 있었다.

Abstract

NSSS control systems perform automatic mitigation of transient conditions which

can occur during power operation of nuclear power plant without operator actions. Thus appropriate modeling of NSSS control systems is required to analyze various transient conditions which can occur in nuclear power plant. In this paper, NSSS control systems were modeled to analyze Non-LOCA transient conditions for Ulchin units 3 and 4, KSNP(Korea Standard Nuclear Power Plant) using RETRAN-3D and Analysis of turbine trip was performed. Analysis results were compared with performance analysis results of Yonggwang units 3 and 4. In the results of comparison and evaluation, almost parameters were correspond with performance analysis results of Yonggwang units 3 and 4 and it was found that feedwater enthalpy variation should be reflected in FWCS logic of RETRAN-3D. And It was evaluated that Ulchin 3 and 4 NSSS control systems were actuated properly using RETRAN-3D without actuation of PPS, DPS and primary/secondary side safety valves in case of transient condtions like turbine trip.

1. 서 론

한국표준형원전인 울진3/4호기의 핵증기공급계통 제어계통은 가압기 압력제어계통(Pressurizer Pressure Control System : PPCS), 가압기 수위제어계통(Pressurizer Level Control System : PLCS), 원자로 출력조절계통(Reactor Regulating System : RRS) 또는 제어봉 제어계통(Control Element Driving Mechanism Control System : CEDMCS), 주급수제어계통(FeedWater Control System : FWCS), 증기우회제어계통(Steam Bypass Control System : SBCS) 그리고 원자로 출력급감발계통(Reactor Power Cutback System : RPCS)으로 구성된다. 각 제어계통들은 원자력 발전소의 출력운전 중 과도상태가 발생할 경우 유기적으로 작동하여 운전원의 조치없이 자동적으로 발전소의 거동을 안정화시킨다. 따라서 원자력 발전소의 과도상태를 해석하기 위해서는 핵증기공급계통 제어계통을 적절히 모델링하여야 한다. ABB-CE형 발전소의 제어논리 개발과 설정치 계산에 사용되는 코드로는 LTC가 있으며, 한국전력기술(주)에서는 LTC를 일부변경한 KISPAC을 사용하고 있다^[1]. 그러나 LTC 및 KISPAC은 설계코드로서 제어논리가 이미 코드내부에 반영되어 제어논리 변경 등의 사항을 입력단계에서 제어하기는 어렵다. 본 논문에서는 최적해석코드인 RETRAN-3D^[2]를 이용하여 울진3/4호기의 과도상태를 해석하기 위해 핵증기공급계통 제어계통(PPCS, PLCS, RRS, FWCS, SBCS, RPCS)의 제어논리를 개발하였으며, 이들의 성능을 평가하기 위해 터빈정지 해석을 수행하였다. 터빈정지 해석결과는 영광3/4호기의 성능해석 결과와 비교평가하였다.

2. RETRAN-3D를 이용한 핵증기공급계통 제어계통 모델링

1.1. 가압기 압력제어계통(PPCS)^[3]

가압기 압력 제어계통은 가압기 비례 전열기, 보조 전열기 및 살수밸브로 구성되어 원자로 냉각재 압력이 Nominal 설정치인 2,250psia로 유지되도록 제어한다. 냉각재 압력이 감소하면 전열기 출력이 증가되어 압력을 상승시킨다. 반면, 계통 압력이 설정치 이상으로 증가하면 원자로 냉각재 펌프 후단에 연결되어 있는 살수유로를 통해서 상대적으로 저온의 냉각재가 가압기 증기 영역으로 분사되어 증기를 응축시켜 압력을 감소시킨다. 원자로 냉각재계통압력을 조절하는 가압기 압력제어계통은 RETRAN-3D에서 그림 1과 같이 모델링하였다.

2.2. 가압기 수위제어계통(PLCS)^[3]

가압기 수위제어계통은 충전펌프 1대가 항상 운전되는 상태에서 충전유량을 일정하게 유지하고 유출유량 밸브개도를 조절하여 원자로냉각재 평균온도 297.9°C에서 311.6°C사이에서 33%에서 52.6%로 유지하도록 한다. 가압기 수위가 설정치 이상으로 감소하는 경우에는 대기 중인 충전펌프가 기동되어 가압기 수위를 회복하도록 프로그램되어 있다. 이러한 제어논리를 RETRAN-3D에서는 그림 2와 같이 모델링하였다.

2.3. 원자로 출력조절계통(RRS)^[3]

원자로냉각재계통은 감속재온도계수 및 도플러온도계수로 인한 반응도 궤환효과로 인해 고유의 부하추종 특성을 지니고 있다. 하지만, 이들 계수들의 크기는 노심주기에 따라 변하게 되므로 노심초기 및 노심말기 동일한 부하변화에 대하여 일차측 온도와 이차측 조건이 상당히 다르게 변화된다. 이에 따라, 제어봉제어계통은 냉각재 평균온도가 터빈부하의 함수로 프로그램된 기준온도 설정치와 일치하도록 유지시킴으로서 터빈 부하 변화에 따라 원자로 출력을 조절하는 역할을 한다. 그림 3은 원자로 출력조절계통에 대한 RETRAN-3D 제어논리이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 원자로 출력조절계통은 터빈 1단압력(Turbine Load Index : TLI)을 이용하여 295.6°C에서 311.6°C로 프로그램된 기준 냉각재온도(Tref)와 실제 온도간의 편차에 따라 제어봉 이동 속도 및 제어봉 이동 방향을 결정하여 제어봉 인출 또는 삽입에 의해 정·부반응도를 노심에 삽입함으로서 기준 냉각재온도(Tref)로 원자로 냉각재 평균온도가 유지되도록 한다.

2.4 주급수 제어계통(FWCS)^[3]

주급수 제어계통은 증기발생기로 공급되는 급수유량을 제어하여 증기발생기 하향유로 수위를 일정하게 유지한다. 증기발생기 수위는 전출력에서 협역수위 44%, 광역수위 79%에서 일정수위 운전방식으로 제어되고 있다. 주급수는 주급수 헤더를 통해서 증기발생기 하향유로(Downcomer)와 이코노마이저(Economizer)로 주입된다. 20% 출력 이하에서는 증기 발생기 수위에 의해서 제어되는 단일요소 제어계통으로 구성되고, 20% 출력 이상에서는 증기발생기 수위, 주급수유량, 주증기유량에 의해서 제어되는 3요소 제어방식으로 동작한다. 원자로 출력 5%에서 20%의 저출력에서는 이코노마이저 밸브는 단힘상태로 유

지하고 증기발생기 수위 신호가 단일 입력으로 생성되는 유량 요구신호에 의해 증기발생기 수위가 일정하게 유지되도록 하향유로 밸브개도가 조절된다. 원자로 출력 20%이상에서는 증기발생기 수위, 주증기유량 및 주급수유량 3요소 입력으로 하향유로 밸브개도는 전체유량의 10%를 통과시키도록 개방되고 증기발생기 수위가 일정하게 유지되도록 유량 요구신호에 의해 이코노마이저 밸브개도 및 주급수펌프 속도가 제어된다. 원자로 정지시에는 재충수 유량 요구신호가 발생되어 이코노마이저 밸브는 닫힘상태로 유지되고 원자로냉각재계통 과냉을 방지하기 위해 냉각재 평균온도와 무부하 냉각재온도 사이의 편차 신호에 따라 급수유량 요구신호가 발생되어 하향유로 밸브가 조절된다. 그림 4.(1)에서 그림 4.(3)은 주급수 제어계통에 대한 RETRAN-3D 제어논리이다.

2.5 증기우회 제어계통(SBCS)^[3]

주증기우회계통은 1, 2차측간의 열적 불균형 발생 시 제어봉제어계통에 의해 원자로 냉각재 평균온도를 기준 냉각재온도(Tref)로 유지하지 못하는 경우 잉여 에너지를 제거하여 1, 2차측 열적 평형을 유지하도록 동작하며, 작동모드로는 Modulation 모드와 Quick Open 모드가 있다. Modulation 모드에서는 총 8개의 증기우회밸브가 증기관 헤더압력 설정치와 지시치간의 편차 신호에 따라 단계적으로 개방되어 주증기관 잉여증기를 복수기로 방출시켜 열적 평형을 유지한다. Quick Open 모드는 부하상실등 큰 과도상태가 발생했을 때 주증기 감소량을 감지하여 터빈우회밸브를 급속히(1초 이내) 열어 잉여에너지를 방출한다. Quick Open 신호는 Modulation 신호에 우선(Override)하며 주증기 감소량에 따라 급속히 개방되는 밸브 수가 결정된다. 부하 감소량이 크지 않는 경우 그룹 X의 터빈우회밸브 1에서 4가 급속히 열리고 감소량이 큰 경우에는 그룹 X의 터빈우회밸브 1에서 4와 그룹 Y의 터빈우회밸브 5에서 8이 동시에 개방된다. 또한, 증기 감소량이 증기우회제어계통의 용량을 초과하는 경우 원자로 출력급감발계통(RPCS)에 출력 급감발 요구신호를 전송한다. 원자로 정지 시에는 무부하 온도 설정치로 원자로냉각재 온도를 유지하도록 증기우회밸브가 조절된다. 그림 5.(1)에서 그림 5.(2)는 주증기 우회계통에 대한 RETRAN-3D 제어논리이다.

2.6 원자로 출력급감발계통(RPCS)^[3]

원자로출력 급감발계통은 터빈정지와 같은 큰 부하 감발 및 주급수펌프 1대가 정지되는 경우 원자로 출력을 급속하게 감발하여 원자로 정지가 발생하지 않도록 한다. 연소도에 따라 터빈정지 신호에 의해 노심에 삽입되는 제어군이 결정된다. 통상 주기초에는 조절군 4, 5가 낙하되고 주기말에는 조절군 5가 낙하되어 원자로 출력을 감소시켜 1, 2차측 열적 불평형에 의해 증기발생기 저수위, 가압기 고압력에 의한 원자로정지를 방지한다. 원자로 출력급감발계통은 원자로 출력조절계통 및 증기우회제어계통과 연계되어 있다. 그림 6은 원자로 출력급감발계통에 대한 RETRAN-3D 제어 논리이다.

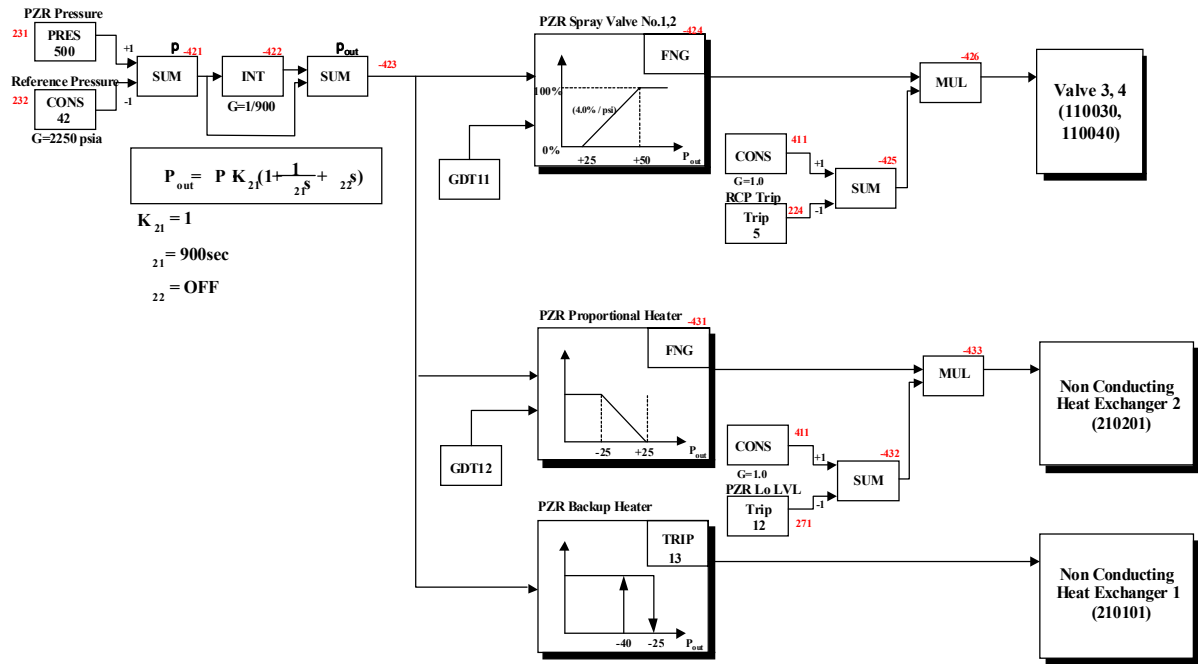


그림 1. 가압기 압력제어계통(PPCS)

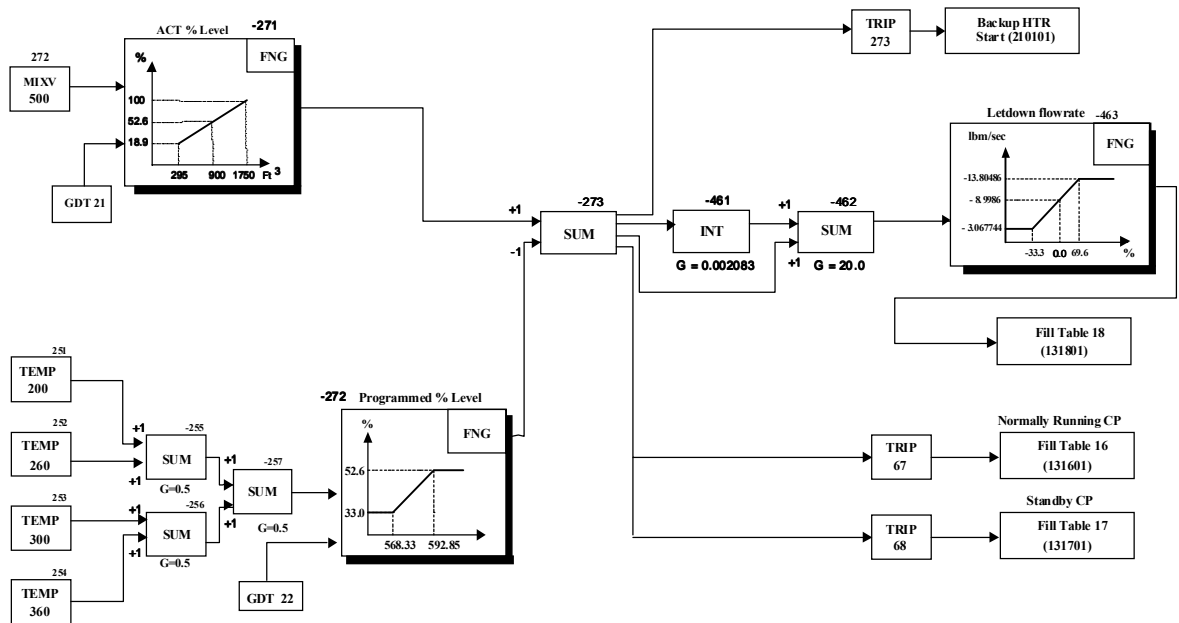


그림 2. 가압기 수위제어계통(PLCS)

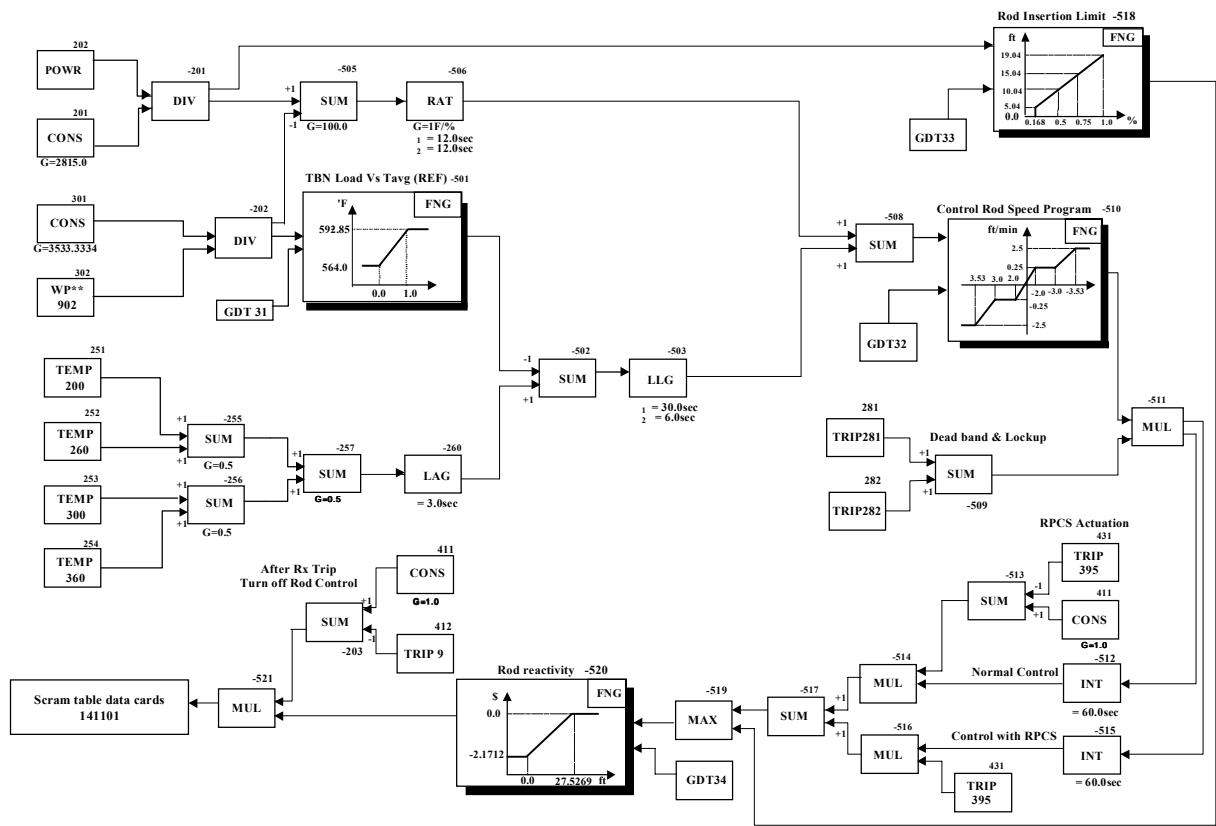


그림 3. 원자로 출력조절계통(RRS)

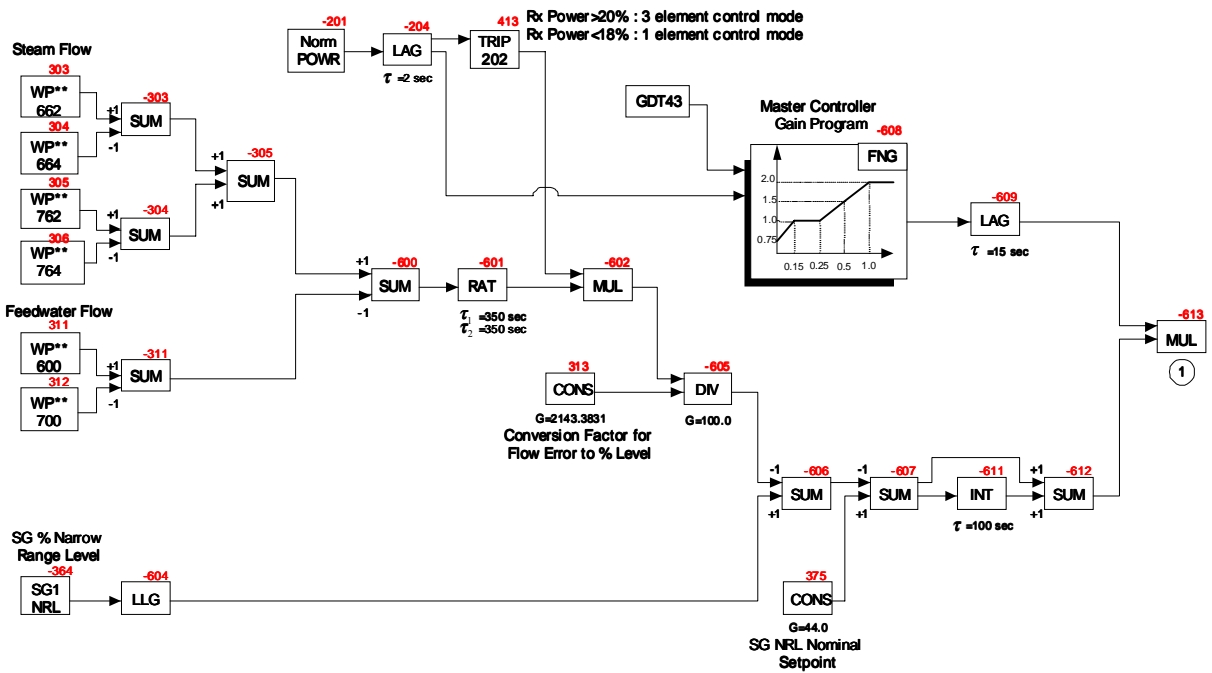


그림 4.(1). 주급수 제어계통(FWCS)-(1)

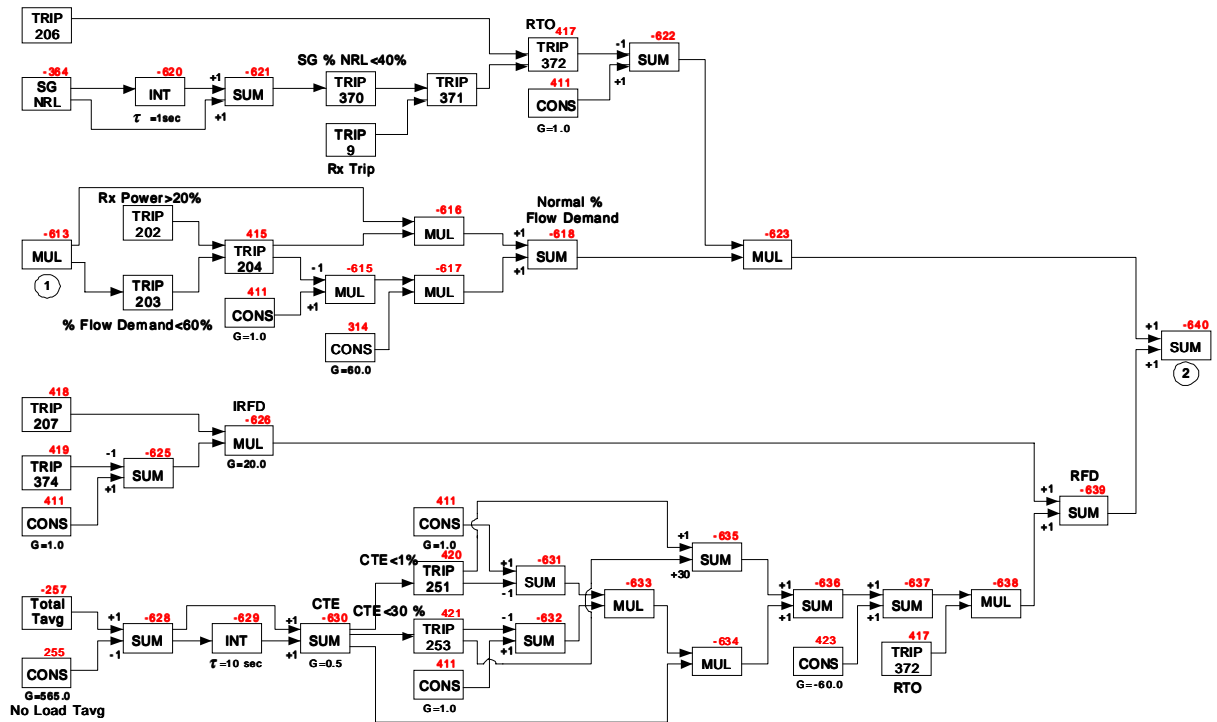


그림 4.(2). 주급수 제어계통(FWCS)-(2)

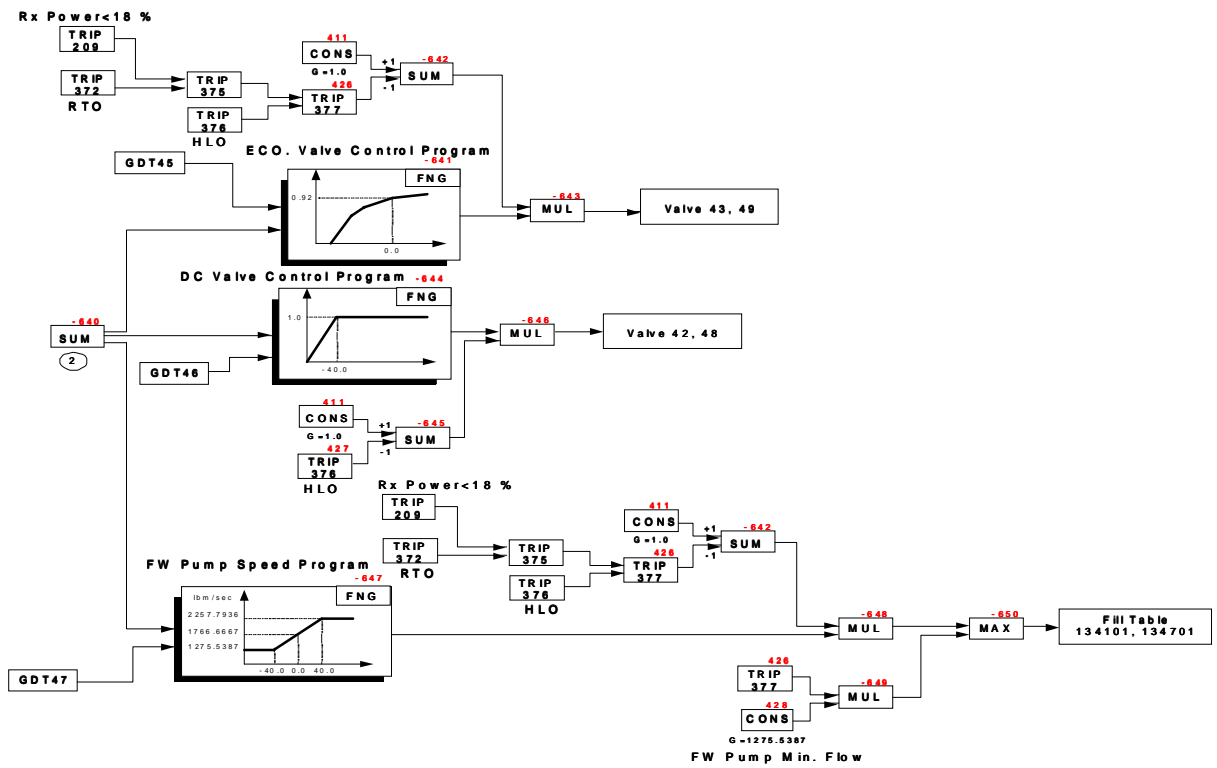


그림 4.(3). 주급수 제어계통(FWCS)-(3)

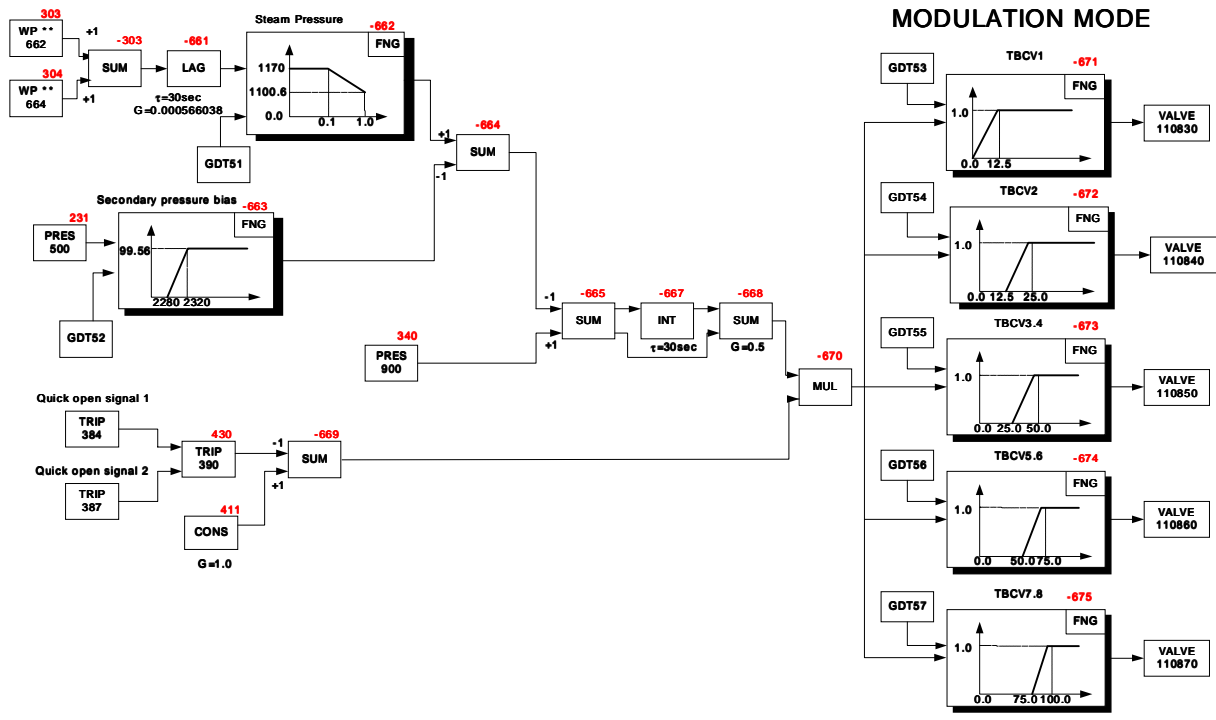


그림 5.(1). 증기우회제어계통(SBCS)-(1)

QUICK OPEN MODE

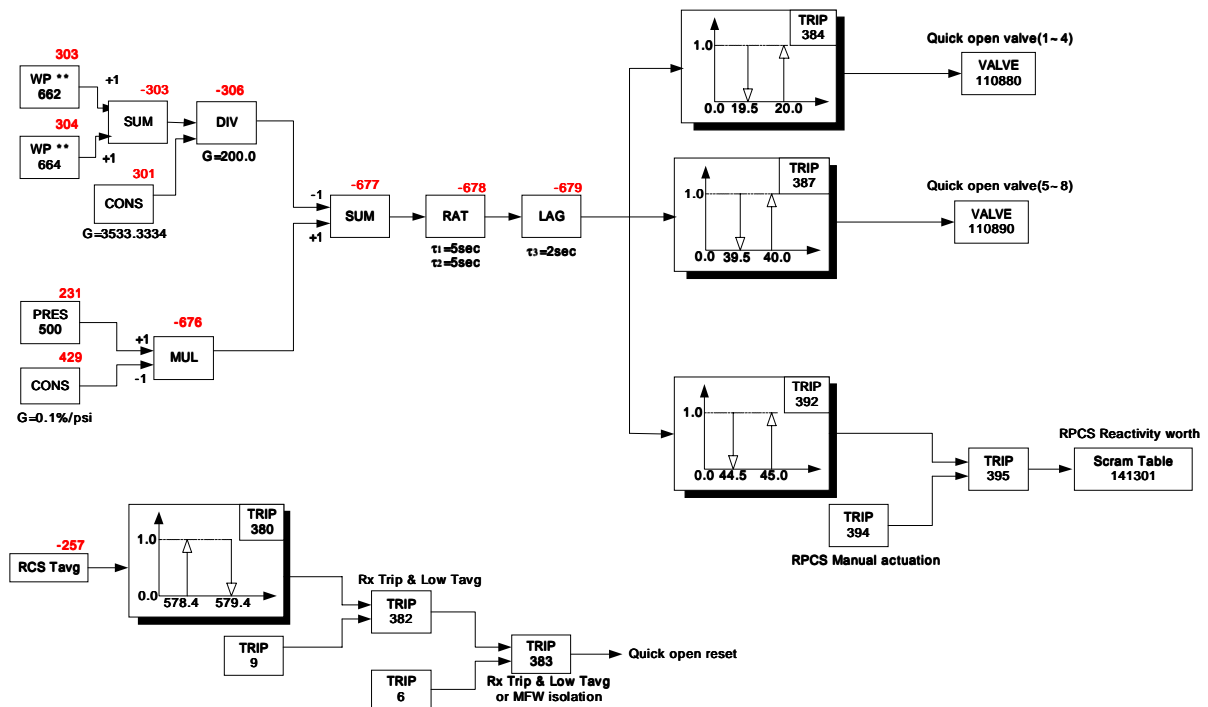


그림 5.(2). 증기우회제어계통(SBCS)-(2)

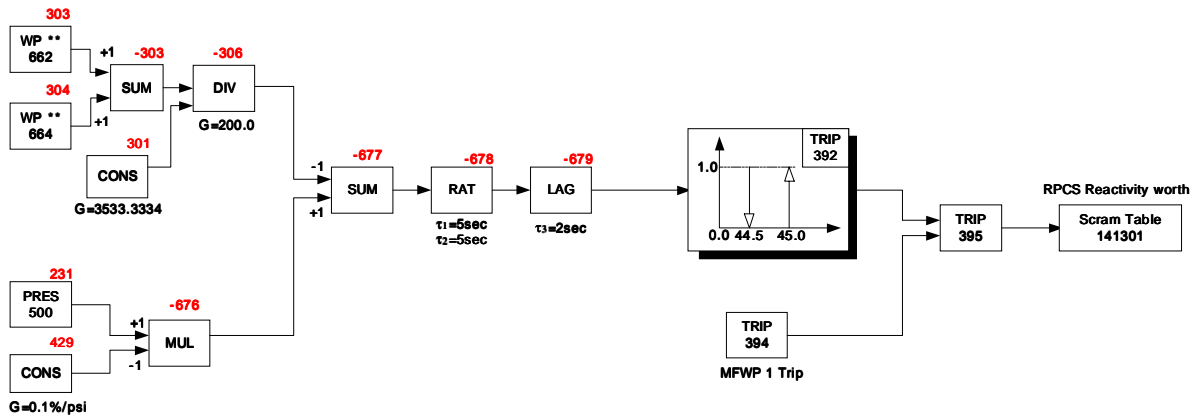


그림 6. 출력 급감발계통(RPCS)

3. RETRAN-3D를 이용한 핵증기공급계통 제어계통 성능평가

핵증기공급계통 제어계통은 원자력 발전소 출력운전 중 과도상태가 발생할 경우 자동적으로 발전소 거동을 안정한 상태로 복귀시킨다. 이들 제어계통은 발전소보호계통(Plant Protection System : PPS)과 다중보호계통(Diverse Protection System : DPS) 그리고 1/2차측 안전밸브의 작동이 없이 과도상태에서 안정상태로의 복귀가 가능해야 한다. 본 논문에서는 RETRAN-3D를 이용하여 모델링한 제어계통의 성능검증을 위해 발전소의 다양한 과도상태 중에서 터빈정지를 선택하였다. 터빈정지시 핵증기공급계통 제어계통은 1/2차측 변수들의 큰 변동이 발생하는 것을 완화한다. 증기우회제어계통은 부하변동을 측정하기 위해 2차측 증기유량을 감시하며, 잉여증기를 복수기로 우회시킴으로써 직접적으로 2차측 압력을 제어하고 간접적으로 1차측 압력을 제어한다. 원자로 출력급감발계통은 터빈정지가 일어난 후 미리 선택된 제어봉군을 탈락시킴으로써 급격히 1/2차측의 출력 불일치를 최소화한다. 원자로 출력급감발계통 작동후 원자로 출력조절계통은 2차측 출력과 1차측 출력을 일치시키기 위해 미리 정해진 설정치로 천천히 원자로 출력을 감소시킨다. 가압기 수위제어계통은 설정된 가압기 수위를 유지하기 위해 충전/유출 유량을 조절하여 가압기 수위변동을 최소화한다. 가압기 압력제어계통은 제한치 이내로 1차계통 압력을 유지하기 위해 가압기 전열기와 살수기를 제어한다. 그림 7은 터빈트립해석을 위한 울진3/4호기 RETRAN-3D Nodalization이며 그림 8에서 그림 13에 나타난 해석결과는 영광3/4호기의 성능해석결과와 비교평가한 것이다. 평가결과 전체적으로 영광3/4호기의 LTC 성능해석 결과와 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림 8의 원자로 출력의 경우 터빈정지로 인한 원자로 정지를 방지하고 1/2차측의 출력 불일치를 최소화하기 위해 원자로 출력급감발계통이 작동하여 급격히 원자로 출력을 감소시킴을 볼 수 있으며 이후 원자로 출력조절계통에서 서서히 출력을 제어함을 볼 수 있다. 그러나 원자로 출력급감발계통 작동후 원자로 출력조절계통의 출력제어시 LTC에 비하여 출력이 낮음을 볼 수 있다. 그림 9의

터빈 출력은 터빈정지가 발생하면서 급속히 감소함을 볼 수 있다. 그림 10의 가압기 압력의 경우 터빈정지로 인해 2차측의 열제거가 되지 않으면서 가압기 압력이 상승하나 살수기가 작동하여 압력 상승을 제어하며 이후 전열기가 작동하면서 압력이 다시 상승함을 볼 수 있으며 가압기 압력제어계통이 적절히 작동하고 있음을 알 수 있다. 그러나 그림 10의 가압기 압력의 경우에는 경향성은 일치하나 수치에서 어느정도 차이가 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 설계코드인 LTC와 최적해석코드인 RETRAN-3D의 가압기 모델의 차이에서 기인한다고 할 수 있다. 그림 11의 가압기 수위의 경우 가압기 수위제어계통은 가압기 수위의 변동을 최소화하며 설정 수위로 안정화됨을 볼 수 있으며 가압기 수위 제어계통이 적절히 작동함을 알 수 있다. 그림 12의 원자로냉각재 온도는 그림 8의 원자로 출력과 마찬가지로 적절한 거동을 보이고 있음을 볼 수 있다. 그림 13의 증기발생기 압력의 경우 터빈정지로 인한 잉여증기로 초기에 압력이 상승하며 증기우회제어계통이 작동하여 압력 상승을 제어하는 것을 볼 수 있으며 증기우회제어계통이 적절히 작동함을 알 수 있다. 그러나 터빈정지 후반 원자로 출력은 같은데도 불구하고 원자로냉각재 온도가 LTC에 비해 높게 나오는 문제점이 있으며 이는 1차측에서 2차측으로의 열전달이 LTC에 비해 덜되고 있음을 의미하며 이로 인해 가압기 압력은 높게 나옴을 볼 수 있다. 증기발생기 압력은 터빈정지 후반 LTC에 비해 낮음을 볼 수 있는데, 이는 LTC와 RETRAN-3D의 주급수 제어계통 모델링의 차이에 기인하며 특히 주급수 엔탈피의 경우 LTC는 발전소 거동에 따라서 변화하는 값으로 사고후반으로 갈수록 작아지는 반면에 RETRAN-3D의 경우 주급수 엔탈피는 고정된 값이므로 사고후반으로 갈수록 LTC와 RETRAN-3D의 주급수 엔탈피 차이는 커지게 된다. 이로 인해 증기발생기 출구에서의 증기유량은 RETRAN-3D가 LTC에 비해 크며, 결국 증기발생기 압력은 RETRAN-3D가 LTC에 비해 낮아진다.

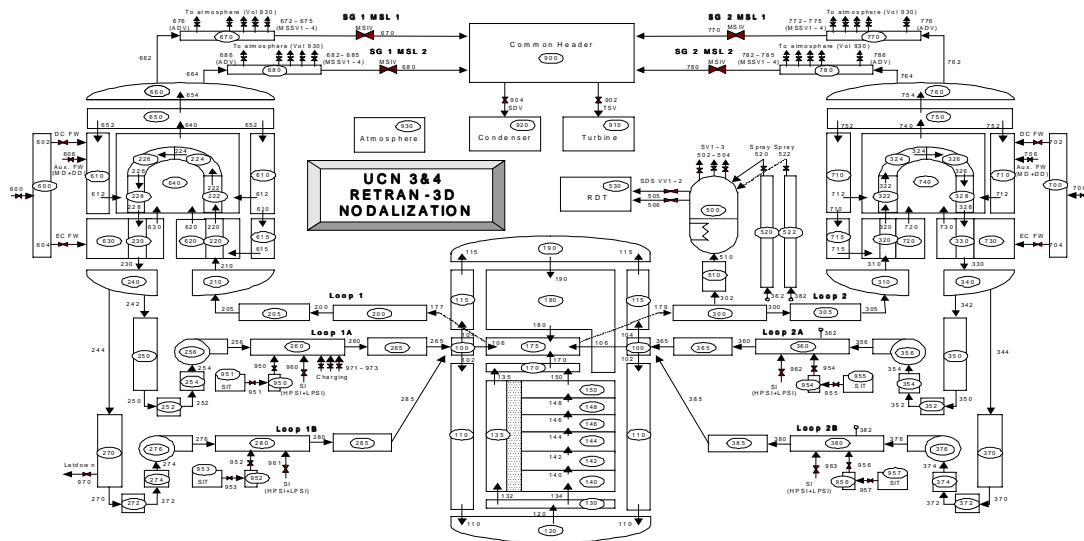


그림 7. 울진3/4호기 RETRAN-3D Nodalization

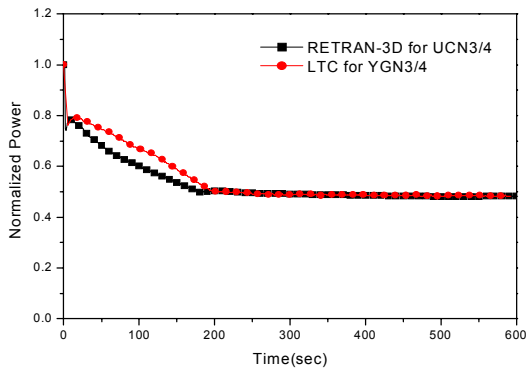


그림 8. 원자로 출력

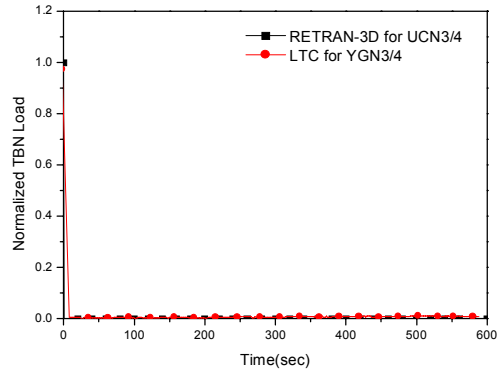


그림 9. 터빈 출력

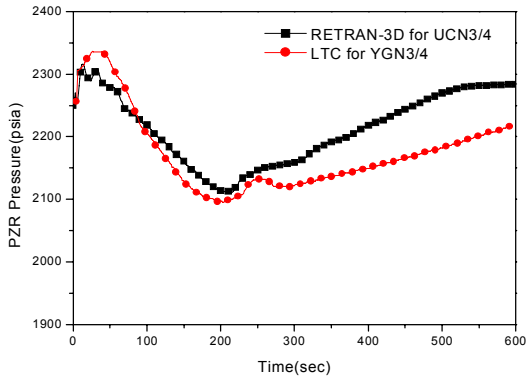


그림 10. 가압기 압력

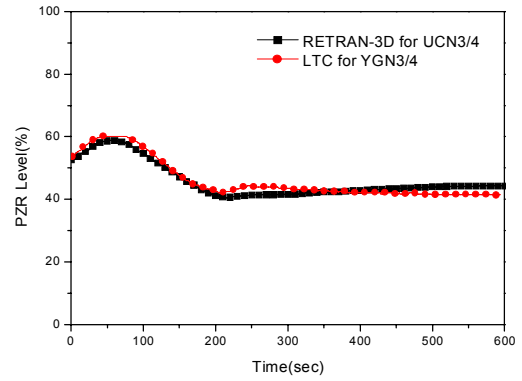


그림 11. 가압기 수위

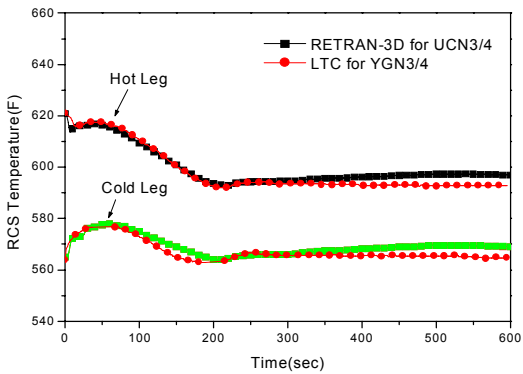


그림 12. 원자로냉각재 온도

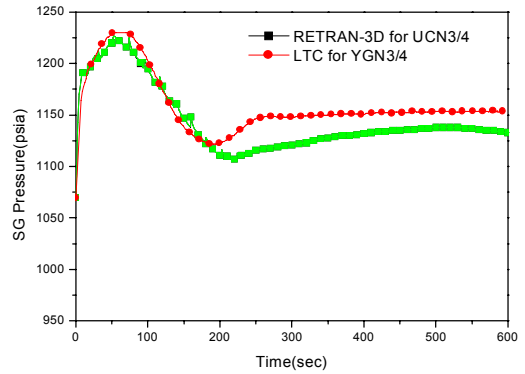


그림 13. 증기발생기 압력

4. 결 론

원자력 발전소의 출력운전 중 발생할 수 있는 다양한 과도상태 해석을 위해서는 핵증기 공급계통 제어계통의 적절한 모델링이 필요하며 RETRAN-3D와 같은 최적해석코드에서는 매우 중요한 사항이다. 울진3/4호기의 제어계통은 가압기 압력제어계통(PPCS), 가압기 수위제어계통(PLCS), 원자로 출력조절계통(RRS), 주급수 제어계통(FWCS), 증기우회제어계통(SBCS) 그리고 원자로 출력급감발계통(RPCS)으로 이루어지며 각 제어계통들은 유기적으로 결합되어 과도상태 발생시 발전소의 거동을 자동적으로 안정화시킨다. 이들 제어계통들에 대한 RETRAN-3D 제어논리를 개발하였으며 제어계통의 성능을 평가하기 위해 터빈정지해석을 수행하였다. 해석결과 모델링된 제어계통은 적절하게 작동함을 알 수 있었으나, 주급수 제어계통의 경우 증기유량과 증기발생기 압력에 영향을 주는 주급수 엔탈피의 변화를 반영할 필요성이 있음을 알 수 있었다. 향후 주급수 엔탈피의 변화에 대한 제어논리를 추가할 계획이다. 본 논문에서 수행한 핵증기공급계통 제어계통의 제어논리를 완비한 RETRAN-3D의 입력작성은 가동중 원전의 주기적 안전성 평가, 출력 증가, 수명 연장, 기술지침서 완화, 설계개선 및 각종 절차서 최적화 등의 업무 및 연구를 수행하는 데 도움을 줄 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 손석훈 외, “영광 5호기 NSSS 제어계통 성능평가”, 2002년도 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
- [2] “RETRAN-3D - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems”, EPRI NP-7450(A), EPRI, Computer Code Manual, July 2001.
- [3] “NSSS System Design for the Korean Standard Nuclear Power Plant”, KAERI/GP-108/96, Rev.01, 1996.