

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

• 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건 을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer 🖃





2018년 8월 석사학위 논문

WH1000형 원전 출력급감발계통 적용 연구

조선대학교 대학원 원자력공학과

이 병 호



WH1000형 원전 출력급감발계통 적용 연구

A study on the application of the reactor power cutback system to WH1000 type NPP

2018년 8월 24일

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 병 호





WH1000형 원전 출력급감발계통 적용 연구

지도교수: 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함 2018년 4월

조선대학교 대학원 원자력공학과 이 병 호





이병호의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 진 원 (인)

위 원 조선대학교 교수 나 만 균 (인)

위 원 조선대학교 교수 송종순 (인)

2018년 5월

조선대학교 대학원





목 차

| ABSTRACT ······ | V |
|---|----|
| 제 1 장 서 론 | 1 |
| 제 1 절 원전 노형별 발전소 정지원인 분석 | 2 |
| 제 2 절 현황 및 문제점 | 3 |
| 제 3 절 연구개발 필요성 | 4 |
| 제 2 장 원전 계통 설명 | 5 |
| 제 1 절 WH1000형 원전의 증기덤프계통 | 5 |
| 1. 개요 | 5 |
| 2. 증기덤프계통 제어 | 6 |
| 3. 구성기기 및 기능 | 7 |
| 제 2 절 OPR1000형 원전의 증기덤프계통 | 11 |
| 1. 개요 | 11 |
| 2. 증기덤프 구성 및 제어 | 12 |
| 제 3 절 WH1000형과 OPR1000형 원전 증기덤프계통 비교 ·· : | 17 |
| 제 4 절 OPR1000형 원전의 원자로출력급감발계통 | 18 |
| 1. 기능 | 18 |
| 2. 설계기준 | 18 |
| 3. RPCS 동작특성 ····· | 19 |
| 4. RPCS 입력신호 | 20 |

| 제 3 장 WH1000형 원자로 출력급감발계통 적용·· | 22 |
|--|-----|
| 제 1 절 원자로 출력급감발계통(RPCS) ···································· | 22 |
| 1. 원자로 출력급감발계통 Target Power 선정 | 22 |
| 2. 원자로 Target Power 45%시 낙하 제어봉 선정 | 23 |
| 3. 출력에 따른 RPCS 동작 ······ | 25 |
| 제 2 절 증기덤프계통 설계변경 | 25 |
| 1. 증기덤프 설계변경 시 고려사항 | 25 |
| 2. 계통 성능 기준 | 26 |
| 제 3 절 터빈정지에 의한 원자로정지 연동회로 변경 | 27 |
| | |
| 제 4 장 한빛 1발전소 RPCS 적용 | 28 |
| 제 1 절 최적성능 해석코드(SLEP) ···································· | 28 |
| 제 2 절 한빛 1발전소 RPCS 적용 시뮬레이션 결과 | 28 |
| | |
| 제 5 장 결론 및 제언 | 34 |
| | |
| 의 그 T 원 | 200 |



표 목 차

| 張−1. | 각 발전소별 증기덤프계통 용량 |
|------|--------------------------------|
| 噩−2. | 각 덤프밸브의 구성 및 작동 |
| 표-3. | 부하감발 및 터빈트립 제어기 프로그램 |
| 표-4. | 밸브 구성12 |
| 표-5. | 출력에 따른 RPCS 동작20 |
| 표-6. | Total Power Defect23 |
| 噩−7. | Summary of Control Rod Worth23 |
| 표 -8 | 워자로축력에 따른 RPCS 동작사항 25 |





그림목차

| 그림-1. WH1000형 한빛 1발전소 설비별 정지원인 분석2 |
|---|
| 그림-2. OPR1000형 발전소 설비별 정지원인 분석 ·······2 |
| 그림-3 고리 3,4 & 한빛 1,2호기 증기덤프계통8 |
| 그림-4 .OPR1000형 원전 증기덤프 계통13 |
| 그림-5. 표준형(CE) RPCS 구성도19 |
| 그림-6. OPR1000형 원전 RPCS 논리 구성도21 |
| 그림-7. 노심내 제어봉 배치도면(한빛2호기 노심설계자료)24 |
| 그림-8. 전부하 상실시 원자로 출력29 |
| 그림-9. 전부하 상실시 원자로냉각재 평균온도29 |
| 그림-10. 전부하 상실시 가압기 압력30 |
| 그림-11. 전부하 상실시 증기발생기 압력30 |
| 그림-12. 전부하 상실시 제어봉 위치31 |
| 그림-13. 전부하 상실시 증기우회밸브 위치31 |
| 그림-14. 전부하 상실시 OPDT 마진32 |
| 그림-15. 전부하 상실시 OTDT 마진32 |





ABSTRACT

A study on the application of the reactor power cutback system to WH1000 type NPP

Yi, Beyong Ho

Adviser: Prof. Song Jong Soon
Department of Nuclear Engineering,
Graduate School of Chosun University

In the case of WH1000 type NPP(Hanbit #1,#2 / Kori #3.#4), Loss of external load due to a transient of external grid system, 2/3 main feedwater pump shutdown, Turbine-Generator system failure happen during full power operation, the reactor shutdown occurs. It requires lots of time, money and efforts to restart the nuclear power plant again. Increasing economic costs and decreasing of utilization rates are also inevitable.

On the other hand, OPR1000 type NPP doesn't occur reactor shutdown when the same incidents or events happen. Because the Reactor Power Cutback System(RPCS) and properly designed steam dump system can control the equilibrium of reactor power and turbine power well.

In this thesis, the RPCS designed for WH1000 type NPP is applied to prevent the reactor shutdown due to the 2nd system malfunctions such





as Loss of external load. SLEP code based on ACSL is used to verify the performance of the proposed RPCS. From the results of the simulation, Hanbit 1 NPP model with RPCS didn't happen the reactor shutdown when the Loss of external load happens. The designed RPCS is expected to play a role of improving national credibility, decreasing economic costs and improving NPP utilization.





제 1 장 서 론

WH1000형 원전의 경우 전출력 운전 중 외부 송전망계통 과도상태 등으로 인한 전부하 탈락 시, 주급수펌프 3대 운전 중 2대 정지 시, 터빈-발전기계통 고장 시 원자로 정지가 발생되며 원자로 재기동을 위한 많은 시간의 소요로 경제적 비용 증가와 원자력 발전소 이용률 저하가 생긴다.

반면, OPR1000형 원전의 경우는 전 부하 탈락과 같은 2차계통에 큰 과도현상이 발생하여도 원자로 출력 급감발계통(RPCS), 증기우회제어계통(SBCS), 터빈제어계통(TCS)의 유기적인 작동으로 열적 불 평형을 수용하여 원자로 정지 없이 계속운전이가능하여, 과도 상태발생 원인을 찾아 정비하고 원자로가 정지 되지 않았기 때문에 규제기관의 승인 절차 없이 짧은 시간 내에 발전 재개가 가능하다.

본 연구에서는 OPR1000형 원전과 WH1000형 원전의 주증기덤프계통을 비교, 검토하고 WH1000형 원전에 원자로출력급감발을 적용한 시뮬레에션 시험을 통해 웨스팅하우스 원전에서도 전부하탈락 및 터빈정지 사건 발생 시 원자로 정지 없이 발전소를 안정화 시킬 수 있음을 입증하고자 한다.





제 1 절 원전 노형별 발전소 정지원인 분석

WH1000형 원전인 한빛 1발전소 상업운전 이후 발생한 57건 불시정지를 기초로 설비별 정지원인을 분석한 결과 2차 계통(터빈-발전기, 복수 및 급수설비, 증기계통)의 원인으로 인한 정지가 31건(55%)으로 높은 비중을 차지하였다.

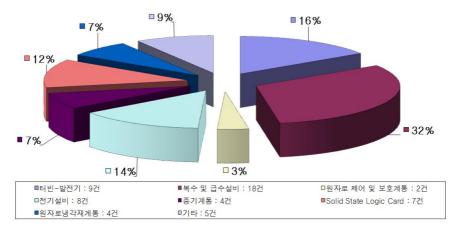


그림-1. WH1000형 한빛 1발전소 설비별 정지원인 분석

OPR1000형 원전의 상업운전이후 발생한 73건 불시정지를 기초로 설비별 정지원인을 분석한 결과 1차계통(원자로제어 및 보호계통, 원자로냉각재계통)의 원인으로 인한 정지가 28건(38%)으로 가장 많았고, 2차계통(터빈-발전기, 복수 및 급수설비, 증기계통)의 원인으로 인한 정지는 20건(27%)으로 한빛1발에 비해 상대적으로 적은 비중을 차지하였다.

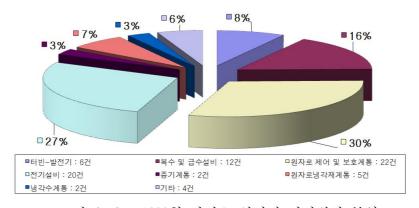


그림-2. OPR1000형 발전소 설비별 정지원인 분석



제 2 절 현황 및 문제점

운전이력에 따르면 WH1000형 원전(고리 3,4호기 및 한빛 1,2호기)의 경우 원자로 불시정지의 주원인은 터빈정지에 의한 원자로정지로 나타나고 있다.

WH1000형 원전의 경우에 30% 이상의 출력에서는 터빈정지가 발생하면 터빈정지연동에 의한 원자로정지가 발생된다. 반면에 OPR1000 원전에서는 터빈정지의 경우에도 NSSS 제어계통[원자로 출력급감발계통(RPCS), 증기우회제어계통(SBCS), 주급수제어계통(FWCS), 터빈제어계통(TCS)]의 유기적인 작동과 열적 불평형을 수용할수 있는 적정 용량의 계통설계에 의하여 원자로정지를 방지하고 있다.

WH1000형 원자로를 기준으로 설계한 한울 1,2호기는 고리 3,4호기 및 한빛 1,2호기와 유사한 열적용량이지만 전부하상실시 원자로정지 없이 소내부하 운전으로 수용할 수 있는데 이는 85%의 충분한 주증기 덤프 용량으로 설계되어 있어 가능하다.

OPR1000형 원전에서 전부하상실의 경우에는 55%의 주증기 덤프 용량과 원자로 출력급감발계통(RPCS)의 작동에 의하여 전출력 범위에서 원자로정지 없이 안정적으로 소내부하운전(House Load Operation)이 유지된다. 반면에, WH1000형 원전은 6 4%의 주증기덤프 용량을 가지고 있으나 전부하 상실이 발생하면 원자로 정지가 발생된다.

WH1000형 원전에서는 출력최적화 이후 전출력 주증기량의 64% 덤프 용량으로 전부하상실(5% House Load를 고려)시 원자로정지 없이 소내부하운전을 수용할 수 있는 설계요건을 고려하지 않았다. 발전소에서 발생한 운전사례조사결과에 의하면 전부하상실시 주로 가압기 고압력, OTAT 또는 증기발생기 수위를 비롯한 원자로 보호신호에 의한 원자로정지가 발생된다.

WH1000형 원전의 경우에는 100% 정상 출력에서는 45% 용량을 가진 주급수펌프가 3대 운전되기 때문에 1대의 주급수펌프가 상실되는 경우에 원자로정지가 발생하지 않으나 2대의 주급수펌프 상실시 증기발생기 저수위에 의한 원자로정지가 불가피하다. 따라서 전부하 상실과 같은 2차측 비정상 발생시 원자로정지를 막기 위해서는 한울 1발전소와 같이 충분한 주증기 덤프 용량을 확보하거나 OPR1000형과 같이 원자로 출력급잡발계통을 적용하여 비정상시 원자로 출력을 급감발시켜 원자로 보호신호의 발생을 방지시켜야 한다.



제 3 절 연구개발 필요성

원자력 발전소는 고장이나 사고 발생으로 원자로 정지가 발생하게 되면 보수적 의사 결정으로 원자로를 재기동 승인을 얻기 위해서 정지 원인 분석 및 안전성 평가 등을 수행하는데 많은 시간이 소요된다. 이에 따라 원자력 발전소 이용률 저하와 점검에 따른 경제적 비용 증가 등이 발생된다. 따라서 원전 운영에 있어 원자로 정지의 횟수를 줄이는 것은 경제성 향상뿐만 아니라 국민 신뢰성 확보 차원에서도 필수적이다.

WH1000형 원전의 경우 전체 원자로 정지 중 전출력 운전 중 외부 송전망계통 과도 상태 등으로 인한 전 부하 탈락, 주급수펌프 3대 운전 중 2대 정지, 터빈-발전기계통 고장에 따른 터빈 정지 등의 2차 계통 비정상에 의한 원자로 정지 확률이 OPR1000형 원전에 비해 약 2배 이상 높다. 전출력 주증기량의 64% 덤프 용량으로 전부하 상실을 감당할 수 없기 때문이다.

한울1,2호기와 같이 주증기 덤프 용량을 85% 이상 증가시키는 것도 해결방안일 수 있지만, 이는 대규모 기계설비의 용량 증가 및 많은 비용의 증가가 예상되므로 OPR1000형 원전이 채택하고 있는 원자로출력급감발계통 도입을 통한 성능개선의 경우가 실현 가능성이 클 것으로 판단된다. 이에 따라 WH1000형 원전인 한빛 1발전소에 OPR1000형 원전의 원자로출력급감발계통을 적용하기 위한 방안을 검토할 필요성이 있다.

WH1000형 원전과 OPR1000형 원전의 증기덤프계통을 비교 검토하고, OPR1000형 원전의 원자로출력급감발계통(RPCS)을 검토하여 WH1000형 원전에 적용 시 필요한 사항과 관련된 문제점을 종합 검토하여 한빛 1발전소에 RPCS를 적용시키는 방안을 검토해 보고자 한다.

국내에서의 성공적인 적용이 추후 국외의 WH형 원전에의 적용으로 이어질 경우, 원전 기술의 해외 수출과 함께 한국의 원전 운영 및 설계능력에 대하여 국제적인 신인 도 역시 제고할 수 있는 기회가 될 수 있을 것이다.



제 2 장 원전 계통 설명

제 1 절 WH1000형 원전의 증기덤프계통

1. 개요

증기덤프계통은 터빈부하 급감발 또는 상실시 원자로에서 생성되는 잉여의 열에 너지를 제거하기 위하여 원자로에서 생성된 증기를 일시적으로 복수기와 대기 중으로 배출시켜 1차 계통(Nuclear System)의 큰 동요를 방지하도록 설비가 이루어져 있다. 원자로제어계통은 정상 운전 시 10%의 부하 스텝변화나 분당 5%의 부하변화를 원자로 정지 없이 흡수할 수 있도록 되어 있으며 그 이상의 부하변동에 대해서는 증기덤프계통을 통하여 제어하도록 되어 있다.

각 발전소에서 설계된 능력 이내의 터빈부하가 상실되었을 경우에는 원자로제어계통이 10%, 증기덤프계통이 설계용량에 해당하는 부하를 원자로 정지 없이 담당 (표-1 참고)하도록 되어 있으며, 발전소 핵연료교체나 정비를 위하여 원자로를 냉각할 때에는 잔열제거계통을 운전 할 수 있는 177℃까지 원자로를 냉각하는데 증기덤프계통을 사용 한다. 즉 증기덤프계통의 주요기능은 다음과 같다.

첫째, 2차 계통에 큰 부하 감발 사건 발생 시 원자로에서 생성된 잉여의 증기를 제 거하여 1.2계통의 열적 평형을 유지시켜 불필요한 원자로 정지를 방지 한다.

둘째, 발전소 정지 시 원자로냉각재계통에서 발생하는 잔열을 제거하여 증기발생기의 안전밸브 작동 없이 원자로냉각재계통을 무부하상태로 안정시킨다.

셋째, 잔열제거계통 운전가능 시까지 발전소의 냉각기능을 담당한다.

넷째, 발전소 기동 및 정지 시 인위적인 부하를 담당한다.

표-1 각 발전소별 증기덤프계통 용량

| 증기덤프 용량 | 고리 1호기 | 고리 2호기 | 고리 3,4호기 | 한빛 1,2호기 |
|----------|--------|--------|----------|----------|
| • 복수기(%) | 40 | 40 | 36 | 36 |
| • 대기(%) | - | - | 28 | 28 |



2. 증기덤프계통 제어

터빈출력이 감소하였다는 부하감발신호(C-7A/7B)가 들어오면 증기덤프계통이 작동되어 인위적인 부하를 형성시키고 터빈으로 공급되던 증기의 일부가 우회하여 복수기 또는 대기로 흐르게 된다. 증기덤프계통은 정상운전 상태에서의 부하변동에 대해서는 설계된 원자로냉각재계통의 온도를 유지하기 위하여 원자로냉각재계통의 온도와 고압터빈 1단의 압력을 비교하여 자동으로 운전된다.(Tavg Mode) 반면에, 원자로가 정지되어 부하변동이 생길 때에는 증기덤프계통이 압력제어방식으로 전환되어 주증기 압력을 무부하압력으로 유지하게 된다.(Steam Pr. Mode)

주증기 압력을 내리고자 할 때에는 증기모관 압력제어기의 압력 설정치를 내려주면 자동으로 덤프밸브들이 작동한다. 원자로냉각재계통을 냉각할 동안에는 증기덤프계통을 수동으로 조작하여 증기발생기 압력을 제어함으로써 요구되는 냉각률을 만족시킬 수 있다.

증기덤프 밸브들은 증기덤프의 제어를 고르고 미세하게 제어할 수 있도록 그룹별로 분류되어 있다. 큰 부하 상실이나 발전소 정지 시에는 밸브들이 신속하게 열려인위적인 부하를 만들어 주며, 부하변동이 크지 않으면 안정적으로 1,2차 계통간에열적 평형 상태를 유지하기 위하여 서서히 밸브들이 조절되어 인위적인 부하를 제어한다.

증기덤프 밸브는 원자로 출력이 감소함에 따라 서서히 닫히기 시작하여 터빈출력과 원자로출력이 같아지게 되면 완전히 닫히게 된다. 비정상에 의해 증기덤프밸브가개방되어 예상치 않은 원자로냉각재계통의 급격한 냉각을 방지하기 위하여 직렬로증기덤프계통의 제어연동을 갖는 여러 개의 솔레노이드 밸브들이 설치되어 있으며제어신호나 구동원이 상실되면 모든 밸브들이 닫히도록 설계되어 있다.

터빈과 복수기를 보호하기 위하여 순환수 펌프가 운전되지 않거나, 복수기 진공이 낮을 경우에는 복수기 증기덤프밸브들이 열리지 않고, 대기 증기덤프밸브들이 열리 거나 주증기 배관에 설치되어 있는 증기발생기 보호밸브를 사용하여 증기를 배출하게 되며 필요에 따라서는 증기발생기 안전밸브가 작동하게 된다.

증기덤프 배관은 정상 운전 중에 정체되어 있으므로 주증기관으로부터 증기덤프 밸브 사이의 배관에는 응축수가 고이게 된다. 이 응축수는 정상 운전 중 계통을 보 호하기 위하여 자동으로 복수기로 배수되도록 되어 있다. 배수포트(Drain Pot)에 고 이는 응축수는 배수트랩(Drain Trap)을 거쳐 제거되고, 배수포트의 수위가 증가하게





되면 수위 감지장치에 의하여 제어밸브가 열려 응축수가 복수기로 제거된다.

증기덤프계통은 발전소 안전설비에 속하지 않으며 밸브정비 및 시험을 위하여 각 덤프밸브마다 수동차단밸브가 설치되어 있다. 증기덤프밸브가 비정상적으로 작동하 면 발전소가 정지되거나 원자로냉각재계통이 급격히 냉각될 수 있기 때문에 만일, 증기덤프밸브가 비정상적으로 작동하면 현장의 수동차단밸브를 닫아 발전소의 과도 현상을 방지할 수 있다.

3. 구성기기 및 기능

가. 제어연동 스위치

제어연동 스위치는 2개로 구성되어 다중성(Redundancy) 개념으로 설계되어 있으며 각 스위치마다 Off(Reset), On, By-pass Interlock의 3가지 위치를 갖고 있다. 정상운전 중에는 On의 위치로 선택되어 있으며 이 위치에서 부하감발 또는 터빈 정지 신호가 발생하거나, 압력모드(Steam PR. Mode) 위치에 놓으면 증기덤프 차단신호가 해제되어 복수기로의 증기덤프가 가능해진다. By-pass Interlock 위치는 원자로냉각재계통 냉각에 따른 원자로냉각재 평균온도 저-저 신호(Lo-Lo Tavg)에의해 증기덤프 차단신호가 발생하여 덤프밸브 중 3개 덤프밸브에 대한 증기덤프 차단신호를 해제하여 복수기로의 증기덤프를 계속할 수 있는 기능을 갖고 있다. Off(Reset) 위치는 모든 조건에서 증기덤프신호를 차단할 수 있는 기능을 갖고 있다. 증기덤프신호를 하단할 경우에는 제어연동스위치 2개중 1개만 조작하면 차단되고, 차단신호를 해제할 경우에는 2개의 스위치를 모두 조작해야 한다.

나. 제어모드 스위치

제어모드 스위치는 Tavg, Steam PR, Reset 3개의 위치로 되어 있다. 정상운전 중에는 Tavg Mode로 선택되어 있으며 증기덤프 동작 신호 발생시 Tavg와 Tref 의 온도차에 따라 증기덤프 밸브개도를 제어하여 원자로냉각재계통 온도를 유지하도록 되어 있다.

Steam PR 모드는 발전소 정지 시 선택하도록 되어 있으며 주증기관 압력에 따라 압력제어기가 작동하여 원자로냉각재계통의 온도를 유지하도록 되어 있다. 원자로냉각재계통의 냉각이 필요한 경우에는 자동 상태에서 제어기의 설정치를 변경하거나, 수동 상태에서 수동으로 밸브를 조절하여 냉각을 제어한다. Reset 모드는 부





하감발신호에 의하여 발생한 부하감발신호(C-7A/7B)를 제거하는데 쓰인다.

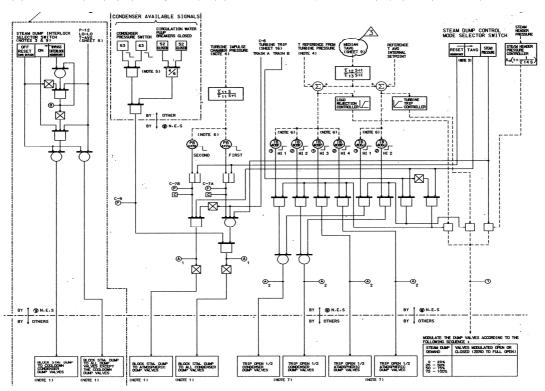


그림-3. 고리 3.4 & 한빛 1.2호기 증기덤프계통

다. 부하감발 조절기(Load Rejection Controller)

부하감발신호(C-7) 작동 시 증기덤프를 제어하는 기기로 Tavg 모드에서 증기덤프 허용신호가 들어오면 Tavg와 Tref 온도차에 의하여 덤프밸브를 제어한다. 표-2와 표-3에서 보는 바와 같이 4개의 뱅크로 구분되고, 덤프밸브의 수는 총 16개로 구성되어 있다.

온도차가 증가함에 따라 불감대(Dead Band)를 벗어나게 되면 뱅크 1의 밸브들이 열리기 시작하고 온도편차 HI-1 바이스테블 작동에 의하여 완전개방신호가 발생된다. 온도차가 더 증가함에 따라 다음 뱅크의 밸브들이 열리기 시작하여 원자로 냉각재계통의 온도를 제어하게 되며, HI-2 바이스테블이 작동하면 나머지 덤프밸브에 대해서 완전개방신호가 발생된다. 이런 방식으로 HI-4의 밸브까지 개방되고 온도편차가 줄어들어 닫힐 때는 역순으로 닫히게 된다.





표-2. 각 덤프밸브의 구성 및 작동

| 작동 발전소 | 뱅 크 | 덤프요구 신호(%) | 동작 덤프밸브 | 복수기 | 비고 |
|----------------------|--------|---------------|---------------------------|----------|--------------|
| | 1 | | TV414,415,439 | A | 냉각용 밸브 |
| 고리 3,4호기 한빛 1,2호기 | 2 | 0 ~ 56 | TV410,411,412,413,437,438 | /B /C | : 뱅크 1 |
| (64% 용량) | 3 | 0 ~ 100 | TV418,419,420 | 대기 | (TV-414,415, |
| | 4 | 0 ~ 100 | TV421,422,423,424 | 네기 | 439) |

표-3. 부하감발 및 터빈트립 제어기 프로그램

| 구성요소 | 고리3,4호기 | 한빛1,2호기 |
|---------------------------------|--------------|--------------|
| 증기덤프용량 | | |
| • 복수기 | 36 | 36 |
| • 대기 | 28 | 28 |
| 덤프밸브 수량 | 9(복수기)/7(대기) | 9(복수기)/7(대기) |
| 부하감발 | | |
| 제어프로그램 불감대 | 2.78 | 2.78 |
| 덤프량/온도차(%/℃) | | |
| • 코 - 1 | 13.3/5.56 | 13.3/5.44 |
| • 코 - 2 | 39.2/11.0 | 39.2/10.88 |
| • 고 - 3 | 52.5/13.8 | 52.5/13.67 |
| • 고 - 4 | 70/17.5 | 70/17.38 |
| 터빈트립 제어프로그램 불감대 덤프량/온도차(%/℃) | 0 | 0 |
| • <u>¬</u> – 1 | 13.3/5.94 | 13.3/5.78 |
| • 고 - 2 | 39.2/17.5 | 39.2/17.38 |
| 주증기헤더 압력제어 설정치(kg/c㎡) | 76.8 | 76.8 |

라. 터빈트립 조절기(TBN Trip Controller)

터빈정지신호 발생 시 증기덤프를 제어하는 기기로 모든 작동방법은 부하감발 제어기와 동일하다. 부하감발 조절기와 다른 점으로는 표-3에서 보는 바와 같이





온도편차에 대한 불감대 없이 덤프밸브가 작동한다. 터빈트립(C-8)신호 발생 시 복수기 덤프만으로도 충분히 열을 제거할 수 있으므로 덤프밸브가 온도편차에 따라다 개방되는 것이 아니고 복수기로 가는 뱅크-1 및 2의 밸브들(9개)만 조절 또는 급속 개방되고, 대기용 덤프밸브들(7개)은 개방되지 않는다.

마. 연동신호

- (1) 복수기 사용가능 연동(C-9) 순환수 펌프 4대 이상 운전 및 복수기 진공(140 mmHg.abs 이하) 만족 시 덤프계 통 사용가능 신호 발생
- (2) 원자로냉각재 평균온도 저-저(P-12) 원자로냉각재 평균온도가 289.44℃ 이하로 떨어지면 증기덤프가 차단되도록 되어 있다. 이 설정치 이하에서 계속 냉각운전을 하려면 제어연동 스위치를 By-Pass Interlock 위치로 선택하면 냉각용 덤프밸브를 사용할 수 있다.
- (3) 부하감발 신호(C-7) 터빈부하감발신호로 C-7 [C-7A > 10%, 120초 이내, C-7B > 50% ,120초 이내] 신호가 발생되면 증기덤프 허용신호가 발생한다.





제 2절 OPR1000형 원전의 증기덤프계통

1. 개요

증기우회제어계통(SBCS, Steam Bypass Control System)은 운전 중 터빈정지 등의 부하감발 시 원자로출력 급감발계통(RPCS, Reactor Power Cutback System), 원자로 제어계통(RRS)과 같이 운전되어 원자로 정지 없이 1차계통과 2차계통의 에너지 평형상태를 유지하는 역할을 수행한다.

원자로제어계통은 10% 단계변화 및 분당 5%의 부하변화까지는 원자로 출력과 냉각재 평균온도를 설정치 이내로 유지시킬 수 있도록 되어 있다. 증기우회제어계통은 제어봉 자동인출 금지신호(AWP, Auto Withdrawal Prohibit)와 제어봉 자동동작금지신호(AMI, Auto Motion Inhibit)를 발생시킨다. 제어봉 자동인출 금지신호는 증기우회계통이 작동할 때마다 발생되는데 그 이유는 증기우회 시 제어봉 자동인출이오히려 발전소 제어에 방해가 되기 때문이다. 제어봉 자동이동 금지신호는 터빈정지등의 부하 감발 시에도 원자로출력을 일정수준으로 유지시키는 역할을 수행하는데 그 이유는 일시적인 고장으로 인한 부하 감발시 빠른 출력복구가 가능하도록 하기위함이다.

전부하(100%) 감발시 원자로 정지 없이 발전소를 안정화시키기 위해서는 아주 대용량의 터빈 우회계통과 복수기가 필요한데 이러한 용량 요구를 최소화시키기 위해원자로출력 급감발계통(RPCS)과 원자로제어계통이 같이 이용된다. 그 결과 증기우회제어계통의 용량은 복수기 배기 40%, 대기덤프 15%로 총 55%의 용량을 가지며, 나머지 잉여출력은 원자로 출력 급감발계통과 원자로 제어계통에서 원자로출력을조절하여 1,2차 계통간 에너지 평형을 유지한다.

증기덤프계통의 주요기능은 다음과 같다.

첫째, 원자로출력감발계통 및 다른 제어계통과 같이 운전되어 터빈우회밸브를 통해 증기량을 조절함으로써 핵증기 공급계통(NSSS)의 잉여에너지를 자동으로 제거한다. 둘째, 발전소 가열 및 냉각운전시 냉각재 평균온도를 수동으로 제어한다.

셋째, 터빈우회 요구조건이 있을 경우에는 언제나 제어봉이 자동으로 인출되지 않도록 제어봉 자동인출금지 신호를 제어봉 구동장치 제어계통으로 보낸다.

넷째, 원자로 출력이 15%이하일 때는 언제나 제어봉 자동동작 금지신호를 보낸다. 다섯째, 터빈출력이 기 설정된 설정치(15% 터빈출력) 이하로 낮아지고 터빈우회밸





브가 원자로 잉여출력을 감당할 수 있을 때 제어봉 자동동작금지신호 발생시킨다. 여섯째, 과도한 터빈부하 감발시 원자로출력 급감발 요구신호를 원자로 출력급감발 계통에 제공한다.

일곱째, 저압력 및 고부하 터빈런백 허용신호를 원자로출력 급감발계통에 제공한다.

2. 증기덤프 구성 및 제어

가. 증기덤프밸브의 구성

증기덤프 밸브는 총 8개의 덤프밸브로 구성되어 있으며, 그중 6개는 복수기 덤프밸브이고, 나머지 2개는 대기덤프밸브로 증기우회 요구량에 따라 연속적으로 열려뱅크 5의 밸브가 순서에 따라 가장 나중에 열리고 가장 먼저 닫힌다. QUICK OPEN시 20% 요구신호에 뱅크 1,2 & 3의 밸브 1~4가 개방되고, 40% 요구신호에뱅크 4,5의 밸브 5~8이 개방된다. 또한 요구신호가 45% 이상이 되면 RPCS가 동작된다. 발전소를 정지 및 냉각할 경우에는 뱅크 1의 밸브 1이 원자로 정지 후 붕괴열 및 원자로냉각재펌프의 열을 제거하게 된다.

표-4. 밸브 구성

| 밸브 뱅크 | 덤 프 밸 브 | 용량 | 방출 | 출 부 |
|----------|-------------|-------------|----|------------|
| 뱅크 1 | NO. 1 V/V | 0 ~ 12.5% | ۸ | |
| 뱅크 2 | NO. 2 V/V | 12.5 ~ 25% | A | ,,,, |
| 뱅크 3 | NO. 3&4 V/V | 25.0 ~ 50% | В | 복수기 |
| 뱅크 4 | NO. 5&6 V/V | 50.0 ~ 75% | С | |
| 뱅크 5 | NO. 7&8 V/V | 75.0 ~ 100% | 대 | |





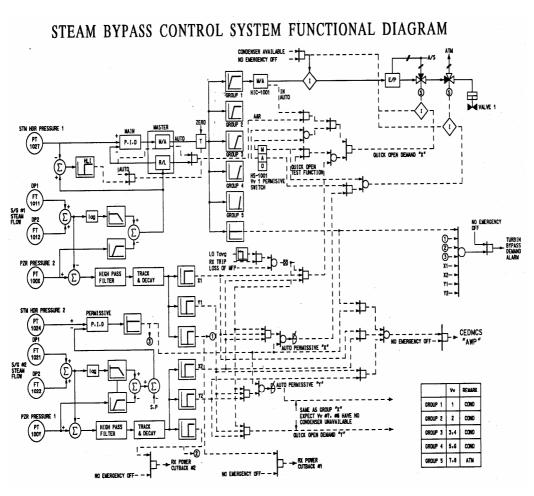


그림-4. OPR1000형 원전 증기덤프 계통

나. 증기덤프 제어

(1) 조절모드(Modulation Mode)

조절모드는 비교적 작은 과도상태일 때 쓰이고, 주증기 헤더압력을 계속 감시하다가 압력이 과도하게 증가되면 프로그램된 설정치에 일치하게 헤더압력을 조절하는 터빈 우회밸브를 통해서 증기를 복수기로 직접 흘러 보낸다.

단일 부품고장 개념에 의해서 하나의 증기 우회밸브가 열리기 위해서는 독립된 두 개의 요구신호, 즉 주 신호와 허용신호가 필요하다. 2개의 주증기 헤더압력이 똑같이 따로 만들어져서 하나는 밸브제어신호를 만드는 주 조절제어 채널로, 다른 하나는 밸브 허용신호를 만드는 허용 조절제어 채널로 가게 된다.



① 주증기 헤더압력 설정치(SP1.SP2)

2개의 동일한 주증기 헤더압력 설정치가 만들어져서 증기 우회제어계통 동작 신호가 발생될 때 증기압력을 유지하는데 이 설정치는 증기유량의 함수로서 프 로그램화되어 있다.

설정치 프로그램은 증기 우회제어계통의 출력함수로서 제어할 압력을 표시하는데 압력/출력 곡선과 어느 정도 압력 차이를 유지하도록 설정된다. 그래서 이압력 설정치는 증기압력의 조그만 변화에 밸브가 자주 열리지 않을 정도로는 크고, 증기 우회제어계통 신호에 응답이 잘 될 수 있도록 적절히 작은 압력차를 나타내 준다. 이렇게 만들어진 설정치 프로그램은 합산기에서 가압기 압력과 합해지는데 이는 냉각재계통에서 생기는 과도상태를 미리 예측하여 빠르게 응답코자함이다. 즉, 가압기 압력변화에 따라 설정치 프로그램을 올리고, 내리는데 1차측압력이 바이어스 기준점(160.284 kg/c㎡·A)을 초과하여 1 kg/c㎡ 증가하면 바이어스는 2.5 kg/c㎡ 증가하여 설정치는 2.5 kg/c㎡ 만큼 내려가며 바이어스는 최대 7.0 kg/c㎡까지 변화될 수 있다.

② 밸브개방 요구신호

주제어기(PID: 비례적분 및 미분)에서 주증기 공통관 압력설정치와 실제 헤더 압력이 비교되어 오차신호가 만들어지고 이 오차신호가 증기우회 요구값으로서 밸브개방 요구신호가 된다.

③ 밸브 제어 프로그램 회로

마스터 제어기의 출력이 밸브 요구신호인데 각기 다른 5개의 밸브 프로그램으로 입력된다. 위의 표-4와 같이 증기우회 제어밸브를 요구량에 따라 연속적으로 열리게 되어 있어서 뱅크 프로그램 1의 출력은 1번 밸브를, 뱅크 프로그램 2의 출력은 2번 밸브, 뱅크 프로그램 3의 출력은 3,4번 밸브를, 뱅크 프로그램 4의 출력은 5,6번 밸브를, 뱅크 프로그램 5의 출력은 7,8번 밸브를 각각 제어하게 되어 있다.

④ 밸브허용 요구신호

똑같은 밸브허용 요구신호가 증기우회 제어밸브를 제어하는데 있어서 밸브개방 요구신호와 같이 사용되어지는데 이는 단일부품 고장개념에서 비롯된 것이다. 허용신호는 밸브조절 요구신호보다 먼저 발생되고 또한 나중까지 남아있게 되는데 이 신호는 밸브개방 요구신호와 같은 방법으로 만들어져 그 다음 단에 고정바이어스(1.4 kg/cm²)를 사용함으로써 가능해진다.





(2) 급속열림모드(Quick Open Mode)

급속열림기능은 조절모드에 비해 상대적으로 큰 과도상태일 때 쓰이게 되는데 조절요구를 우선(Override)시켜 1초 이내에 밸브를 열리게 한다.

① 급속열림 요구신호

급속열림회로는 X1, X2, Y1, Y2의 4가지 요구신호가 있는데 X1, X2,는 터빈우회밸브 1~4를, Y1, Y2는 터빈 우회밸브 5~8를 각각 열게 되어 있다. 또한 증기발생기 1의 증기유량 회로에서 급속열림 X1, Y1,신호가, 증기발생기 2의 증기유량 회로에서 급속열림 X2, Y2신호가 발생되는데 합산기에서 가압기 압력신호가보상된다. 여기서 가압기 압력이 크게 증가하면 급속 열림신호가 올라가고 가압기 압력이 크게 감소하면 급속 열림신호가 내려가는 바이어스 신호가 만들어진다. 실제 신호발생시 밸브 1~4는 급속열림 요구시 동시에 열리게 되고 밸브 5~8은 설정치가 보다 높기 때문에 1~4보다 나중에 열리게 되어 있다.

② 급속열림 방지회로

급속열림 신호가 존재하더라도 증기 우회밸브가 열리지 않는 경우는 2가지이다. 첫째, 원자로가 트립된 직후에 냉각재 평균온도가 낮을 때이다. 출력이 낮은 상태이고 1차측이 열을 충분히 흡수할 수 있는 용량을 갖고 있으며 밸브를 빨리움직일 경우 영출력으로 안정되기가 어려워지기 때문이다.

둘째, 급수펌프 1대 상실된 직후이다. 그 당시 출력이 75% 이상이었다면 원자로 출력 감발계통이 동작되어 원자로는 물론, 터빈출력까지 감소되어 냉각재가 과냉각 되는 것을 방지하기 위함이다.

③ 복수기 연동신호

복수기가 우회 증기유량을 받을 조건[순환수 펌프 6대중 4대 이상 운전 중 및 복수기 진공이 설정치(166 mmHg.abs 이하)]이 되지 않을 시에 터빈 우회밸브를 열지 못하게 하여 터빈과 복수기를 보호한다. 또한 주제어실과 증기 우회제어계통 시험 판넬에 비상정지 스위치가 있어서 터빈 우회밸브로 가는 모든 신호를 차단하며, 이는 수동으로 운전원이 동작하게 되어 있다.

④ 자동 인출금지(Auto Withdrawal Prohibit)

터빈 우회밸브가 자동으로 개방되는 요구조건이 있다는 것은 1차계통의 에너지가 과도하다는 증거이므로 원자로출력을 증가시키지 않기 위해서 자동인출금지신호(AWP)를 제어봉 구동장치 제어계통(CEDMCS)으로 제어봉 인출을 차단하여 원자로 출력 상승을 방지해준다.





⑤ 자동동작금지(Auto Motion Inhibit)

증기우회제어계통에 자동 동작금지(AMI)라는 특성이 있어서 발전소를 융통성 있고, 확실하게 운전할 수 있도록 되어 있다. 터빈부하가 자동 동작금지 허용 설정치보다 떨어졌을 때 제어봉이 자동으로 제어가 안되는 원자로출력을 운전원이 설정할 수가 있다. 그러나 원자로출력이 터빈 우회밸브의 용량보다 더 클 때는 제어봉 동작이 자동으로 차단되는 것을 방지해야 하기 때문에 자동 동작금지 설정치는 밸브용량에 제한을 받는다. 이것이 바로 자동 동작금지 문턱출력인데 수동 설정치와 2차 계통용량중 적은 값이 되며 설제로는 이 출력보다 낮을 때에 자동 동작금지가 발생하게 된다. 한편, 자동동작 금지신호는 원자로 제어계통 자동운전의 범위인 원자로출력 15%미만에서는 항상 발생하게 되어 있다.

자동동작 금지회로의 1차적인 목적은 일시적인 문제로 터빈 트립이 되거나 소내부하까지 부하감발이 되어서 빠른 시간내에 다시 복구될 수 있는 상황에서 원자로출력을 자동적으로 계속 유지하는데 있다. 이런 관점에서 부하감발이 일어날경우 초기 원자로출력이 자동동작 금지 문턱값보다 낮다면 제어봉의 삽입, 인출이 방지된다. 그렇지 않다면 원자로출력이 자동 동작금지 문턱값보다 적어질 때까지 계속 움직이게 되는데 어느 경우이든 터빈 우회밸브가 터빈추종 제어모드로서의 역할을 충분히 하게 된다. 자동 동작 금지개념은 터빈을 계통병입하여 초기에 부하증발 시에도 유용하게 쓰이는데 출력 15%이상에서 제어봉 구동장치제어계통이 자동제어되면 운전원이 계통병입이나 터빈부하증발에 전념할 수 있고 터빈이 원자로측 부하보다 더 커지게 되면 그 후로는 제어계통제어에 의해원자로가 터빈 추종제어를 시작하게 된다.





제 3 절 WH1000형과 OPR1000형 원전 증기덤프계통 비교

앞의 1절과 2절에서 설명한 WH1000형 원전과 OPR1000형 원전의 증기덤프계통의 특징을 개략적으로 정리해 보면 WH1000형 발전소는 정상운전 중에 Tavg모드에서 Tavg와 Tref를 비교하여 온도 편차에 따라 조절신호 또는 급속개방신호를 내보내 밸브가 조절 또는 급속개방되고, 원자로 정지 중에는 증기압력모드로 전환시켜 발전소를 무부하상태로 유지 또는 냉각하기 위한 개념으로 되어 있다. 증기덤프은 대기덤프 28%와 복수기덤프 36%를 합하여 64% 덤프용량이다.

반면 OPR1000형 원전은 새로운 제어방식을 사용하는데, 이는 WH형 발전소 증기 압력모드의 일정압력유지(무부하 압력) 개념을 출력준위에 따라 프로그램 압력화하는 개념을 사용하고, 원자로제어계통과 이를 연계시켰다. 즉, 주증기의 유량을 출력으로 변환시켜 만들어진 주설정치 값과 이때 증기발생기의 실제 운전압력을 비교하여실제 압력이 더 높게 되면 증기덤프가 되는 개념을 갖고 있다. 또한 증기덤프계통을원자로 출력급감발계통, 제어봉 제어계통(AWP, AMI), 가압기 압력 및 수위제어계통과 서로 연계시켜 과도 상태시 원자로출력을 터빈출력보다 더 높게 유지시킬 수 있게 하였다. 이렇게 함으로써 증기덤프의 용량이 55% 밖에 되지 않음에도 불구하고전부하상실 시에도 원자로 정지 없이 발전소를 안정시킬 수 있다. 따라서 OPR1000형 원전은 원자로정지 예방으로 발전정지기간의 단축, 폐기물생성 최소화 및 원자로출력 진폭 최소화 등의 장점을 갖고 있다.





제 4 절 OPR1000형 원전의 원자로출력급감발계통 (Reactor Power Cutback System)

1. 기능

첫째, 주급수펌프 정지시에 원자로와 터빈 출력을 신속하게 감소시켜 증기발생기 '저'수위에 의한 원자로 정지를 방지한다.

둘째, 터빈정지나 큰부하 감발시 SBCS으로부터 신호를 받아 원자로 출력을 신속하게 감소시켜 원자로정지나 1,2차측 안전밸브 개방을 방지한다.

셋째, 선택된 제어봉이 낙하되어 원자로출력을 20~80%사이에서 안정되게 유지한다.

넷째, RPCS가 자동 동작되는 것을 운전원에게 알려주어 필요시 수동동작과 출력감 발을 멈출 수 있다.

2. 설계기준

첫째, 자동 또는 수동으로 제어봉 그룹 선택이 가능하다.

둘째, 자동 또는 수동으로 RPCS 동작 개시 가능하다.

셋째, RPCS 동작 이후 자동 또는 수동으로 제어봉 제어가능하다.

넷째, RPCS 자동동작상태 표시 및 수동조작을 위한 제어 판넬을 제공한다.

다섯째. RPCS 자동동작을 수동으로 금지시킬 수 있는 기능을 제공한다.

RPCS 구성은 다음과 같다.

- O Programmable Logic Controller
 - CEDMCS C4 Cabinet 에 위치
- CEDMCS PLC Program 일부분으로 구현됨
- 2/2 Logic 구현
- O RPC Control Panel (RPCCP)
- MCB 에 위치
- 운전요원 위한 표시 및 제어기능 제공
- O RPC Test Panel
- CEDMCS C4 Cabinet 위치





- RPCS 수동시험 기능제공

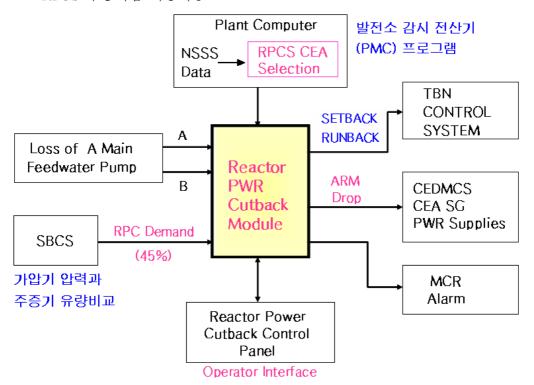


그림-5. 표준형(CE) RPCS 구성도

3. RPCS 동작 특성

첫째, 선택된 제어봉을 낙하시킨다.

- BANK 1 낙하 : 초기노심에서 원자로 30~35% 감발
- BANK 1+2 낙하 : 초기노심에서 원자로 60~70% 감발

둘째, 터빈 Setback/Runback 신호를 발생시킨다.

- O TBN Setback : TBN 60%까지 DCM에서 600%/min으로 감발
- TBN Runback: TBN 60%까지 DCM에서 133%/min으로 감발 [1차 Runback], 이후 Tavg와 2차 주증기압력의 평형이 될 때까지 60% 이하에서도, 터빈출력을 감발하여 1,2차 균형유지[2차 Runback]
- O 원자로 출력 = SBCS+TBN 출력





표-5. 출력에 따른 RPCS 동작

| 원자로출력(%) | | 60% 이하 | 60%~80% | 80% 이상 |
|-----------------------------|---------------------------------|-------------------|---|--|
| Event | | Loss of FWP | Loss of FWP | Loss of FWP |
| | | Load Rejection | Load Rejection | Load Rejection |
| Rx Cutback (CEA Drop) | | No Action | No Action | Cutback to Rx 25~80% |
| | Setback (600%/min) No Action | | Setback to 60% | Setback to 60% |
| 터빈 Runback (133%/min) | | No Action | ● 1차 Runback to 60% ● 2차 증기모관 Lo Pr TBN Runback | ● 1차 Runback to 60% ● 2차 증기모관 Lo Pr TBN Runback |
| 부하 담당 | | SBCS | SBCS 55%, RRS 10%/step, 계통흡수 10% | • Rx>TBN : SBCS & RRS • Rx <tbn :="" runback<="" td=""></tbn> |

4. RPCS 입력신호

RPCS 입력신호는 다음과 같다.

- 주급수 펌프 정지 신호
 - TD MFWP 제어유 저압력 : PS-259A/B/C, 260A/B/C
 - MD MFWP : 차단기 보조접점 신호
- 큰 부하 감발신호 (터빈 TRIP 포함)
 - SBCS, 가압기 압력과 SG 증기 유량신호 비교 : 45%
- O 수동조작
 - 수동으로 작동 : MANUAL Mode + ARM + DROP





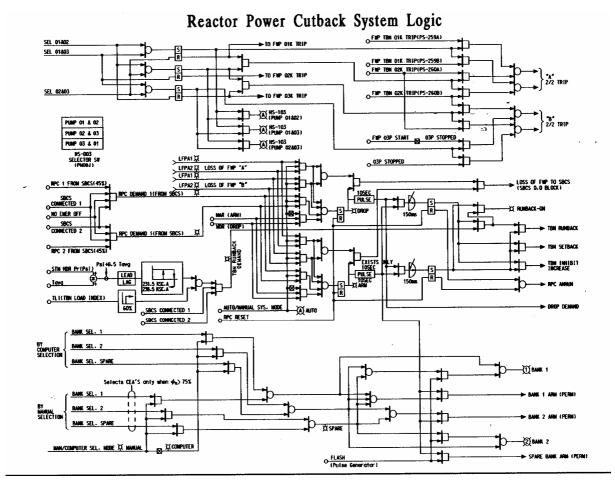


그림- 6. OPR1000형 원전 RPCS 논리 구성도



제 3 장 WH1000형 원자로출력급감발계통 적용

제 1 절 원자로 출력급감발계통(RPCS)

한빛 1발전소는 출력최적화 이후 전출력 주증기량의 64% 덤프 용량으로 전부하상 실(5% House Load를 고려)시 원자로정지 없이 소내부하운전을 수용할 수 있는 설계 요건은 고려되지 않았다. 발전소에서 발생한 운전이력 조사결과에 의하면 전부하상 실시 주로 가압기 고압력, ΟΤΔΤ 또는 증기발생기 수위를 비롯한 원자로 보호신호에 의한 원자로정지가 발생된다.

WH1000형 원전의 경우에는 100% 정상 출력에서는 45% 용량을 가진 주급수펌프가 3대 운전되기 때문에 1대의 주급수펌프가 상실되는 경우, 터빈 출력이 신속히 감발되어(Turbine Runback) 90%에서 유지되고 원자로 출력은 10% 단계변화를 지원하는 원자로제어계통에 의해 90%까지 감소되어 터빈-원자로 출력의 평형이 유지된다. 2대의 주급수펌프가 상실되면 터빈 런백이 발생되고 터빈 출력이 45%에서 유지된다. 원자로 출력의 급격한 감소 불가능으로 터빈-원자로 출력의 불일치가 발생되고 부족한 급수 공급과 증기발생기 내 Shrink 현상으로 증기발생기 저수위에 의한 터빈 정지가 발생되어 터빈정지에 의한 원자로 정지가 발생하거나 1/2차측 출력 불균형에 의한 1차측 과열(가압기 고압력, OTΔT)로 원자로정지가 발생하게된다.

이를 방지하기 위해서 OPR1000형의 원자로 출력급감발계통(RPCS)이 필요하다. 어떤 큰 과도상태 즉 전부하상실, 터빈정지 또는 운전 중인 2대의 주급수 펌프정지 등을 대비하여 선택된 제어봉을 노심에 낙하(Drop) 시켜 원자로 출력을 감소시킴과 동시에 증기덤프 계통 동작과 터빈출력을 신속하게 감소(Setback)시켜 1,2차 계통간의에너지 균형을 이루도록 한다.

1. 원자로 출력급감발계통 Target Power 선정

출력급감발계통 동작시 원자로 출력의 Target Power를 선정하기 위해서는 과도상 태시 터빈 출력의 변화를 살펴보아야 한다. 전출력 운전 중 주급수펌프 3대중 2대 정지시 터빈 출력은 45%까지 감소된다. 외부 송전계통의 문제로 터빈-발전기가 소내부하로 운전되는 경우 소내부하 5%와 복수기 증기덤프용량 36%의 합인 41%에서 유지 될 것이며, 터빈-발전기가 정지된 경우 복수기 증기덤프용량인 36%의 출력을





감당 할 수 있게 된다. 따라서 위 3가지 과도현상 중 가장 높은 출력인 45%를 원자로 출력급감발계통(RPCS) 동작 시 목표 출력으로 설정하여야 한다.

2. 원자로 Target Power 45%시 낙하 제어봉 선정

핵설계보고서의 출력결손표(표-6. Total Power Defect)에서 원자로 출력 95.6% (한빛 1발전소 평균 원자로 출력)에서 45%까지 감발시 필요한 반응도를 보간법 (Interpolation) (1),(2),(3)을 이용하여 계산하면, 주기별로 각각 BOL 724.3 pcm, MOL 934.2 pcm, EOL 1340.7 pcm이 된다.

- PD_A : Power Defeat at the power(PA) under X in Ξ 6 (1)
- PD_B: Power Defeat at the power(PB) above X in 斑 6 (2)
- $PD_X = PD_A + (PB X) * (PD_A PD_B) / (PB PA)$ (3)

핵설계보고서의 제어봉제어능(표-7. Summary of Control Rod Worth)에서 해당되는 제어봉을 검토하면, 노심 주기초(BOL)에서는 제어봉 D 뱅크, 노심 주기중(MOL)과 노심 주기말(EOL)에서는 제어봉 C 뱅크가 노심에 삽입될 경우 목표 원자로출력과 유사한 출력에 도달할 수 있다.(노심 설계시 RPCS 동작고려 사항 반영)

표-6. Total Power Defect

| BURNUP | ppm | 0 % | 25 % | 50 % | 75 % | 100 % |
|---------------------|------|-----|------|-------|-------|-------|
| BOL (150 MWD/MTU) | 1800 | 0 | -413 | -786 | -1144 | -1498 |
| MOL (8000 MWD/MTU) | 1100 | 0 | -514 | -982 | -1437 | -1906 |
| EOL (19420 MWD/MTU) | 500 | 0 | -804 | -1490 | -2134 | -2813 |

The Nuclear Design Report for HANBIT NPP unit 1 Cycle21 (KNF-Y1C21-12009)

| Rod | BOL, HF | P, Eq Xe | MOL, HE | FP, Eq Xe | EOL, HFP, Eq Xe | | |
|---------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--|
| Configuration | Bank Worth(pcm) | Cumulative Worth(pcm) | Bank Worth(pcm) | Cumulative Worth(pcm) | Bank Worth(pcm) | Cumulative Worth(pcm) | |
| D | 500 | 500 | 510 | 510 | 590 | 590 | |
| D+C | 1,110 | 1,610 | 1,160 | 1,670 | 1300 | 1,890 | |
| D+C+B | 1,650 | 3,260 | 1,620 | 3,290 | 1,710 | 3,600 | |
| D+C+B+A | 500 | 3,760 | 570 | 3,860 | 810 | 4,410 | |
| D+C+B+A+S | 4,670 | 8,430 | 5,170 | 9,030 | 5,990 | 10,400 | |



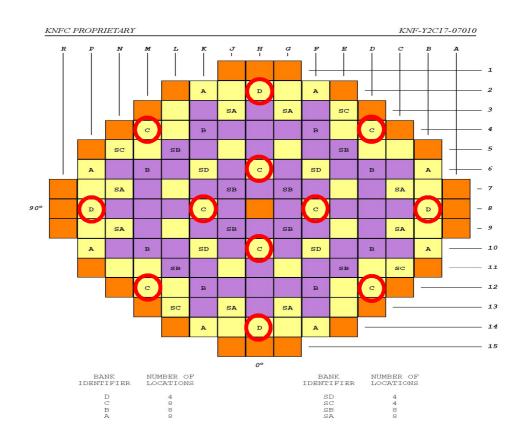


Figure 2-2. Control and Shutdown Rod Locations

2. CORE DESCRIPTION Page 2–8

그림-7. 노심내 제어봉 배치도면(한빛2호기 노심설계자료)





3. 출력에 따른 RPCS 동작

원자로출력에 따른 RPCS 동작사항은 다음과 같다.

표-8. 원자로출력에 따른 RPCS 동작사항

| 원자로출력(%) | | · 원자로출력(%) 50% 이하 | | 50% 이하 50%~64% | | 64% 이상 | |
|------------------------|-----------------------|----------------------|---|---|--|--------|--|
| | | | 2대 주급수펌프 | 정지 | | | |
| | Event | Load | Rejection(터빈 출력 : | 소내부하 유지) | | | |
| | 터빈 정지 | | | | | | |
| Rx Cutback (제어봉 낙하) | | No Action | No Action | Cutback to Rx 25~45% | | | |
| Setback (600%/min) | | No Action | Setback to 45% | Setback to 45% | | | |
| 터빈 | Runback (133%/min) | No Action | ● 1차 Runback to 45% ● 2차 증기모관 HI Pr TBN Runback | ●1차 Runback to 45% ●2차 증기모관 HI Pr TBN Runback | | | |
| 부하 담당 | | 증기덤프계통 | 증기덤프 64% | ●Rx>TBN: 증기덤프 & 제어봉제어 ●Rx <tbn: runback<="" td=""></tbn:> | | | |

제 2 절 증기덤프계통 설계변경

1. 증기덤프계통 설계변경 시 고려사항

증기덤프계통 작동시 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.

첫째, 증기덤프제어계통은 원자로 출력 급감발계통(RPCS)과 다른 원자로 설비계통 (NSSS)과 함께 동작되어야 한다.

둘째, 증기덤프제어계통은 다른 제어계통과 적절히 연계되어 원자로에서 생성되는 잉여출력을 감당하는데 그 방법은 터빈우회 증기량을 조절하여 발전소 에너지 평형 상태를 유지시켜야 한다.

셋째, 증기덤프제어계통의 입력신호는 증기유량, 원자로냉각재 평균온도 및 고압터



빈 1단 증기압력을 이용하고 이 계통의 출력신호는 터빈덤프 증기량을 조절하며 터빈덤프 증기 최대용량(64%)을 초과하는 출력 감발시에는 원자로 출력급감발계통 (RPCS)을 작동시켜야 한다.

넷째, 증기덤프제어계통은 전출력 운전 중 터빈정지 등의 부하감발에도 원자로 정지와 가압기 및 주증기관의 안전밸브의 동작 없이 발전소 에너지 평형을 이루어야 한다.

다섯째, 증기덤프제어계통은 주급수펌프 3대 중 2대 정지시에도 원자로정지와 가압 기 및 주증기관 안전밸브의 동작없이 발전소 에너지 평형을 이루어야 한다.

여섯째, 증기덤프제어계통은 원자로 정지 후, 원자로 잔열을 제거하는 역할을 수행하며 가압기 및 주증기관 안전밸브의 동작 없이 원자로를 고온대기 상태로 냉각시킬 수 있어야 한다.

일곱째, 주급수펌프 정지 시 주급수펌프 제어계통에서 발생되는 신호를 받아 자동적으로 동작되어 원자로와 터빈출력을 신속히 감소시켜 증기발생기 저수위로 인한 원자로 정지를 방지해야 한다.

여덟째, 원자로 출력급감발계통이 자동적으로 동작되는 것을 운전원에게 알려주고, 운전원이 수동으로 동작시킬 수 있으며, 또한 출력 감발을 멈추게 할 수도 있어야 한다.

2. 계통 성능 기준

증기덤프제어계통은 정상 출력운전 중 터빈정지 등의 부하감발시에도 원자로출력 급감발계통(RPCS)과 조화를 이루어 원자로 정지없이 1차계통과 2차계통의 에너지 평형상태를 유지하는 역할을 수행한다.

원자로 제어계통(RRS)은 10% 스텝(Step)변화 및 5%/min 램프(Ramp) 변화까지는 원자로 출력과 냉각재 평균온도(Tavg)를 설정치 이내로 유지시킬 수 있도록 되어 있다. 그러나 더 큰 부하감발을 감당하고 원자로 출력을 가능한 한 높게 유지시키기 위해서는 인위적인 증기부하 감발이 필요하다. 증기덤프제어계통은 16개의 덤프밸브로 구성되어 있으며, 그 중 9개는 복수기 덤프밸브이고 7개는 대기 덤프밸브이다. 이 밸브들의 운전방법은 조절모드(Modulation Mode)와 급속 열림모드(Quick Open Mode)로 구분된다.

증기덤프제어계통은 제어봉자동인출 금지신호와 제어봉 자동동작 금지신호를 발



생시킨다. 제어봉 자동인출 금지신호는 증기의 터빈 우회시 마다 발생되는데 그 이유는 증기우회시 제어봉 자동인출이 오히려 발전소 제어에 방해가 되기 때문에 이를 금지시키는 것이다. 제어봉 자동이동 금지신호는 터빈정지 등의 부하감발시에도 원자로 출력을 일정수준으로 유지하는 역할을 수행하는데 그 이유는 일시적인 고장으로 인한 부하 감발시 빠른 출력복구가 가능하도록 하기 위한 것이다. 전부하(100%) 감발시 원자로 정지없이 발전소를 안정시키기 위해서는 아주 대용량의 터빈우회계통과 복수기가 필요한데 이러한 용량요구를 최소화시키기 위해서 원자로 출력감발계통과 원자로 제어계통이 같이 이용된다. 그 결과 증기우회제어계통의 증기우회용량은 복수기 배기 36%, 대기덤프 28%로 총 64% 증기우회 용량을 감당하고나머지 잉여출력은 원자로 급출력감발 계통과 원자로 제어계통에서 원자로 출력을 조절하여 1,2차 계통간 에너지 평형을 유지한다. 증기덤프제어계통은 여러 가지 발전소 인자 및 운전조건에 따라서 터빈덤프밸브를 조절하게 된다. 발전소 가열 및 냉각 운전시 운전원이 수동으로 증기 우회 유량 및 증기압력을 조절하여 냉각재 평균 온도(Tavg)를 적절히 낮춘다.

제 3 절 터빈정지에 의한 원자로정지 연동(P-8 Permissive Signal) 회로 변경

WH형 원전에서 원자로출력 30%이상에서 터빈-발전기 정지가 발생되면 원자로 자동정지신호(터빈정지에 의한 원자로 정지연동신호, P-8)가 발생된다. 따라서 원자로 출력급감발계통의 적용을 위해서 해당 신호의 수정이 필요하다.

원자로출력급감계통 운전 가능 시 터빈정지에 의한 원자로 정지 신호를 발생시키지 않고, 계통 운전 불가능 시에만 터빈정지에 의한 원자로 정지신호가 발생되도록 변경한다.





제 4 장 한빛 1발전소 RPCS 적용

제 1 절 최적성능 해석코드(SLEP)

시뮬레이션은 Advanced Continuous Simulation Language(ACSL)에 기반한 성능해석코드(SLEP)를 이용하여 발전소 시뮬레이션 모델을 개발하고 각 과도현상을 모사하기 위한 자료를 입력 후 분석하였다. 증기발생기 수위제어 평가용 SLEP 코드모델은 발전소 운전 실측자료를 이용하여 검증함으로써 그 유효성을 확인하였다.

제 2 절 한빛 1발전소 RPCS 적용 시뮬레이션 결과

그림 8~15는 한빛 1발전소 모델에 출력급감발계통(RPCS)을 적용한 경우와 적용하지 않았을 경우 전부하 상실에 따른 원자로 출력, 원자로냉각재 평균온도, 가압기압력, 증기발생기 압력, 제어봉 위치, 증기우회밸브 위치, OPDT 마진 및 OTDT 마진 변화를 나타낸다.

RPCS 미적용 모델의 경우 시뮬레이션 결과, 2차 계통의 갑작스런 전부하 상실시증기덤프계통(최대 64% 용량)이 동작되어 생성된 증기를 우회 시키지만(그림-13. 전부하 상실시 증기우회밸브 위치) 원자로 출력 제어 계통은 최고 10% Step변화및 5%/min Ramp 변화 밖에 수용할 수 없어, 터빈출력 보다 원자로출력이 높은 상태를 유지하게 되어 원자로냉각재 온도는 588°F 에서 596°F까지 계속해서 증가되었다.(그림-8. 전부하 상실시 원자로 출력) 이에 따라 가압기 압력은 상승되고 가압기 PORV가 개방되어 압력은 PORV 개방 설정치인 약2350 psia에서 유지되었다(그림-10. 전부하 상실시 가압기 압력). 결국 출력 불균형에 따라 전부하 상실 후 약 21초에 OTDT로 인한 원자로 정지가 발생되었고(그림-15. 전부하 상실시 OTDT마진) 이후 모든 변수들은 발전소 무부하 운전 값으로 안정되었다.

반면에 RPCS 적용 모델의 경우, 전부하 상실시 RPCS 동작으로 제어봉 일부가 노심으로 삽입되어(그림-12. 전부하 상실시 제어봉 위치) 원자로 출력을 신속히 40%까지 감발되었다(그림-8. 전부하 상실시 원자로 출력). 원자로냉각재 온도는 초기온도인 588°F 에서 서서히 감소되었고(그림-9. 전부하 상실시 원자로냉각재 평균온도), 가압기 압력 또한 약 2300 psia까지 증가 후 감소방향으로 안정화되었다(그림-10. 전부하 상실시 가압기 압력). 이후 발전소는 원자로-터빈 출력 40%에서 안정화되었다.



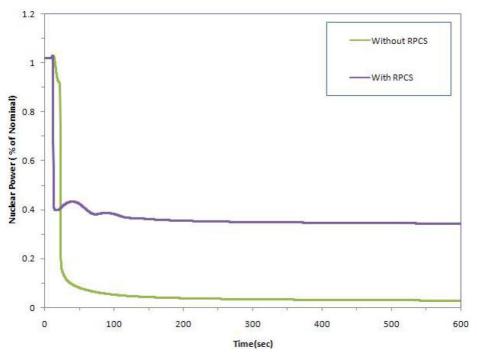


그림-8. 전부하 상실시 원자로 출력

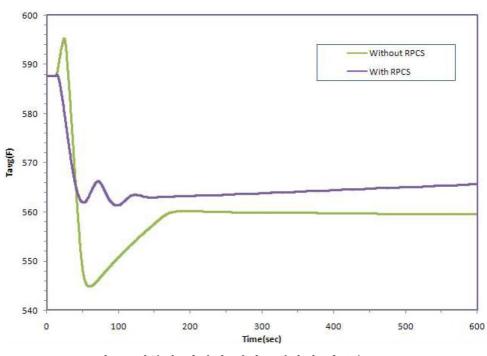


그림-9. 전부하 상실시 원자로냉각재 평균온도

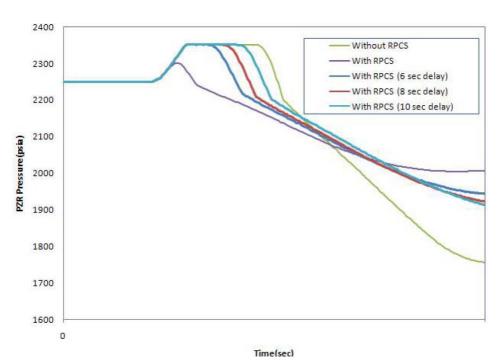


그림-10. 전부하 상실시 가압기 압력

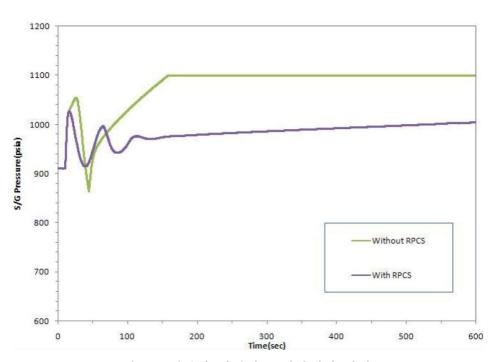


그림-11. 전부하 상실시 증기발생기 압력



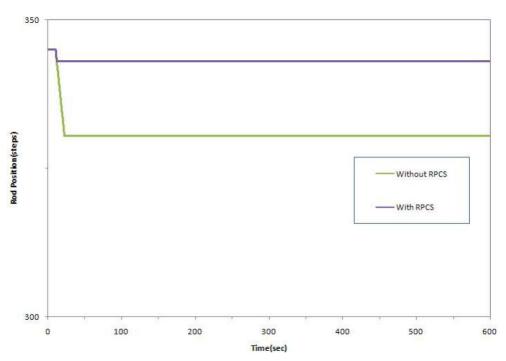


그림-12. 전부하 상실시 제어봉 위치

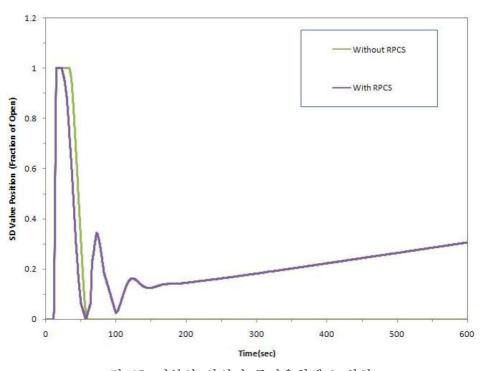


그림-13. 전부하 상실시 증기우회밸브 위치



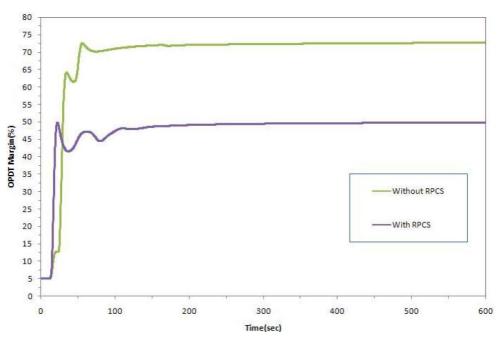


그림-14. 전부하 상실시 OPDT 마진

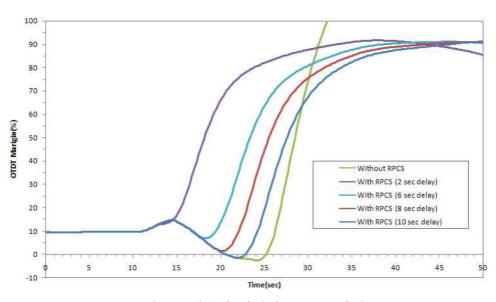


그림-15. 전부하 상실시 OTDT 마진





그림 8~15에서 보여주는 바와 같이 한빛 1발전소에 RPCS를 적용할 경우 전부하상실 시에도 원자로 정지가 되지 않았다. 미적용시 에는 OTDT에 의한 원자로 정지가 발생하였다. 따라서 한빛 1발전소에 원자로 출력급감발계통(RPCS) 적용함으로써 전부하 상실시 원자로 정지를 방지할 수 있음을 알 수 있다.

추가적으로 가압기 PORV 동작을 방지하기 위해서는 RPCS는 전부하 상실 후 3초이내에 동작해야 하고(그림-10. 전부하 상실시 가압기 압력), OTDT에 의한 원자로 정지를 방지하기 위해서는 RPCS가 8초 이내에 작동해야 원자로 정지를 방지할 수 있었다.(그림-15. 전부하 상실시 OTDT 마진)





제 5 장 결론 및 제언

본 연구에서는 WH1000형 원전의 주요 정지 원인인 2차 계통 부하 상실에 의한 원자로 정지를 방지하기 위해 OPR1000형 원전의 원자로 출력급감발계통(RPCS)을 시뮤레이션을 통해 WH1000형 원전에 적용하고 그 결과를 검토하였다. 대형 부하 상실시 원자로 Target Power를 45%로 하고 낙하 제어봉은 필요 반응도에 따라 Bank C 또는 D를 선정하였다. 추가적으로 효과적인 RPCS 동작을 위해 증기덤프계통에 제어봉 자동인출 금지신호를 추가하여 부하 감발시 빠른 1, 2차 계통간 에너지 평형에 도달하도록 하였다. 또한 RPCS 동작 중에는 터빈-발전기 정지에 의한 원자로 정지 신호를 제거하는 로직을 추가하여 불필요한 원자로 정지를 방지하였다.

ACSL 기반의 SLEP를 이용하여 한빛 1발전소 RPCS 적용 모델에서 전부하 상실 사건을 모사한 결과 원자로 정지를 방지할 수 있음을 확인하였다. 다만 사건 발생 시가압기 PORV 동작을 방지하기 위해서는 3초 이내에 동작하야 하고, OTDT에 의한 원자로 정지 방지를 위해서 RPCS는 전부하 상실 후 8초 이내에 동작해야 함을 알 수 있었다.

본 연구의 목적은 WH1000형 원전의 불시정지를 획기적으로 감소시키기 목적으로 정지 원인의 절반 이상을 차지하고 있는 2차에 계통 과도현상 발생시 원자로가 정지되지 않도록 하기 위해서는 기존 증기덤프 용량과 동작 신속성을 증가시켜야 하는데 증기덤프 용량을 증가시키기 위해서는 대규모 기계 설비 등의 공사가 필수적으로 수반되어야 하므로 실현 가능성이 낮아, "기존 설비의 제어회로 변경 등 즉 계측제어 분야의설계변경을 통해 현장에 적용할 수 없을까?" 하는 개념적 관점에서 접근하였다. 이 또한 실제 현장 적용을 위해서는 제어봉 제어계통, 증기덤프제어 계통, 터빈제어 계통 및노심 설계시 반영 등 보다 세밀한 연구가 필요하다.

본 연구를 통해 WH1000형 원전에 RPCS를 도입함으로써 대형 부하 상실 시에도 터빈정지에 의한 원자로 정지를 방지할 수 있음을 증명하였다. 이는 시대적으로 원전의 추가 건설이 쉽지 않은 현실에서 기존 웨스팅하우스 형 원전의 불시정지 빈도를 획기 적으로 감소시켜 원전 이용률 제고에 긍정적인 영향과 원전에 대한 사회적 수용성을





제고시킬 수 있고, 국내에서 성능이 입증 될 경우 해외 원전으로의 기술 수출도 가능하리라 생각된다.





참 고 문 헌

- [1] 고리3,4호기 및 한빛1,2호기 P-7 연동회로 타당성 연구('92.1.31 KINS)
- [2] 나만균, 이기복, 김경석 "원자로보호·감시 및 제어", 2014
- [3] 한국원자력안전기술원, 원전 사고·고장 조사보고서(2005-10호) "영광6호기 증기발생기 고수위로 의한 원자로 정지", 2005
- [4] 한빛5,6호기 계통설명서, 2006
- [5] "계통-3541, 주급수제어계통", 한빛원자력 3발전소 운영절차서
- [6] Design Specification for Feedwater Control System for Yonggwang Nuclear Power Plant Units 5 & 6, KOPEC, 2002
- [7] Gurdip Singh, "Automatic Steam Generator Feedwater Control Over Full Power Range.", 1988
- [8] L.W. et al., "How Digital Low Power Feedwater Control Can Minimize Plant Trips." Nuc. Eng. Intl(June, 1988)
- [9] L. E. Engelhardt and G. E. Campbel, "Setpoints Study Korea Electric Company Units 5&6," WCAP-10348, July 1983.
- [10] WH형 원전 전부하탈락시 소내부하운전 성공율 향상 방안, CRI, 2012
- [11] Y,J. Lee, U.C. Lee, "Steam Generator Water Level Control by the Control Scheme of Predictor." Procd. of the 6th KAIF/KNS Annual Conf.
- [12] "Kori Unit 3&4 and Yonggwang Units 1&2: Approval of Category I PCWG Parameters to Support a 4.5% Uprate Feasibility Syudy", PCWG-03-58, Westinghouse Electric Corp., 2003.



감사의 글

이 모든 것은 훌륭한 교수님들의 애정 어린 지도와 같이 공부했던 회사 선후배님들의 아낌없는 조언과 헌신적인 도움이 없었더라면 불가능했을 거라는 생각이 듭니다. 퇴근 후 교육훈련센터 강의실 불을 환하게 켠 채 서로 격려하며 같이 공부하던 시간들은이게 저에게는 잊지 못할 추억으로 남을 것입니다.

직장 업무와 학업을 병행하는 일이 결코 쉽지는 않았지만 뒤돌아보니 제 인생에 있어서 전환점이 되었다는 사실을 점점 깨닫게 되는 것 같습니다.

먼저 본 논문을 지도해 주시고 뜨거운 열정과 자상함으로 저를 이끌어주신 송종순 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀 올립니다. 그리고 논문 심사과정과 학과 수업시간에 변함없는 애정과 관심으로 격려해주신 정운관 교수님, 나만균 교수님, 이경진교수님, 김진원 교수님, 김종현 교수님, 또한 무엇보다 밤낮으로 학과 업무로 바쁘심에도 불구하고 항상 관심을 가져주신 학과장 송종순 교수님께도 다시 한번 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다.

2018년 5월 이 병호

