



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 이용허락조건을 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](#)

2016년 2월
석사학위 논문

순환수계통 저유량을 동반한 증기
발생기 세관 누설시 운전전략 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 호 진

순환수계통 저유량을 동반한 증기 발생기 세관 누설시 운전전략 연구

The study of the operating strategy in circulating water
low flow accompanied by SG U-tube leak

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 효 진

순환수계통 저유량을 동반한 증기 발생기 세관 누설시 운전전략 연구

지도교수 : 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 호 진

김효진의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정 운 관 (인)

위 원 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

2015년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	v
제 1 장 서 론	1
제 2 장 복수기 진공	2
제 1 절 복수기 구조	2
1. 개 요	2
2. 설계기준	2
3. 복수기 진공관련계통	3
제 2 절 증기우회제어계통	7
1. 개 요	7
2. 비정상 운전	10
3. 연동신호	11
제 3 절 원자로출력 급감발계통	12
1. 개 요	12
2. 계통 운전	14
제 3 장 증기발생기 세관누설시 문제점 고찰	17
제 1 절 증기발생기 누설감시	17
1. 정상운전	17
2. 세관 누설률에 따른 비정상 운전	18
3. 원자로 정지 후 비상 운전	19
제 2 절 순환수 저유량 및 증기발생기 세관누설시 문제점	20
1. 터빈 정지에 의한 원자로 정지	20

2. 원자로 정지 이후 복수기 증기덤프 불가능	20
3. 방사능물질에 의한 환경오염	20
제 4 장 복수기 연동신호 개선방안	22
제 1 절 해수온도와 진공도	22
1. 취수구 연중 해수온도	22
2. 해수온도 변화에 따른 진공도	22
제 2 절 복수기 진공도 주요 영향인자	24
1. 발전소 출력과 진공도	24
2. 순환수펌프 운전대수와 진공도	24
3. 순환수펌프 한 계열 정지시 복수기 진공도	25
제 3 절 시뮬레이터를 이용한 실증시험	26
1. 시험조건(BOL, RPCS BANK1 SELECT)	26
2. 시험결과-1(현 설계조건)	27
3. 시험결과-2(복수기 증기덤프 허용 후)	29
4. 복수기 증기덤프 허용가능한 해수온도(조건:RPCS 수동동작)	30
제 4 절 운전전략 및 복수기 연동신호 개선	32
1. 운전전략	32
2. 1차측 에너지 크기를 고려한 연동신호 입력	33
3. 해수온도를 고려한 증기덤프 허용신호 재설계	33
4. 복수기 증기덤프 연동신호 재설계의 장·단점	34
제 5 장 결 론	35
참고문헌	36

표 목 차

표 2-1. 복수기 성능곡선	2
표 4-1. 해수온도에 따른 RPCS 최적운전(현 설계조건)	26
표 4-2. 복수기 증기덤프 허용시 복수기 진공도 변화	31
표 4-3. 복수기 증기덤프 허용시 출력별 대기덤프밸브 개방	32
표 4-4. 복수기 증기덤프 연동신호 설계 전·후 비교	34

그림 목 차

그림 2-1. 복수기 구조	2
그림 2-2. N-1E 13.8kV 전원 구성도	5
그림 2-3. 복수기 증기덤프 신호	6
그림 2-4. 해수온도별 순환수펌프 운전	6
그림 2-5. SBCS 블록선도	9
그림 2-6. Quick Open 및 Q.O Block Signal	11
그림 2-7. RPCS 블록선도	12
그림 2-8. 터빈 런백 논리도	14
그림 3-1. 세관누설률 크기에 따른 운전조치	19
그림 3-2. 비상운전 기본전략	19
그림 4-1. 최근5년간 서해안 해수온도	22
그림 4-2. 해수온도 변화에 따른 복수기 압력	23
그림 4-3. 출력에 따른 복수기 압력	24
그림 4-4. 순환수펌프 운전대수별 해수온도와 복수기 압력	24
그림 4-5. 순환수펌프 3대 운전시 복수기 압력	25
그림 4-6. 시뮬레이션 초기조건	26
그림 4-7. 해수온도 32℃에서 발전소 거동(현 설계 기준)	27
그림 4-8. 해수온도 24℃에서 발전소 거동(현 설계 기준)	28
그림 4-9. 해수 32℃, CWP 6 → 3 대 운전시(복수기 증기덤프 허용)	29
그림 4-10. 해수 24℃, CWP 5 → 3 대 운전시(복수기 증기덤프 허용)	23
그림 4-11. 해수온도 17℃, CWP 4 → 3 대 운전시(복수기 증기덤프 허용)	23
그림 4-12. 해수온도 변화에 따른 복수기 압력	23
그림 4-13. 해수온도 17℃, CWP 4 → 3 대 운전시(복수기 증기덤프 허용)	23
그림 4-14. 원자로 정지 후 방출되는 붕괴열	33
그림 4-15. 개선된 복수기 증기덤프 연동신호	33

ABSTRACT

The study of Operating Strategy in Circulating Water low flow accompanied by SG U-tube leak

Kim, Hyo Jin

Adviser : Prof. Lee, Goung Jin, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Korea Standard Nuclear power plant experienced steam generator tube leak twice at the condition of hot stand by and pull power operation since commercial operation. Due to marine life massive inflow to the intake, circulation pump power loss and circulation pump failure, plant operation conditions are becoming more vulnerable. Even though the seawater temperature is sufficiently low to maintain condenser vacuum, if the circulating pumps(3 out of 6) stopped, it is not possible to dump steam to the condenser in the current design. Circulating water system is designed based on the temperature of the sea water(20.5 °C) but the temperature of the sea water is decreased to 5°C in winter. If steam generator tube leak is accompanied when these situations occur, radioactive materials are likely to be released into the atmospheric environment. During full power operation, if the 3 circulation pumps stopped, discharge valves of the operating circulation pumps are closed to the middle position to protect circulating pumps and circulation flow rate is reduced by 30% per unit. Therefore, the condenser pressure could be increased. If the condenser pressure exceeds 127mmHga or the number of circulation pumps in operation is less than 4, steam bypass control valve(1001 ~ 1006) can not be opened in the current design. If the turbine trip under these conditions, reactor can not but be tripped. But If the primary energy is reduced as soon as possible, the reactor trip can be prevented. In the current design criteria, if RPCS is operated

manually by operator in less than sea temperature 24°C , reactor is verified to not be stopped and the condenser pressure was also confirmed stable. If allowed the steam dump to condenser in less than sea temperature 24°C , reactor also did not trip and the main parameters were stable when it is assumed that the RPCS is manually operated. But Although reactor power is low, When the turbine is tripped SBCS valves (1001~1008) are very likely to be quickly opened. If steam generator tube leakage is in progress the reactor power should be reduced rapidly in order to prevent the SBCS atmosphere valve (1007,1008) from opening. If Steam generator tube leaks, while reducing the reactor power rapidly, the turbine must be careful not trip. When the reactor trip at least 60% power, SBCS condenser valves (1001-1004) are open and SBCS atmosphere valves(1007, 1008) maintain closed. Immediately after the reactor trip, decay heat is 6% of the full-power reference and should decrease exponentially. The degree of the decay heat does not so exceed the design capacity of condenser dump that the reactor power level should be reflected in the condenser interlocking signal. As a result, condenser interlocking signal was redesigned in consideration of the primary thermal energy level and the intake sea temperature. Through this study, maximum limit temperature of sea water was derived to dump steam to condenser when the number of circulation pumps in operation is 3. Potential release of radioactive materials was reduced by redesigning the condenser steam dump interlock logic using maximum limit temperature of sea water. This study will improve the performance of the operators and the safety of the plant.

제 1 장 서 론

원자력 발전의 최종목표는 환경으로의 방사능물질 유출을 최소화하면서 안정적으로 전력을 생산하는 것이다. 최근 발전소 취수구로의 해양생물 대량유입, 순환수펌프 전원상실 및 순환수펌프 밀봉수계통 고장으로 인한 펌프 정지 등 발전소 운전을 위한 환경은 점점 취약해지고 있다.

전 출력운전 중 순환수펌프 6대 중 3대가 정지된다면 복수기로의 증기덤프는 불가능하므로 복수기 고진공에 의해 터빈발전기가 정지되고 원자로는 가압기 고압력으로 정지된다. 즉 원자로 정지 전·후 원자로에서 생산되는 열에너지는 복수기와 순환수계통 아닌 대기로의 증기덤프를 통해 환경으로 방출될 수 밖에 없다. 복수기로의 증기덤프가 가능하려면 복수기 과압보호를 위해 복수기 진공이 127mmHga 이하이어야 하고 순환수펌프가 4대 이상 운전되어야 한다. 복수기로의 증기덤프가 불가능한 상황에서 증기발생기 세관이 누설된다면 환경으로의 방사능물질 방출 가능성이 증가한다. 즉 순환수펌프 3대 이하 운전 조건에서는 다음과 같은 문제점을 가지고 있다.

첫째, 해수온도가 낮아 복수기 압력이 충분히 낮게 유지되더라도 복수기로의 증기덤프가 불가능하다.

둘째, 원자로가 정지되거나 원자로출력 준위가 낮은 상태에서도 복수기로의 증기덤프 운전이 불가능하기 때문에 증기발생기 세관 누설이 동반된다면 대기환경으로 방사능물질 방출 가능성이 증가한다.

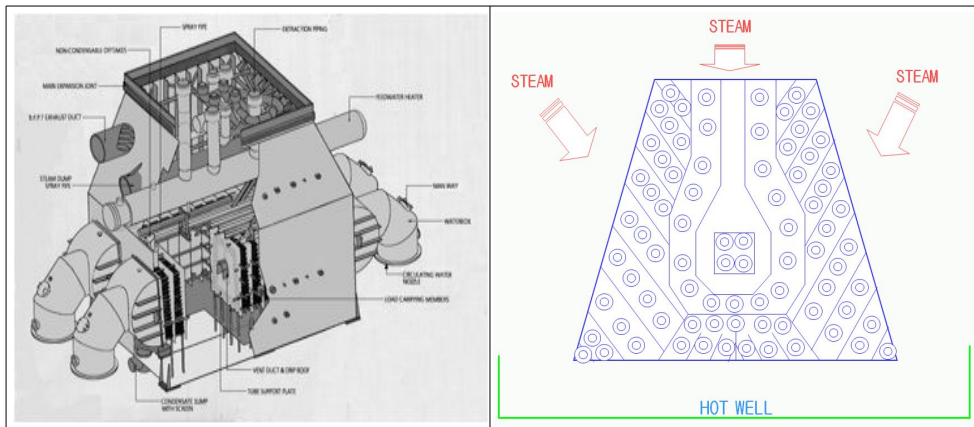
순환수계통(Circulating Water System)은 100% 출력운전, 해수온도 20.5℃를 기준으로 복수기 38.1mmHga 로 설계되었다. 하지만 해수온도가 충분히 낮아 순환수펌프 3대의 유량만으로도 복수기 진공도가 충분히 유지됨에도 불구하고 복수기로의 증기덤프를 불가능하도록 한 현재의 제한적 설계는 비정상 운전(증기발생기 세관누설) 절차 수행시 어려움을 초래할 수 있다. 이에 계절적으로 변화하는 해수온도를 반영하고 원자로 정지 직후 낮게 생성되는 붕괴열을 고려한 복수기 증기덤프 연동신호 재설계를 통해 환경으로의 방사능 물질 방출 가능성을 줄이고자 본 연구를 시작하게 되었다.

2 장 복수기 진공

제 1 절 복수기 구조

1. 개 요

복수기는 터빈(TURBINE)에서 배출되는 배기증기를 순환수계통으로 냉각하여 응축시키는 장치이다. 튜브 내부로 순환수가 흐르게 되면 튜브 외벽에서 증기와 대류(convection)나 전도(Conduction)에 의해 열교환이 이루어진다.



[그림 2-1] 복수기 구조

2. 설계기준

가. 복수기

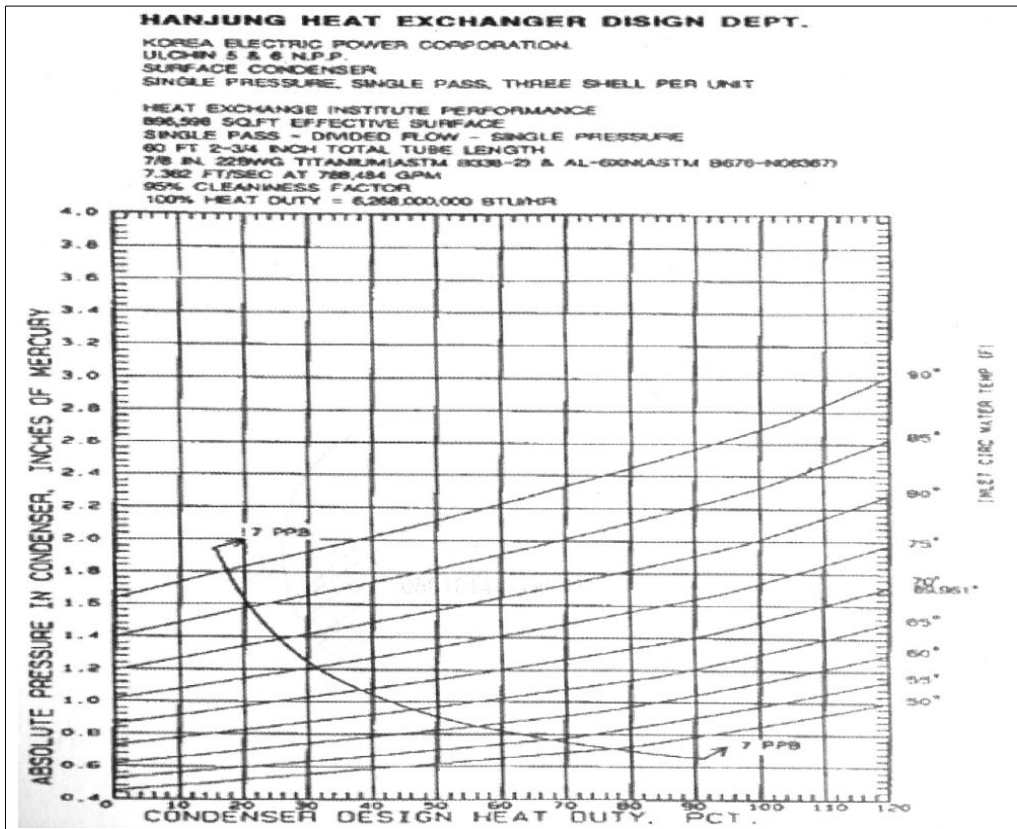
복수기는 증기사이클의 열제거원으로서 정상운전 중에 복수기는 저압터빈 배출 증기, 터빈구동 급수펌프의 배출증기, 증기발생기 취출수 및 터빈우회증기를 받아들이며 응축시작 복수기는 기타 증기순환류, 배수 및 배기의 집합점이다.

- (1) 형식 : 단일압력, 3 shell(2개의 수평식 관다발/shell, 2개 온수조/shell)
- (2) 용량 : $6,239 \times 10^6$ BTU/hr
- (3) 순환수 유량 : 788,484 gpm
- (4) 순환수 온도상승 : 9 °C (순환수 입구온도 20.5 °C 기준)
- (5) 복수기 압력 : 38.1 mmHgA(1.5 inHgA)

- (6) 응축 표면적 : 1,100,00 ft²
- (7) Tube 수 : 13,339 ea/Box × 6개 = 80,034 개(튜브 설계압력 : 50 psig)
- (8) 재질 : 튜브-티타늄(ASTM B338 Gr2), Shell-탄소강
- (9) 튜브 외경 : 22.225 mm(두께: 0.711 mm)
- (10) 복수기 : 탄소강(설계압 : 15 psig)

나. 복수기 성능곡선

[표 2-1] 복수기 성능곡선



3. 복수기 진공관련 계통

복수기 진공펌프와 공기추출기 운전을 통해 복수기내 불응축성 가스를 배출하며 출력운전 중 복수기 진공에 절대적으로 영향을 주는 요소는 순환수 유량과 해수온도이다. 복수기 압력은 연중 18 ~ 72mmHga 범위내에서 유지되며 주로 해수온도, 순환수 유량, SJAE(Steam Jet Air Ejector) 성능, 진공펌프 운전대수 및 복수기 튜브

의 오염도 등에 의해 좌우된다.

가. 복수기 진공계통

복수기 진공계통은 발전소 기동 중 복수기에 진공을 형성하며 정상운전 중 복수기로 공기와 비응축성 가스를 연속적으로 제거한다. 또한 고온대기에서 정지냉각계통 초기조건까지 발전소를 냉각한다.

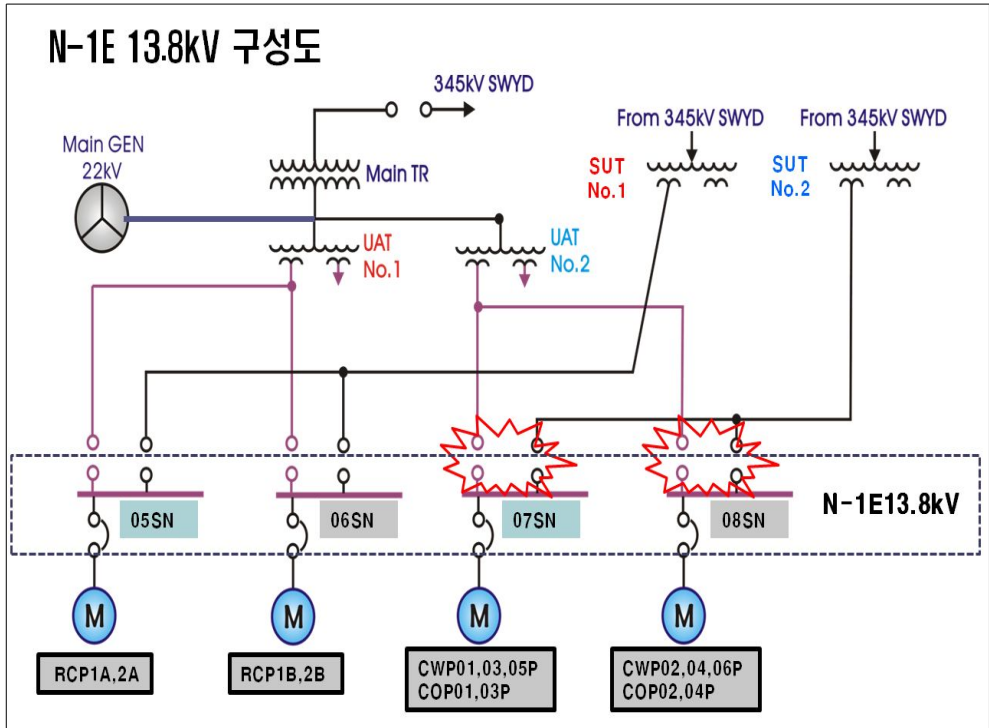
- (1) 진공펌프(Vacuum Pump)
 - (가) 복수기 진공펌프
 - (나) 진공펌프 밀봉수냉각기
 - (다) 진공펌프 재순환펌프
- (2) 공기추출기계통(Steam Jet Air Ejector)

나. 순환수 계통

3개의 복수기로부터 폐열을 제거하고, 복수기 압력을 일정압력 이하로 유지하기 위해 냉각수인 해수를 공급하며 흡수된 열을 바다로 배출한다.

- (1) 계통구성
 - (가) 순환수펌프
 - (나) 복수기 수실 공기제거 계통
 - (다) 복수기 튜브 세정계통
 - (라) 순환수펌프 윤활수 계통
- (2) 설계기준
 - (가) 발전소 모든 부하조건에서 복수기의 폐열을 제거할 수 있도록 충분한 유량을 공급한다.
 - (나) 복수기 배압을 설계제한치 이내로 유지할 수 있도록 적정량의 해수를 복수기에 공급한다.
 - (다) 복수기 배수로로 많은 양의 해수가 유입되면 터빈건물 범람을 막기위해 순환수 계통을 수동으로 차단한다.
 - (라) 해수 수위변화를 고려하여 안전하고 신뢰도 있게 작동하도록 설계한다.
- (3) 순환수펌프 공급전원

순환수펌프 전원은 N-1E 13.8kV 으로 분류되며 출력운전 중 순환수펌프와 복수펌프의 전원은 소내전원(UAT)으로 부터 공급받고 터빈발전기 정지 이후에는 소외전원(SUT)으로 자동전환된다.



[그림 2-2] N-1E 13.8 kV 전원 구성도

(4) 운전

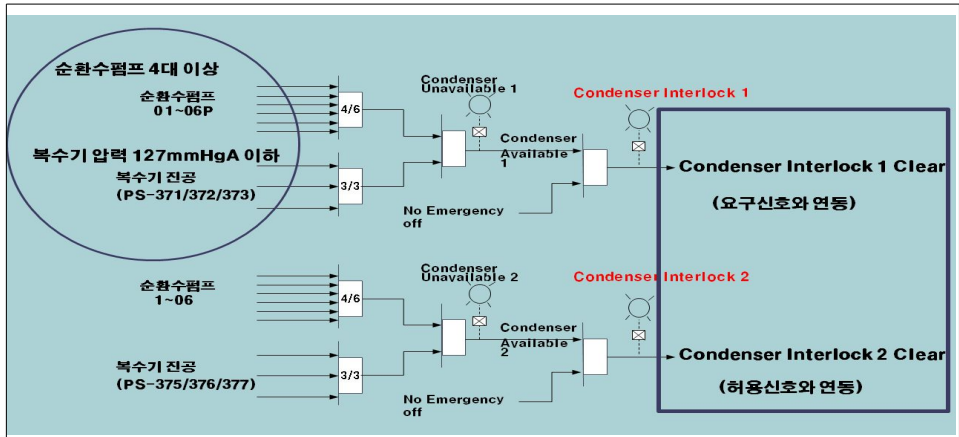
N-1E 13.8kV 한 계열이 상실되면 순환수펌프 6대 중 3대, 복수펌프 4대 중 2대가 운전 불가능하다. 탈기기 수위감소에 따라 출력은 70% 이하로 감발되어야 하고 진공도를 감시해야 한다.

(가) 복수기 연동신호

복수기 압력이 127mmHga 이하, 순환수펌프가 4대 이상 운전되어야 복수기덤프가 가능하도록 요구신호와 허용신호가 생성된다.

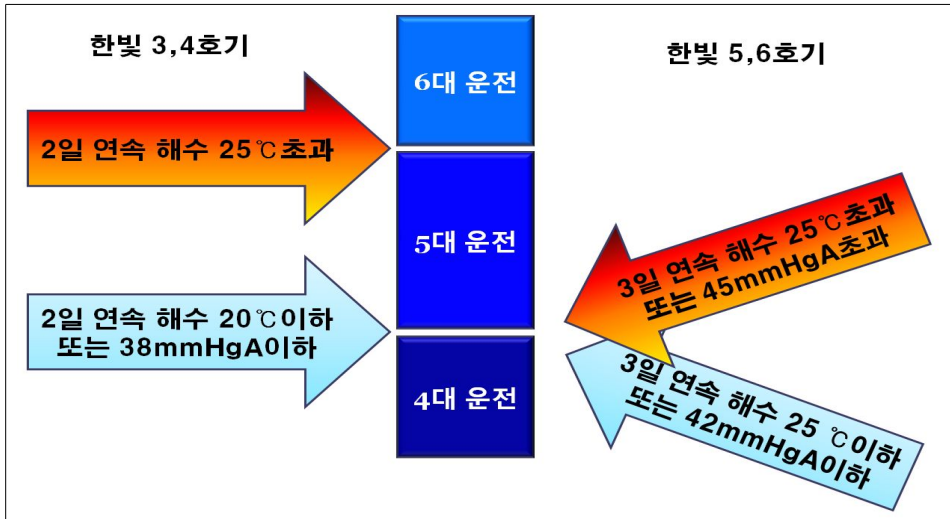
(나) 순환수펌프 출구밸브 연동신호

순환수펌프 3대 미만으로 운전되면 펌프의 출구밸브는 Mid Position (45%) 위치까지 닫힌다.



[그림 2-3] 복수기 증기덤프 신호

- (다) 일일 최저 해수온도가 2일 연속 25℃ 이하가 되면 운전 중인 순환수펌프 1대를 정지한다. (한빛3,4호기 기준)
- (라) 일일 최저 해수온도가 2일 연속 20℃ 이하 또는 복수기 압력이 38mm Hga 이하가 되면 운전중인 순환수펌프 1대를 추가로 정지하여 4대를 운전한다. 모션전원 상실을 대비하여 순환수 펌프는 홀수2대, 짝수 2대를 운전한다. (한빛3,4호기 기준)



[그림 2-4] 해수온도별 순환수펌프 운전

제 2 절 증기우회제어계통

증기우회제어계통(SBCS)은 핵증기공급계통(NSSS)의 하나로써 부하변동시 다른 제어계통과 같이 운전되어 터빈우회밸브를 통해 증기량을 조절함으로써 1차측의 에너지를 자동으로 제거한다. 또한 발전소 가열 및 냉각시 2차 계통 압력을 조절함으로써 1차 계통 온도를 유지할 수 있다.

1. 개 요

가. 계통기능

- (1) 원자로출력급감발계통(RPCS) 및 다른 제어계통과 같이 운전되어 터빈우회밸브를 통해 증기량을 조절함으로써 핵증기공급계통(NSSS)의 잉여 에너지를 자동으로 제거하게 된다.
- (2) 발전소 가열 및 냉각 운전시 냉각재평균온도(Tavg)를 수동으로 제어한다.
- (3) 터빈우회 요구조건이 있을 경우에는 언제나 제어봉이 자동적으로 인출되지 않도록 제어봉자동인출금지신호(AWP)를 제어봉구동장치제어계통으로 보낸다.
- (4) 원자로 출력이 15%이하 일 때는 언제나 제어봉자동동작금지신호(AMI)를 보낸다.
- (5) 터빈출력이 기 설정된 값 이하로 떨어질 때 제어봉자동동작금지신호(AMI)를 보내면 터빈증기우회제어계통은 잉여 원자로 출력을 감당한다.

나. 설계기준

- (1) 증기우회제어계통은 다른 제어계통과 적절히 연계되어 원자로에서 생성되는 잉여 출력을 감당하는데 그 방법은 터빈 우회 증기량을 조절하여 발전소 에너지 평형상태를 유지한다.
- (2) 증기우회제어계통의 입력신호는 증기유량, 가압기압력 및 증기압력을 이용한다. 이 계통의 출력신호는 터빈 우회 증기량을 조절하며 터빈 우회 증기 최대용량(55%)을 초과하는 출력 감발시에는 원자로출력급감발계통(RPCS)을 작동시킨다.

- (3) 증기우회제어계통은 전 출력 운전 중 터빈 정지 등의 부하 감발에도 원자로 정지와 가압기 및 주증기관의 안전밸브의 작동없이 발전소 에너지 평형을 이루어야 한다.
- (4) 증기우회제어계통은 주급수 펌프 2대 중 1대 정지시에도 원자로 정지와 가압기 및 주증기관 안전밸브의 작동없이 발전소 에너지 평형을 이루어야 한다.
- (5) 증기우회제어계통은 발전소 기동, 정지시 수동으로 냉각재온도를 조절하는 기능을 수행한다.
- (6) 증기우회제어계통은 원자로 정지 후, 원자로 잔열을 제거하는 역할을 수행하며 가압기 및 주증기관 안전밸브의 작동 없이 원자로를 고온대기 상태로 냉각시킬 수 있다.
- (7) 증기우회제어계통은 자동으로 증기압력 및 냉각재 온도를 조절하여 발전소를 고온대기 상태로 안정시킬 수 있다.
- (8) 증기우회제어계통은 8개의 터빈우회밸브로 구성되며, 그 중 6개는 복수기덤프밸브이고, 2개는 대기덤프밸브로 가장 나중에 열리고 가장 먼저 닫힌다.
- (9) 증기우회제어계통은 원자로출력 15% 이하시 제어봉자동동작금지신호(AMI)를 발생시켜 원자로제어계통(RRS)의 제어에 따라 제어봉이 자동으로 인출, 삽입되는 것을 금지시킨다.
- (10) 증기우회제어계통은 제어봉 자동인출금지신호(AWP)를 발생시킨다.
- (11) 증기우회제어계통은 터빈기동, 계통병입 및 초기 연료장전시 원자로에서 발생하는 잉여 에너지를 제거하는 역할을 수행한다.

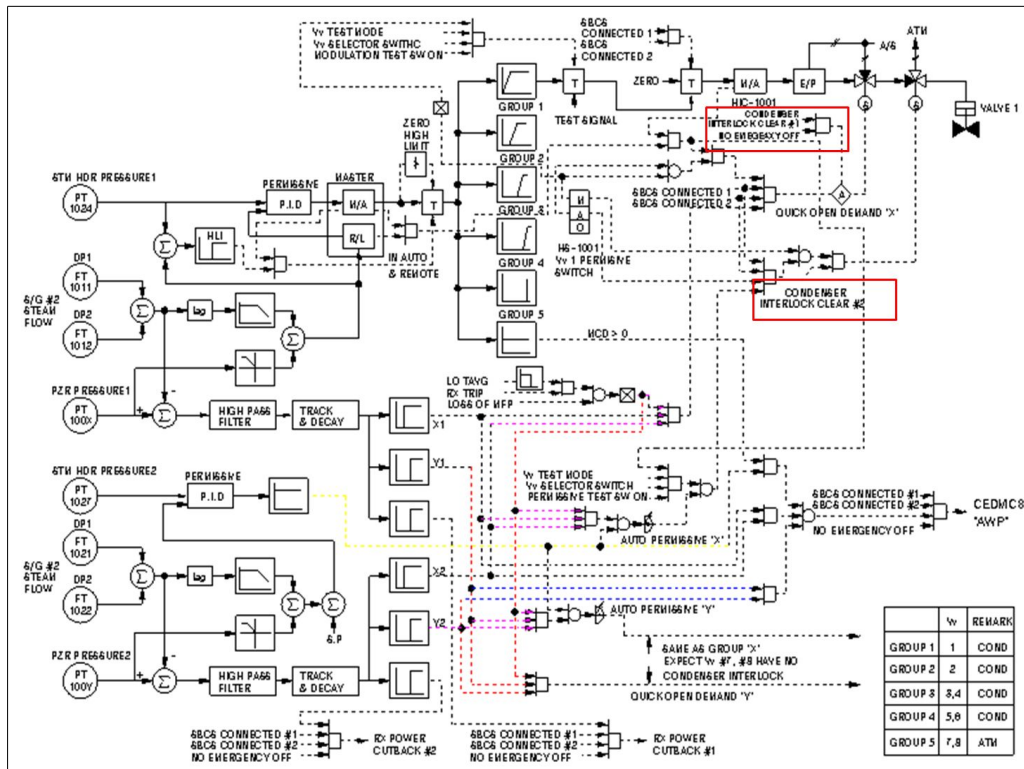
다. 계통운전

증기우회제어계통(SBCS)은 운전 중 터빈정지 등의 부하감발 시에도 원자로 출력급감발계통(RPCS)과 조화를 이루어 원자로 정지없이 1차계통과 2차계통의 에너지 평형상태를 유지하는 역할을 수행한다.

원자로제어계통(RRS)은 10% 스텝(Step)변화 및 5%/min 램프(Ramp) 변화까지는 원자로 출력과 냉각재평균온도(T_{AVG})를 설정치 이내로 유지시킬 수 있도록 되어있다. 그러나 더 큰 부하감발을 감당하고 원자로 출력을 가능한 한 높게 유지시키기 위해서는 인위적인 증기부하 감발이 필요하다. 증기우회제어계통은 8개의 덤프밸브로 구성되어 있으며, 그 중 6개는 복수기덤프밸브이고 2개는 대기덤프밸브이다. 이 밸브들의 운전방법은 조절모드(Modulation

Mode)와 급속 열림모드(Quick Open Mode)로 구분된다.

한편, 증기우회제어계통은 제어봉 자동인출금지신호(AWP)와 제어봉자동동작 금지신호(AMI)를 발생시킨다. 제어봉자동인출금지신호(AWP)는 증기의 터빈 우회시 마다 발생되는데 그 이유는 증기 우회시 제어봉 자동인출이 오히려 발전소 제어에 방해가 되기 때문에 이를 금지시키는 것이다. 제어봉자동동작 금지신호(AMI)는 터빈정지 등의 부하감발 시에도 원자로 출력을 일정수준으로 유지하는 역할을 수행하는데 그 이유는 일시적인 고장으로 인한 부하 감발시 빠른 출력복구가 가능하도록 하기 위한 것이다.



[그림 2-5] SBSCS 블록선도

전 부하(100%) 감발시 원자로 정지없이 발전소를 안정시키기 위해서는 아주 대용량의 터빈 우회계통과 복수기가 필요한데 이러한 용량요구를 최소화시키기 위해서 원자로출력급감발계통과 원자로제어계통이 같이 이용된다. 그 결과 증기우회제어계통의 증기우회용량은 복수기 배기 40%, 대기덤프 15%로 총 55% 증기우회 용량을 감당하고 나머지 잉여 출력은 원자로출력급감발계통과 원자로제어계통에서 원자로 출력을 조절하여 1,2차 계통간 에너지 평형

을 유지한다. 증기우회제어계통은 여러가지 발전소 인자 및 운전조건에 따라서 터빈우회밸브를 조절하게 된다. 발전소 가열 및 냉각 운전시 운전원이 수동으로 증기우회유량 및 증기압력을 조절하여 냉각재평균온도(T_{AVG})를 적절히 낮춘다.

2. 비정상 운전

가. 부하감발 및 터빈 런백(Run Back)

증기우회제어계통은 발전소 과도상태시에 가능한 출력을 높게 유지시키는 것으로 설계되었다. 첫번째 시나리오는 모든 터빈우회밸브가 대기상태이고, 자동동작금지(AMI) 문턱값이 95%, 자동동작금지 허용설정치가 85%인 조건에서 100% 출력상태에서 50% 부하 감발이 일어나는 것이다. 증기유량이 바로 감소되고 주증기 헤더압력, 1차 계통 온도, 압력이 증가할 것이다. 이런 현상에 따라 우회제어계통에서는 터빈 우회밸브의 급속열림(Quick Open) 요구신호가 발생되고 원자로제어계통(RRS)에서는 제어봉을 삽입하여 출력감발 신호를 내보낸다. 터빈출력이 85% 이하로 떨어지면서 자동동작금지 허용이 발생되고 원자로 출력이 95% 이하로 떨어지면서 자동동작금지 요구신호가 발생되어 제어봉이 움직이지 않게 된다. 즉, 발전소는 터빈우회밸브가 출력차이를 극복하면서 원자로는 95%, 터빈은 50% 출력을 유지하면서 안정된다. 두번째 시나리오는 모든 발전소계통이 자동인 상태에서 전 출력 운전 중 터빈이 트립되는 것이다. 이 상태에서 원자로 트립을 방지하면서 증기우회제어계통의 급속열림(Quick Open) 신호를 초과한 경우는 원자로출력급감발계통(RPCS)이 동작된다. 이때는 자동동작금지 문턱출력이 95%로 되어 있지만 터빈우회밸브 용량인 55%까지 출력이 감소되며 노심말기에는 더 감소될 수 있다.

나. 원자로 트립

원자로 트립, 터빈 트립시에는 터빈우회밸브를 열어서 발전소를 고온대기 상태로 유지시키는데 냉각재평균온도가 낮은 저출력 상태에서 원자로 트립이 일어나면 급속열림블록신호(Quick Open Block)가 발생하는데 이는 원자로 과냉이나 감압을 방지하기 위함이다.

다. 주급수펌프 트립

원자로 출력이 80% 이상에서 급수펌프 1대가 상실되면 자동적으로 원자로출력급감발계통(RPCS)이 동작된다. 즉 60%까지는 연속출력감발(Set back)이 동작되고 그 후 냉각재평균온도와 증기압력이 안정될 때까지 런백(Runback)이 작동되어 2차 부하가 감소된다.

3. 연동신호

복수기가 우회 증기유량을 받을 조건이 되지 않을 경우 터빈우회밸브를 열리지 못하게 하여 터빈과 복수기를 보호하는 데 있다. 증기우회제어계통의 복수기 연동은 [그림 2-5]에 나와 있다. 또한 주제어실과 유지보수 관널에 비상정지 스위치가 있어서 터빈우회밸브로 가는 모든 신호를 차단하는데 수동으로 운전원이 조작하게 되어 있다.

가. Condenser Interlock

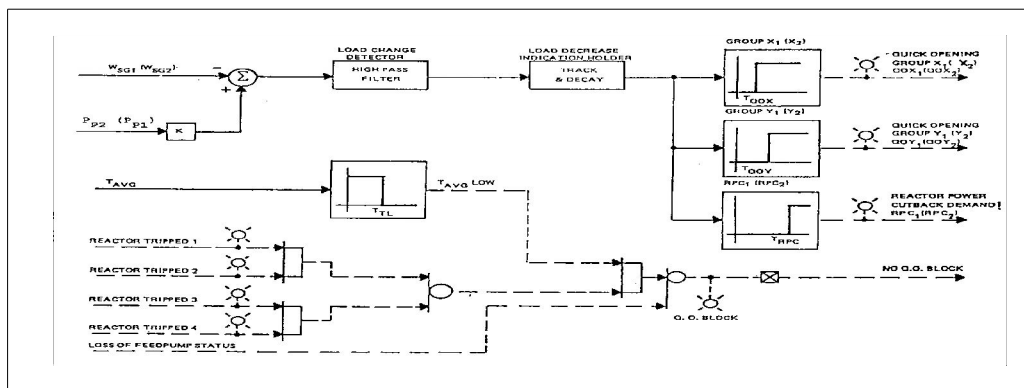
- (1) Condenser Interlock1 : Modulation & Quick Open Signal로 사용함
- (2) Condenser Interlock2 : Condenser Interlock 1 Redundant 로서 Permissive Logic에만 사용함

나. Quick Open

Quick Open 기능은 조절모드(Modulation Mode)에 비해 상대적으로 큰 과도상태일 때 조절요구를 차단(Override)하고 1초 이내에 밸브를 개방

다. Quick Open Block

- (1) 노심 과냉을 방지하기 위해 발생됨
- (2) 원자로가 정지되고 원자로냉각재온도가 설정치 이하에서 발생됨



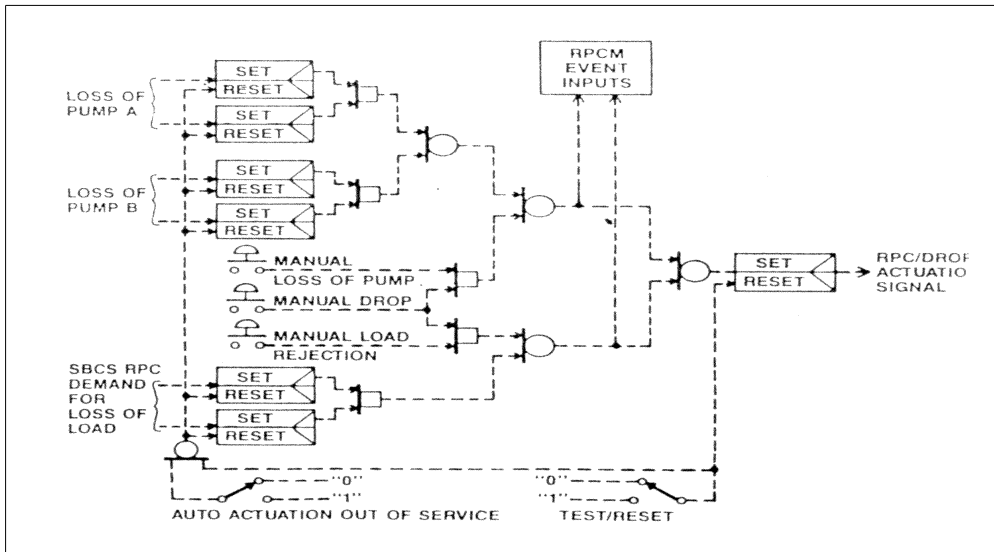
[그림 2-6] Quick Open 및 Q.O Block Signal

4절. 원자로출력 급감발계통

핵증기공급계통(NSSS)은 자동운전 모드에서 5%/min 비율 변화 및 10% 단계 변화를 수용할 수 있도록 설계되어 있다. 터빈 출력과 원자로 출력이 일치되지 못하면 원자로제어계통(RRS), 증기우회제어계통(SBCS), 주급수제어계통(FWCS)과 가압기수위 및 압력제어계통(PLCS&PPCS)이 상호조화를 이루어 극복해낸다. 본 계통은 핵증기공급계통의 하나로 주급수펌프 정지 또는 대형부하 변동시 원자로 정지를 방지하기 위해 설계되었다.

1. 개요

가. 계통기능



[그림 2-7] RPCS 블록선도

- (1) 주급수펌프 트립시에 주급수펌프 제어계통에서 발생하는 신호를 받아 자동적으로 동작되어 원자로 출력과 터빈 출력을 재빨리 감소시켜 증기발생기 저수위로 인한 원자로 정지를 방지시켜 준다.
- (2) 100% 출력 운전 중 터빈 트립과 큰 터빈부하 감발시에 증기우회제어계통에서 발생하는 신호를 받아 자동적으로 동작되어 원자로 출력을 재빨리 감소시켜 가압기 고압력에 의한 원자로 트립을 방지하고 1, 2 차 안전밸브 개방을 방지시켜 준다.

- (3) 원자로출력급감발계통이 자동적으로 동작되는 것을 운전원에게 알려주고, 운전원이 수동으로 동작시킬 수 있으며, 또한 출력 감발을 멈추게 할 수도 있다.

나. 입력신호

- (1) 주급수펌프 상실 신호(Loss of Feed Pump “A” 1&2)
2개의 다중 입력신호로서 각 펌프 당 2/2 논리가 만족될 경우 동작된다.
- (2) 대형 부하상실(SBCS RPC 1&2)
SBCS로부터 입력되는 2개의 다중 입력신호로서 2/2 논리가 만족될 경우 동작된다.
- (3) 터빈런백 요구신호(Turbine Runback Demand)
SBCS로부터 입력되는 단일(Single) 신호로서 RPCS 동작에 따른 1, 2차 측 출력균형을 목적으로 한다.
- (4) 제어봉 선택신호(Bank 1 or 2 Select)
소내 감시전산기(PMC)로부터 입력되는 제어봉 선택신호로서 운전원이 제어봉 부그룹을 수동으로 선택하더라도 자동선택 신호가 계속 발생된다. 이 신호가 상실되면 “Single Channel failure” 정보가 발생된다.
- (5) 12발 제어봉 터빈런백 허용신호(12 Finger TBN Runback SBCS)
SBCS에서 입력되는 신호로서 터빈출력(TLI) 87% 이상에서 발생한다.
- (6) 계통 상태 신호(System Status Signal)
계통상태 신호는 RPCCP에서 생성되어 RPCM으로 입력되며, 아래 항목들을 조합하여 운전원이 선택할 수 있다.
 - (가) 자동/수동 운전모드
 - (나) 자동/수동 뱅크선택
 - (다) 수동 암(Arm)과 낙하(Drop)

다. 출력신호

- (1) 낙하 신호(Drop Command)
낙하신호는 RPCS가 동작될 경우 제어봉 구동장치제어계통(CEDMCS)의 전원공급 장치로 전송되며 또한 암(Arm) 연동신호에 이용된다. 선택된 제어봉 부그룹이 낙하되려면 암(Arm)과 낙하(Drop) 2개의 신호가 동시에 제어봉 전원계통으로 입력되어야 한다. 제어봉 선택신호는 소내 감시전산기에 의해 자동 발생되고 원자로 열출력이 80% 이상시 RPCS 제어봉 선

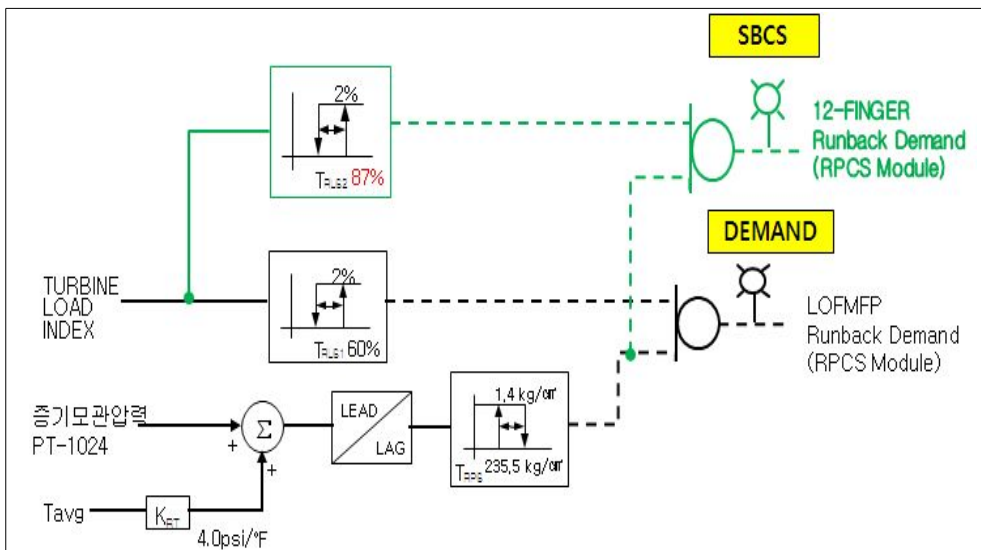
택 기억장치(CEA Selection Storage Memory)에 보내진다.

(2) 터빈셋백 신호(Turbine Setback Command)

이 신호는 RPCS가 동작되면 항상 발생하는 신호로서 터빈 부하를 60%까지 내리도록 터빈제어계통으로 전송된다.

(3) 터빈런백 신호(Turbine Runback Command)

이 신호는 RPCS가 동작될 때 셋백신호와 같이 발생되나 셋백 비율이 런백 비율보다 훨씬 크고 셋백이 60%까지 이루어지므로 런백효과는 분별하기 어렵다. 런백도 설정치에 따라 처음에는 셋백과 함께 60% 부하까지 진행되나, 만약 셋백에 의해 발전소 과도현상이 만족스럽게 제어되지 못할 경우에는 60% 이하에서도 SBCS 로부터 런백 요구신호가 발생되어 런백이 계속된다.



[그림 2-8] 터빈 런백 논리도

(4) 12발 제어봉 터빈런백 요구신호(12 Finger TBN Runback CPCS)

12발 단일 제어봉 낙하(오정렬)시 터빈런백 신호를 CPC에서 RPCM 에 보내고 12발 제어봉 터빈런백 허용신호와 요구신호가 동시에 있을 경우 터빈런백 신호와 터빈출력 상승금지신호를 발생시킨다.

2. 계통 운전

가. 정상 운전

출력운전시 원자로출력급감발계통의 정상운전 조건은 대기상태인데 제어봉 선택은 발전소 감시컴퓨터에 의해 자동으로 혹은 운전원에 의해 수동으로 선택할 수 있다.

(1) 자동운전

자동모드일 때는 수동으로 선택한 모든 자료들이 지워진다. 또한 발전소 컴퓨터에서 입력신호가 들어오지 않아 수동모드로 전환되면 운전원은 반드시 낙하될 제어봉을 선택해야 한다. 자동동작이 일어났을 경우 작동 원인, 해당 बैं크와 ARM, 낙하 표시등에 불이 들어오고 리셋 누름단추를 누르면 원자로출력급감발계통에서 제어봉구동장치제어계통과 터빈제어계통으로 가는 모든신호, 주제어실 경보등이 사라짐으로써 원자로출력 급감발계통이 리셋된다.

(2) 수동운전

원자로출력급감발계통이 수동모드일 때만 수동으로 선택된 자료들이 저장되는데 만약 이 수동모드에서 낙하될 제어봉이 결정되지 않은 상태에서 사건이 발생되면 터빈셋백만 발생하고 원자로출력 급감발은 일어나지 않아 증기우회제어밸브가 40% 출력 차이를 감당하면서 원자로 100%, 터빈 60%를 유지케 된다. 그러나 만약에 부하감발이 증기우회제어계통의 용량인 55%를 넘어서게 되면 가압기 고압력으로 원자로는 트립될 것이다. 암과 낙하 누름단추를 동시에 눌러서 수동동작을 일으키고 리셋 누름단추를 눌러서 원자로출력급감발계통에서 나오는 모든 신호를 리셋 시킨다.

나. 비정상 운전

(1) 원자로 출력이 60% 이하일 때

만약에 초기 원자로 출력이 60% 이하일 경우에는 증기우회제어계통이 55%까지 부하감발을 감당하기 때문에 원자로출력급감발계통이 동작하지 않는다.

(2) 원자로 출력이 60% 이상이고 80% 미만일 때

원자로 출력이 80% 미만일 때는 발전소 감시컴퓨터가 낙하될 제어봉을 선택하지 않기 때문에 제어봉은 그대로 있고 터빈만 60%까지 셋백이 일어난다. 이때는 증기우회제어계통이 55%를, 원자로제어계통(RRS)이 출력 10% 단계변화를, 가압기 등의 계통에서 나머지 10% 단계변화를 흡수하기

때문에 이 두 계통이 출력편차를 극복할 수 있다.

(3) 원자로 출력이 80% 이상일 때

원자로출력급감발계통이 동작하여 제어봉이 낙하됨으로서 정격출력의 20~75% 사이에서 원자로 출력이 안정되고 터빈셋백에 의해 터빈부하가 60%까지 신속하게 감소된 후 계통 과도상태에 따라 런백이 진행될 수 있다.

(4) 원자로출력급감발계통이 작동된 후 안정상태로의 접근

원자로출력급감발계통이 작동된 후에 원자로출력이 터빈출력보다 클 경우에는 1차측 온도, 압력이 올라가게 된다. 이것이 증기우회제어계통과 원자로 제어계통을 작동시켜 1, 2차 출력이 평형을 이루게 된다.

제 3 장 증기발생기 세관 누설시 문제점 고찰

복수기로의 증기덤프가 가능하기 위해서는 아래와 같이 2가지 필수조건이 우선되어야 한다.

첫째, 6대의 순환수펌프 중 4대가 운전 중이어야 한다.

둘째, 복수기압력은 127 mmHga 이하로 유지되어야 한다.

만약 발전소 운전모드 3(RCS 저온관 온도 177℃ 이상) 이상조건에서 순환수펌프의 전원공급계통 고장, 밀봉수 유량 불만족 등으로 운전 중인 순환수펌프 3대가 정지되는 비정상과 증기발생기 세관누설이 동시에 진행된다면 복수기로의 증기덤프는 불가능하므로 대기환경으로의 증기덤프를 선택할 수 밖에 없다.

제1절. 증기발생기 누설감시

1. 정상운전

가. 원자로냉각재 누설 점검

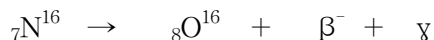
- (1) RCS Leak Rate(On Line)
- (2) RCS Leak Rate(Off Line)

나. 증기발생기 세관누설 점검

증기발생기 누설감지기는 2차계통으로 누설된 원자로냉각재에서 발생하는 방사능을 측정하며 설정치를 초과하면 ‘방사능 고’ 경보를 발생시키고 연동신호에 의해 계통유로가 변경된다. 주로 주증 계통, 증기발생기취출수계통, 복수기추출가스 계통, 탈기기추출가스계통 및 터빈밀봉증기계통에서 세관 누설을 감시한다.

(1) 주증기관 감시(N-16 감시기)

${}_{7}^{16}\text{N}$ 은 높은 에너지(약 7Mev) γ 선을 방출하므로 검출이 용이하고, 또한 반감기가 짧아 주증기계통에 N^{16} Monitor 을 설치하여 증기발생기 세관 누설률을 실시간으로 감시한다.



(2) 증기발생기 취출수 감시

- (3) 복수기 추출가스 감시
- (4) 탈기기 추출가스 감시
- (5) 터빈밀봉증기 감시

2. 세관 누설률에 따른 비정상 운전

가. 4.7 liter/h 미만(감시강화 단계)

계통, 지역방사능 준위 및 누설감시기(N-16) 지시값이 비정상적으로 증가하는지 확인하고 증기발생기취출수계통이 고방사능으로 차단되었는지 확인하며 복수기 추출가스 방출유로가 복수기에서 격납용기로 전환되었는지 확인해야 한다. 시료를 채취하여 시료핵종 분석을 통한 누설률을 계산하며 다중적으로 원자로냉각재 누설율을 계산한다. 증기발생기 누설이 확인되면 대기방출밸브, 복수탈염기, 보조증기 공급원 유로를 차단 또는 변경하여 오염 확산방지 조치를 취한다. 또한 15분 주기로 N-16 값을 확인하여 감시를 강화한다.

나. 4.7 ~ 10 liter/h 미만

누설율이 4.7 liter/h 이상되면 감시강화단계에서 수행하는 모든 조치들을 취하며, 24시간 이내에 운전모드 3(고온대기)에 도달 하도록 출력감발 조치를 수행한다.

다. 10 liter/h 초과(4.7 liter/h 미만)

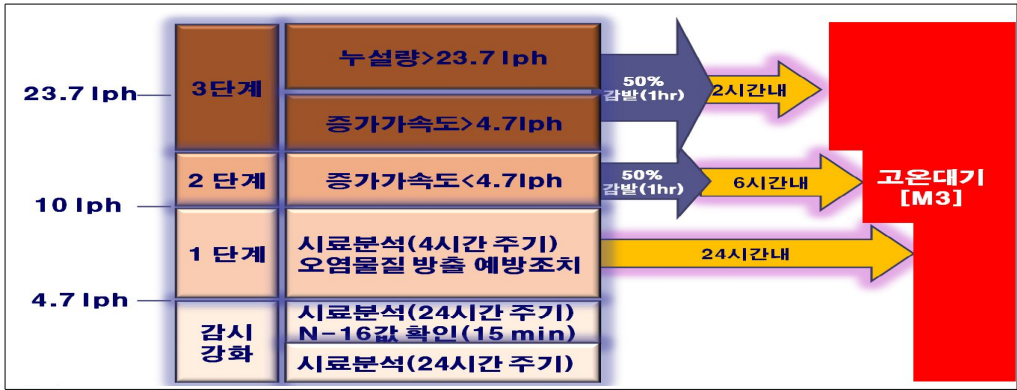
누설율이 10 liter/h 를 초과하고 누설률 증가속도가 4.7 liter/h 미만일때 1시간 내 원자로 출력을 50%까지 감발하고 6시간이내에 운전모드 3(고온대기)에 도달 하도록 출력감발 조치를 수행한다.

라. 10 liter/h 초과(4.7 liter/h 초과)

누설율이 10 liter/h 를 초과하고 누설률 증가속도가 4.7 liter/h 를 초과하면 1시간내 원자로 출력을 50%까지 감발하고 2시간 이내에 운전모드 3(고온대기)에 도달 하도록 출력감발 조치를 수행한다.

마. 23.7 liter/h 초과

누설율이 23.7 liter/h 를 초과하면 1시간내 원자로 출력을 50%까지 감발하고 2시간 이내에 운전모드 3(고온대기)에 도달 하도록 출력감발 조치를 수행한다.



[그림 3-1] 세관누설률 크기에 따른 운전조치

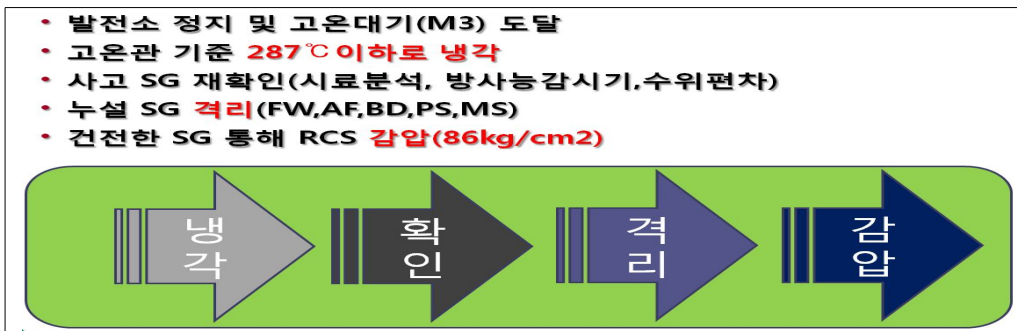
3. 원자로 정지 전·후 비상운전

가. 출력감발 및 원자로 정지

세관 누설률이 4.7 liter/hr 누설을 초과하면 비정상운전절차서에 따라 시료분석 주기를 단축하며 출력감발 조치를 취한다. 원자로가 정지된 이후에는 비상운전절차서를 수행하며 SBCS를 이용하여 1차측 온도를 MSSV 개방설성치 이하로 냉각한 후 세관누설 발생된 증기발생기를 격리하고 1차측을 냉각 및 감압하여 증기발생기와의 ΔP 를 줄이는 조치를 취한다.

나. 비상운전

충전펌프의 용량을 초과하는 증기발생기 세관파열시 가압기 수위와 가압기 압력이 감소되어 ‘핵비등이탈 저’ 에 의해 원자로가 정지될 것이다. 1개의 세관이 양단 파열될 경우 운전원 조치가 없다면 약 20분 이내에 원자로가 정지될 것이며 다중 튜브 손상일 경우 더 빨리 원자로가 정지될 것이다.



[그림 3-2] 비상운전 기본전략

제 2 절 순환수 저유량 및 증기발생기 세관 누설시 문제점

순환수펌프가 4대 미만으로 운전되면 복수기로의 증기덤프 신호가 차단되고 순환수펌프 출구밸브가 조절단힘을 유지한다. 이러한 과도상태 발생 이후 예상할 수 있는 문제점은 다음과 같다.

- 첫째, 터빈 트립시 가압기 고압력으로 원자로 정지가 정지된다.
- 둘째, 원자로 정지 후 복수기가 운전가능해도 복수기 증기덤프가 불가능하다.
- 셋째, 증기발생기 세관누설 동반시 방사능물질이 환경으로 방출될 수 있다.

1. 터빈정지에 의한 원자로 정지

터빈보호계통으로부터 터빈정지신호 및 발전기 정지신호가 발생하면 원자로출력 급감발계통(RPCS)이 동작되어 1차측 출력은 40~60% 정도 유지되며 증기우회 제어계통(SBCS)의 복수기덤프밸브가 조절개방되어 원자로에서 발생하는 열에너지를 흡수한다. 하지만 순환수펌프 3대만 운전되는 상태에서 터빈발전기가 정지되면 복수기로의 증기덤프가 불가능하므로 가압기 고압력에 의해 원자로는 정지된다. 하지만 원자로출력이 충분히 낮아진 상태이고 해수온도가 충분히 낮아 순환수펌프 3대만으로도 복수기 진공도가 유지된다면 불합리한 원자로 정지는 개선이 필요하다.

2. 원자로 정지 이후 복수기 증기덤프 불가능

핵분열로 생성된 여러 가지 물질들은 핵적으로 안정된 상태에 있지 않으며 이러한 물질들은 원자로 내에서 에너지를 방출하며 안정된 물질로 변화해 간다. 이렇게 생성되는 붕괴열(decay heat)은 원자로가 정지된 직후 정상출력의 6% 정도이며 지수함수적으로 감소한다. 원자로가 정지되면 1차측 잔열은 복수기 설계 용량인 40%를 초과하지 않는다. 복수기 진공도만 허용치 이내로 유지된다면 복수기 운전불가능신호(Condenser Unavailable Signal) 에 원자로 정지신호를 추가해야 한다.

3. 방사능물질에 의한 환경오염

증기우회제어계통(SBCS : Steam Bypass Control System)은 100% 출력운전 및 해수온도 20.5℃ 기준에서 복수기 진공도가 38.1mmHga로 설계되었다. 동절기 해수온도는 5℃ 내외까지 감소되며 순환수펌프 4대 운전만으로도 복수기 진공도가 20mmHga 이하를 유지한다. 복수기의 진공도가 충분히 유지됨에도 불구하고 복수기를 사용할 수 없다면 증기발생기 세관 누설시 방사능물질을 환경으로 방출할 가능성이 커진다 .따라서 복수기로의 증기덤프 연동신호는 해수온도를 고려하여 순환수펌프 운전대수를 설정할 필요가 있다.

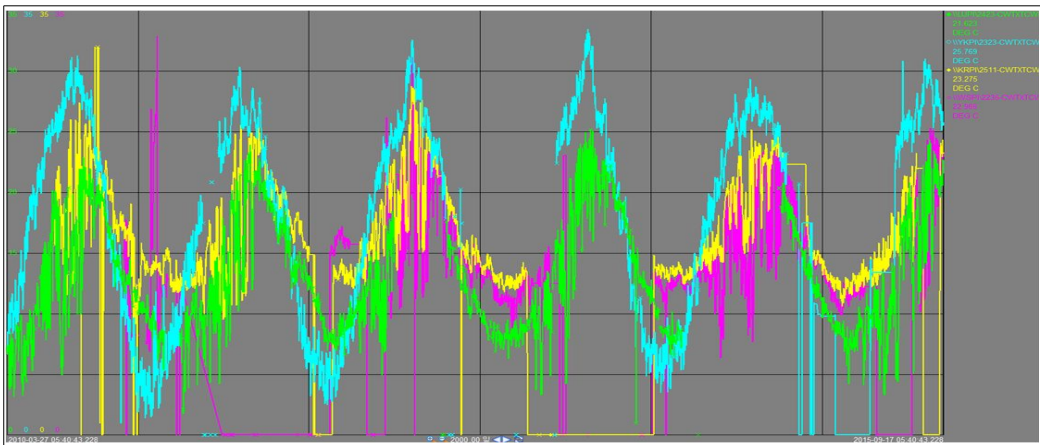
4 장 복수기 연동신호 개선방안

제 1 절 해수온도와 진공도

발전소 취수구 온도변화는 복수기 진공도를 결정짓는 가장 중요한 인자이다. 해수온도가 낮은 동절기에는 순환수펌프 6대중 4대만 운전하여도 복수기 진공도가 20mm Hga 내외로 유지되지만 하절기에는 6대를 모두 운전하여도 복수기 진공도가 70mmHga 까지 증가한다.

1. 취수구 연중 해수온도

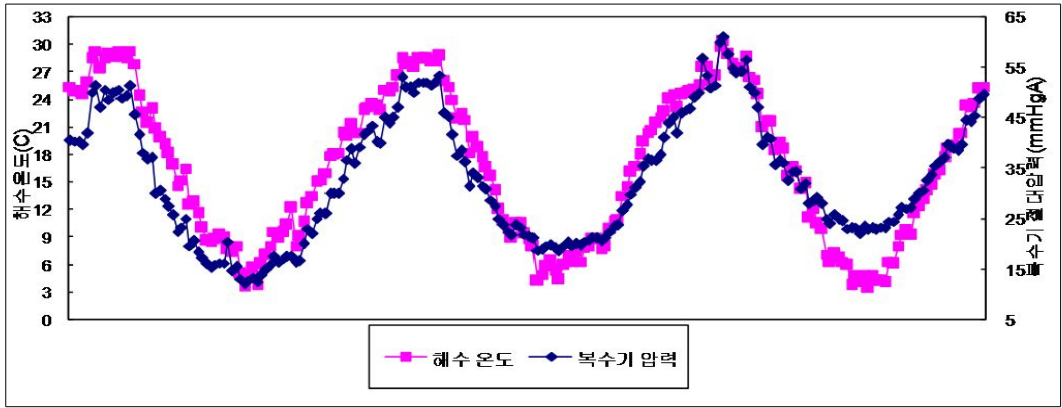
서해안에 위치한 한빛원전의 최근 5년간 연중 해수온도는 3 ~ 32℃ 정도로 4개 원전본부 중 가장 고저차가 심하다. 동해안에 위치한 발전소가 평균 10 ~ 24℃임을 감안할 때 서해안의 동절기와 하절기 온도차가 매우 심하다.



[그림 4-1] 최근5년간 서해안 해수온도

2. 해수온도 변화에 따른 진공도

복수기 진공도는 절대적으로 해수온도와 순환수 유량에 비례한다. 발전소는 해수온도가 변화함에 따라 순환수펌프 운전대수를 추가기동 또는 정지하여 최적의 진공도를 유지함으로써 효율을 유지한다.

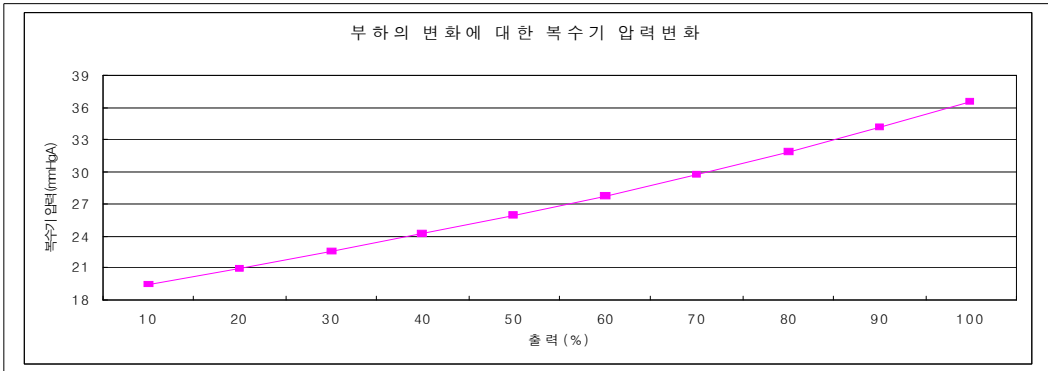


[그림 4-2] 해수온도 변화에 따른 복수기 압력

제2절. 복수기 진공도 주요 영향인자

1. 발전소 출력과 진공도

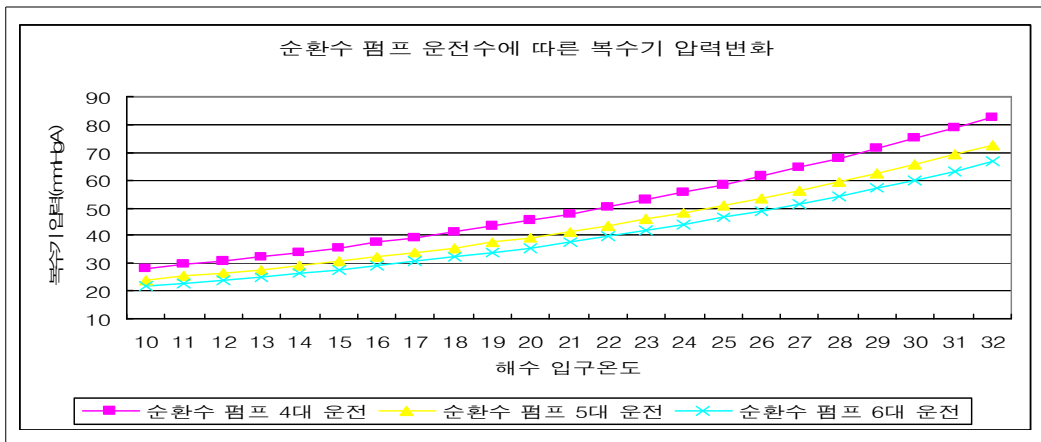
복수기로의 증기유입 유량은 복수기 진공도와 반비례한다. 즉 복수기로의 증기유입량은 결국 원자로 열에너지를 의미하며 발전소 출력이 증가함에 따라 복수기의 진공도는 증가한다.(해수온도 20.5℃, 38.1mmHga)



[그림 4-3] 출력에 따른 복수기 압력

2. 순환수펌프 운전대수와 진공도

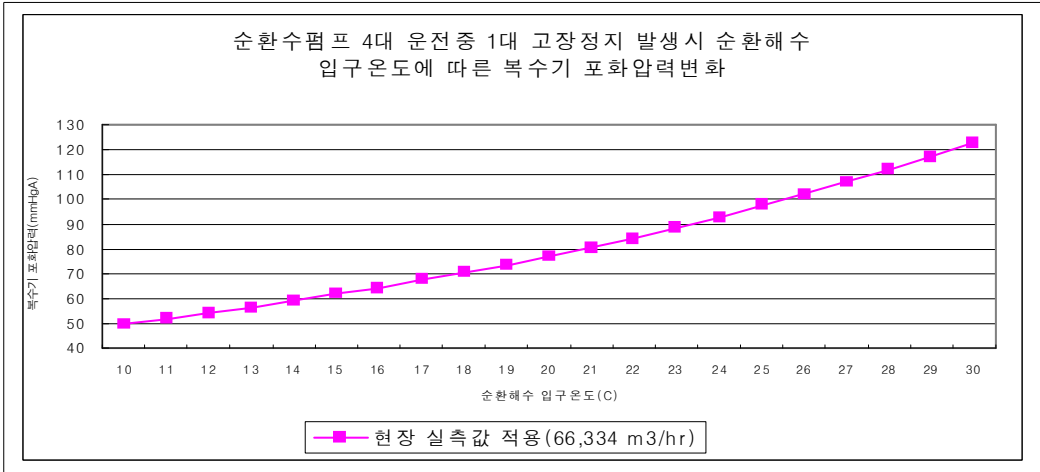
발전소는 해수온도에 따라 순환수펌프 운전대수를 추가기동 또는 정지하여 최적의 효율을 유지한다.(출력100%)



[그림 4-4] 순환수펌프 운전대수별 해수온도와 복수기 압력

3. 순환수펌프 한 계열 정지시 복수기 진공도

순환수의 전 유량은 순환수펌프 6대 운전시 179,062 m³/hr 으로 설계했으며 순환수 펌프가 4대 미만일때는 운전중인 모든펌프의 출구밸브가 Mid. Position (45%)까지 닫힌다. 3대 운전시 실측값은 179,062 m³/hr 이다. [KOPEC, A/E'S Suspended SFR Review(1994)



[그림 4-5] 순환수펌프 3대 운전시 복수기 압력

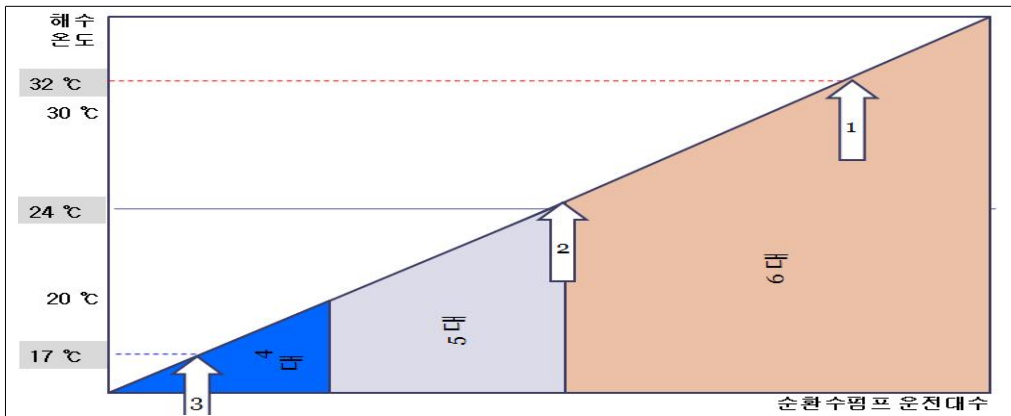
제3절. 시뮬레이터를 이용한 실증시험

모든 시험은 한빛 3호기 시뮬레이터를 통해 진행했으며, 해수온도를 변화시키면서 순환수펌프 3대를 정지시키고 복수기 압력변화를 관찰하면서 RPCS 수동동작, 수동 원자로 정지 및 수동 터빈트립 등 운전원의 수동개입을 통해 데이터를 취득했다.

첫째, 발전소 발전소 현재의 설계조건에서 순환수펌프 3대 운전시 원자로출력 급감발계통(RPCS)을 수동으로 동작하여 원자로 정지를 방지할 수 있는 해수의 최대제한온도를 도출했다.

둘째, 복수기 증기덱프를 허용하도록 로직을 변경 후 원자로출력급감발계통(RPCS)을 수동으로 동작하여 1,2차측의 출력을 급감발시켰으며, SBSCS 대기덱프밸브가 개방(Quick Open)되지 않는 해수의 최대제한온도를 도출했다.

1. 시험조건(BOL, RPCS R5 BANK1 선택)



[그림 4-6] 시뮬레이션 초기조건

가. 발전소 현재 설계조건에서 RPCS 수동동작

- (1) 순환수펌프 6대 운전 중 3대 정지 (RPCS 수동동작)
초기 해수온도 : 32 °C
- (2) 순환수펌프 5대 운전 중 2대 정지
초기 해수온도 : 24 °C
- (3) 순환수펌프 5대 운전 중 2대 정지 (RPCS 수동동작)
초기 해수온도 : 24 °C

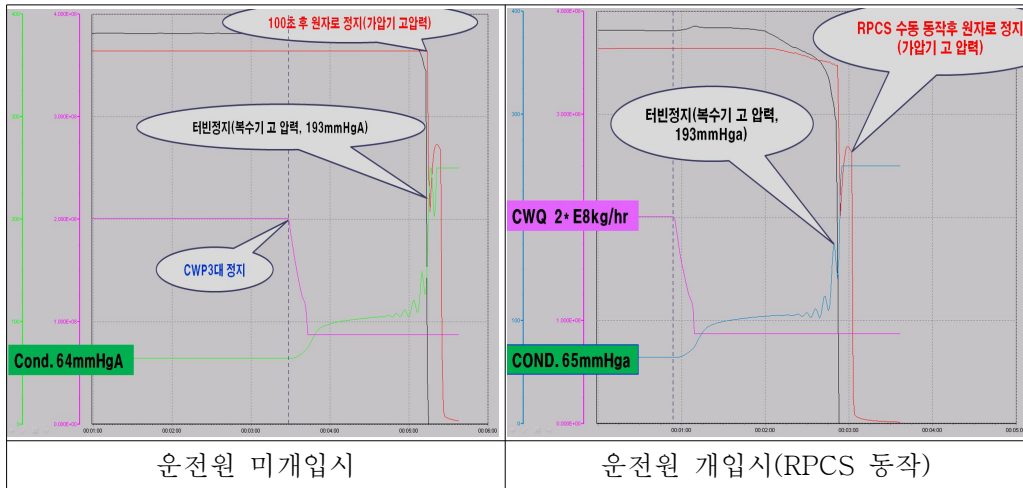
나. 복수기 증기덤프 허용 후 RPCS 수동동작

- (1) 순환수펌프 6대 운전 중 3대 정지 (RPCS 수동동작)
초기 해수온도 : : 32 °C
- (2) 순환수펌프 5대 운전 중 2대 정지 (RPCS 수동동작)
초기 해수온도 : : 24 °C
- (3) 순환수펌프 4대 운전 중 1대 정지 (RPCS 수동동작)
초기 해수온도 : : 17 °C

2. 시험결과-1(현 설계조건)

가. 순환수펌프 6대 운전 중 3대 정지

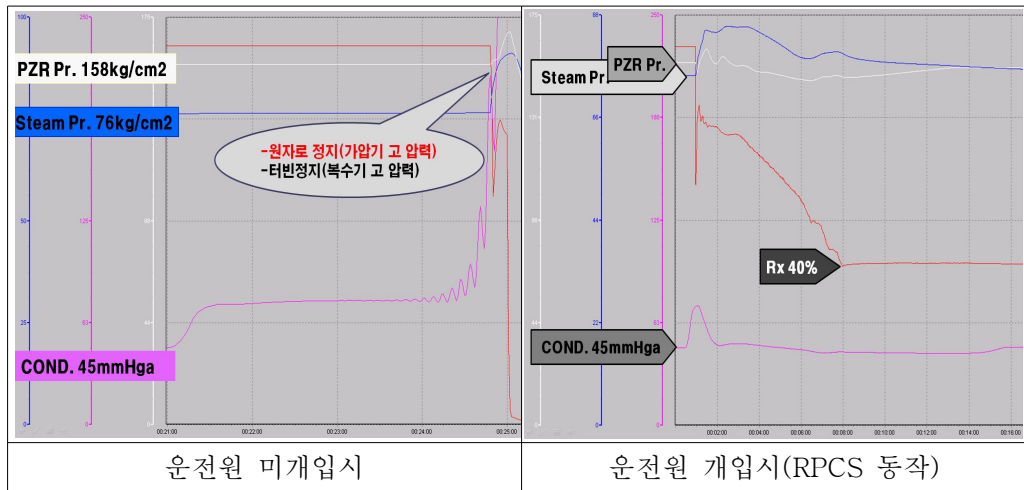
최근 5년간 최대 해수온도인 32°C에서 순환수펌프 3대 운전은 운전원의 개입 (RPCS 수동동작) 에도 불구하고 2분 이내에 복수기 고압력에 의한 터빈이 트립 되었고 가압기 고압력에 의해 원자로가 정지되었다.



[그림 4-7] 해수온도 32°C에서 발전소 거동(현 설계 기준)

나. 순환수펌프 5대 운전 중 2대 정지

해수온도 24°C 에서 순환수펌프 3대 운전은 운전원의 개입(RPCS 수동동작)에 의해 1층 출력이 급감받됨으로써 복수기로의 증기 유입량이 감소되었고 계통이 안정되었다.



[그림 4-8] 해수온도 24℃에서 발전소 거동(현 설계 기준)

라. RPCS 최적운전(현 설계 조건)

해수온도 24℃ 이하, 순환수펌프 3대 운전조건에서 RPCS 계통을 수동으로 동작시켰을 때 1,2차 차측 출력이 급감발되어 복수기로의 증기 유입량이 감소됨으로써 복수기 압력상승이 상쇄되었다.

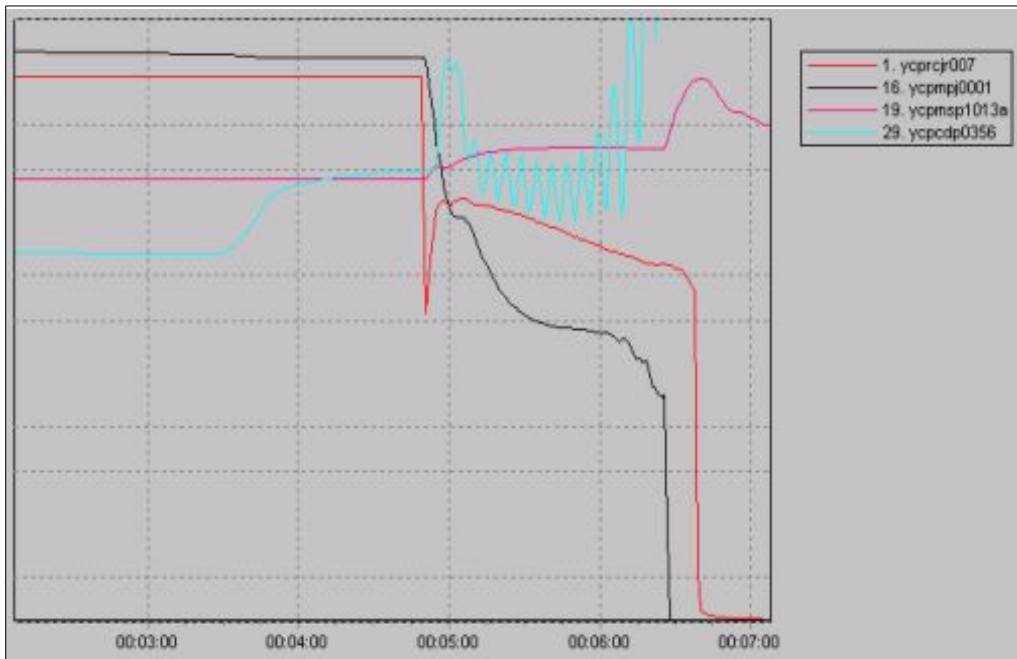
[표 4-1] 해수온도에 따른 RPCS 최적운전(현 설계조건)

CWP 운전 대수	해수 온도(℃)	초기 진공도 (mmHga)	최종 진공도 (mmHga)	출력 변화(%)	비고
6 → 3	32 (최근 5년간 최대온도)	64	250 이상	원자로 정지	-터빈정지 (복수기 고진공) -주증기안전밸브 개방 -100초후 원자로정지 (가압기 고압력)
5 → 3	24	45	250 이상 (운전원 미개입)	원자로 정지	-주증기안전밸브 개방 -원자로정지 (가압기 고압력)
			70→45	40%	-RPCS 동작 후 1,2차측 압력 안정 -복수기 70mmHga 까지 증가 후 46mm Hga 에서 안정됨

3. 시험결과-2(복수기 증기덤프 허용 후)

가. 순환수펌프 6대 운전 중 3대 정지

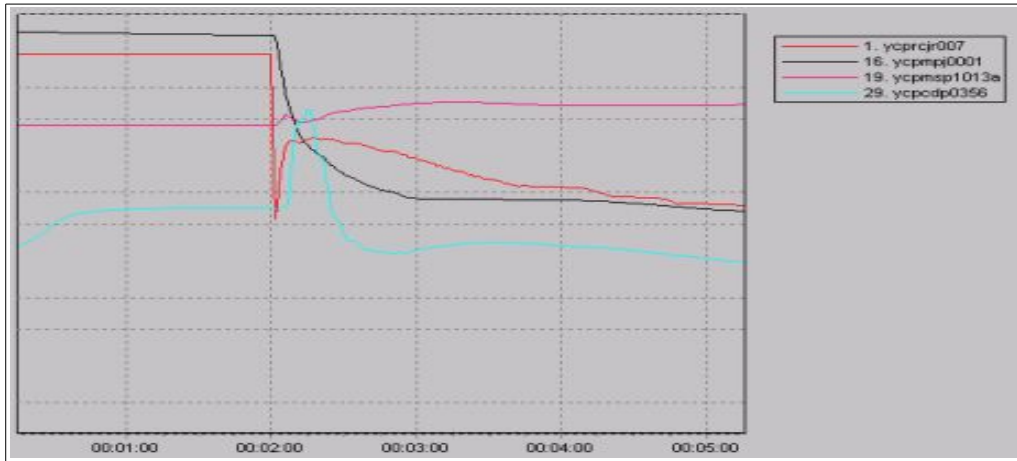
해수온도 32℃인 조건에서 순환수펌프 6대 운전 중 3대 정지시 운전원의 개입(RPCS 수동 동작) 이후 복수기의 순간적인 압력으로 나타났고 곧 감소되어 안정되는듯 했지만 1차측의 잉여 에너지는 복수기 증기덤프 유량을 증가시켰고 복수기의 압력상승을 초래하면서 터빈이 트립되었다. 복수기 압력은 감시영역인 250mmHga 을 초과하였으며 원자로도 정지되었다.



[그림 4-9] 해수 32℃, CWP 6 → 3 대 운전시(복수기 증기덤프 허용)

나. 순환수펌프 5대 운전 중 2대 정지

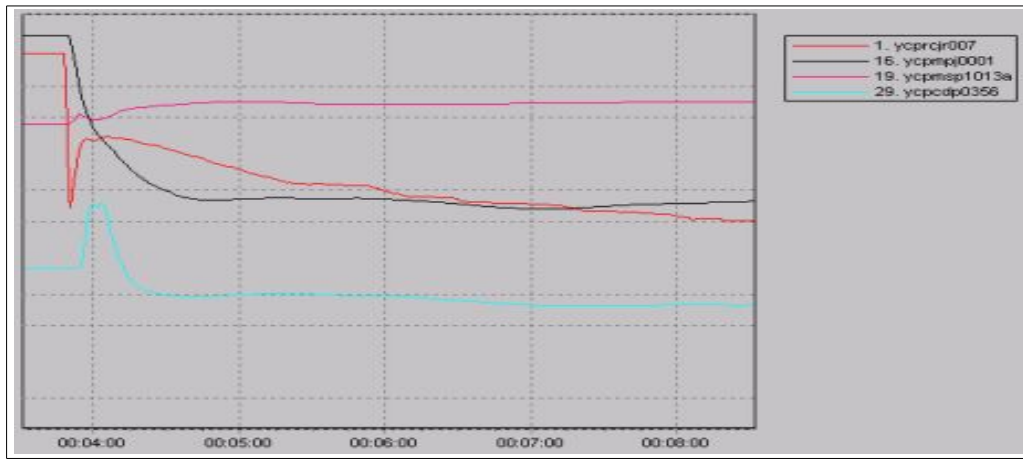
해수온도 24℃, 순환수펌프 5대 운전 중 2대 정지 후 복수기 압력은 42mmHga 에서 55mmHga 까지 증가되었다. 운전원의 개입(RPCS 수동동작)에 1,2차측 출력이 급감발되었고 복수기 압력이 81mmHga 까지 증가되었으나 출력감발에 따른 증기덤프 유입량 감소로 40mmHga 이하에서 안정되었다.



[그림 4-10] 해수 24℃, CWP 5 → 3 대 운전시(복수기 증기덤프 허용)

다. 순환수펌프 4대 운전 중 1대 정지

해수온도 17℃, 순환수펌프 4대 운전 중 1대 정지 후 복수기 압력은 32mmHga 에서 37mmHga 까지 증가되었다. RPCS 동작 이후 1,2차측 출력이 급감발되었고 복수기 압력이 54mmHga 까지 증가되었으나 출력감발에 따른 증기덤프 유입량 감소로 26mmHga 이하에서 안정되었다.



[그림 4-11] 해수온도 17℃, CWP 4 → 3 대 운전시(복수기 증기덤프 허용)

4. 복수기 증기덤프 허용가능한 해수온도(조건 : RPCS 수동동작)

복수기 증기덤프 허용 및 해수온도 24℃ 이하에서 순환수펌프가 정지되어 3대만 운전되어도 RPCS 를 수동으로 동작시키면 원자로와 터빈은 정지되지 않았다.

[표 4-2] 복수기 증기덤프 허용시 복수기 진공도 변화

CWP 운전 대수	해수 온도 (℃)	초기 진공 도 (mm Hga)	펌프 3대 운전 중 진공(mmH ga)	RPCS(R5) 후 동작후 진공도 변화		출력 변화 (%)	비 고
				최대 진공 도	최종 진공 도		
6	32	64	80	250	250 초과	0/0	-터빈/원자로 정지
5	24	45	55	81	40	55% /550	RPCS 수동동작 후 SBCS Quick Open 신호 발생됨 (밸브 1001~1004 급속 개방후 조절됨)
	21	38	46	71	33		
4	17	32	37	54	26	MW e	RPCS 동작 후 SBCS Quick Open 신호 발생 않됨 (밸브 1001~1004 조절개방됨)
	10	22	25	41	17		
	5	17	19	32	15		

제4절. 운전전략 및 복수기 연동신호 개선

1. 운전전략

순환수펌프가 정지되어 3대가 운전되는 상황이 발생하면 원인해소 후 즉시기동 가능성 등을 판단하여 재기동이 불가능할 때는 가능한 빨리 출력을 급감발해야 한다. 해수온도 24℃ 이하에서 RPCS 를 수동으로 동작시키면 원자로 정지를 방지하는 것으로 확인되었다. 또한 증기발생기 세관이 누설되는 상황이 동반된다면 대기덤프밸브(1007,1008)가 개방되지 않도록 급격한 출력감발이 필요하다. [표 4-3]에서 보듯이 출력감발 중 원자로출력 60% 정도에서는 원자로가 정지되어도 대기증기덤프밸브(1007,1008)가 개방되지 않지만 터빈이 트립되면 저출력이라 하더라도 개방될 수밖에 없기 때문에 원자로 출력을 30%까지 급감발해야 한다.

[표 4-3] 복수기 증기덤프 허용시 출력별 대기덤프밸브 개방

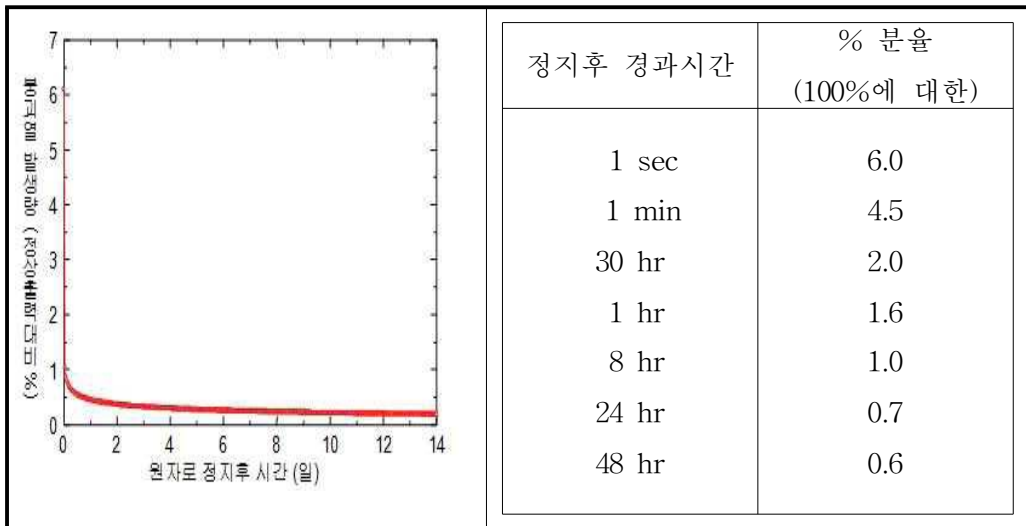
초기조건 (복수기 증기덤프 허용)				주입 신호	최종 복수기 압력 (mmH ga)	비 고
CWP 운전 대수	해수 온도 (℃)	출력 (%)	복수기 압력 (mmHga)			
3대	20	61	31	터빈 정지	45~23	-SBCV 1001~1008 개방
		40	25		40~20	-SBCV 1001~1008 개방
		75	36	원자로 정지	28	-SBCV 1001~1008 개방
		61	31		36~22	-SBCV 1001~1004 개방 -SBCV 1007,1008 대기 덤프밸브 개방 안됨

증기발생기 세관 누설율이 10 liter/hr 를 초과하면 원자로 출력을 1시간 이내에 감발해야 한다. SBCS 동작으로 대기환경으로의 방출 가능성을 줄이기 위해 출력감발

중에는 원자로출력이 터빈출력보다 너무 높지 않도록 주의한다. 또한 원자로 정지 이후 누설중인 증기발생기를 격리하고 건전한 증기발생기로 1차측의 에너지를 제거 하면서 가압기 압력을 감소시켜 1,2차측의 ΔP 를 줄임으로써 누설량을 줄인다.

2. 1차측 에너지 크기를 고려한 연동신호 입력

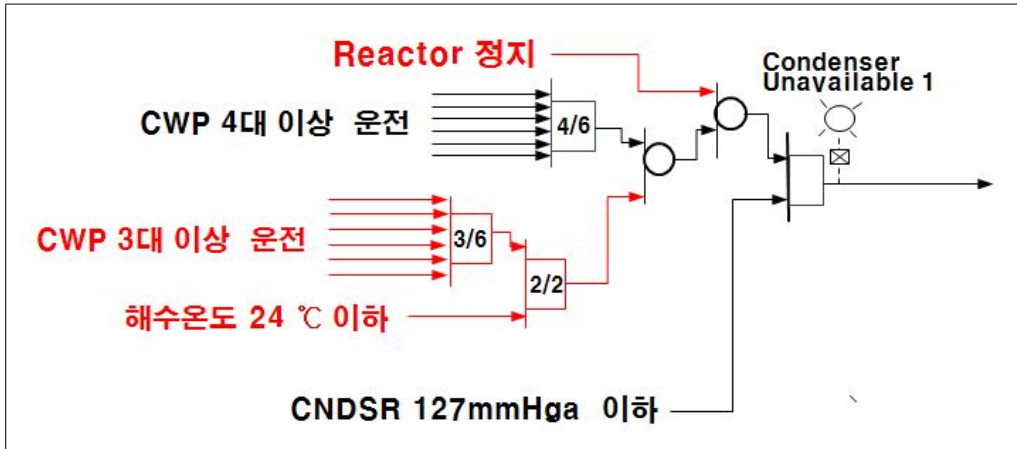
원자로 정지 직후 붕괴열(decay heat)은 정상출력의 6% 정도이며 지수함수적으로 감소한다. 원자로 정지 후의 1차측 에너지는 복수기 설계용량인 40%를 초과하지 않으므로 복수기 진공도만 허용치 이내로 유지된다면 복수기 운전불가능 연동신호(Condenser Unavailable Signal) 는 원자로 정지신호를 고려해야 한다.



[그림 4-14] 원자로 정지 후 방출되는 붕괴열

3. 해수온도를 고려한 복수기 증기덤프 허용신호 재설계

해수온도가 24℃ 이하로 충분히 낮고 순환수펌프가 3대 운전중인 조건에서도 복수기 진공도가 127mmHg 이하로 유지된다면 복수기로의 증기덤프를 허용해야 한다.



[그림 4-15] 개선된 복수기 증기덤프 연동신호

4. 복수기 증기덤프 연동신호 재설계의 장·단점

변화하는 해수온도를 반영한 복수기 증기덤프 연동신호는 불합리한 원자로 정지를 방지할 수 있고, 증기발생기 세관 누설 동반시 환경으로의 방사능물질 방출 가능성을 줄일 수 있다.

[표 4-4] 복수기 증기덤프 연동신호 설계 전·후 비교

구 분	현 설계 기준	재 설계 기준
계통 안전성 측면	-연동로직 단순 -불합리한 원자로 정지	-설비의 신뢰도 증가 -불합리한 원자로 정지 방지 -연동 로직 복잡
제어 편의성 측면	-대기덤프 개방으로 인한 운전원 부담 가중	-복수기 운전 여유도 증가 -RPCS 수동동작 시점 결정 부담
환경 오염측면	-대기환경 오염 가능성 증가	-대기환경으로의 방사능물질 방출 가능성 감소

제 5 장 결 론

복수기와 순환수계통은 증기우회제어계통(SBCS : Steam Bypass Control System)이 제 기능을 수행하기 위해 복수기 진공을 형성하는 가장 중요하고 필수적인 계통이다. 현재 국내 원전은 복수기 증기덤프 조건으로 변화하는 해수온도는 고려하지 않고 순환수펌프의 운전대수만 제한하고 있다. 하지만 전력계통 고장 및 순환수계통의 과도상태 발생시 복수기의 진공도가 충분히 유지됨에도 불구하고 SBCS 계통이 고유의 기능을 수행하지 못한다면 불합리한 원자로 정지를 초래할 수 있고, 증기발생기 세관이 누설되는 상황이 동반된다면 대기환경으로의 방사능물질 방출 가능성은 커질 것이다. 이러한 불합리한 설계를 개선하기 위해 발전소 설계자료와 한빛3호기 시뮬레이터를 통해 운전방향을 제시했고 연동로직을 수정했다.

첫째, 복수기가 운전 불가능할 때 RPCS 계통을 수동으로 동작시켜 원자로 정지를 방지할 수 있는 해수의 최대제한값(24℃)을 도출했고

둘째, 증기발생기 세관누설 동반시 방사능물질 방출 가능성을 줄이기 위해 복수기 증기덤프 연동신호를 재설계했다.

셋째, 증기발생기 세관누설 동반시 원자로보다 터빈발전기가 먼저 정지되면 SBCS 모 든 밸브가 급속개방될 가능성이 크기 때문에 가능한 터빈이 트립되지 않도록 주의 하면서 출력을 감발해야 한다.

운전원의 개입(RPCS 수동동작)은 복수기의 일시적인 압력상승을 가져올 수 있었지만 순환수펌프가 정지되기전의 복수기 압력이 충분히 낮은 상태에서는 RPCS의 수동 동작이 복수기 운전측면에서 훨씬 유리함을 확인했다. 즉 1차측의 잉여에너지를 복수기가 충분히 감당할 수 있으면 복수기 증기덤프를 허용하여 환경으로의 방사능물질 방출 가능성을 줄이는 것이 본 연구의 목적이었으며, 이번 연구는 증기발생기 세관 누설 시 비정상 및 비상을 조치하는 운전원의 역량에 도움이 될 것이며, 설비의 안전성 및 신뢰도 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 원자로이론 한국수력원자력 인재개발원(1993)
- 2) “계통-3521, 증기우회 제어계통”, 한빛원자력 2발전소 운영절차서
- 3) 한빛3,4호기 운영기술지침서
- 4) 한빛3,4호기 운영기술지침서 기술배경서
- 5) 표준형 원전 비상운전절차서(SGTR)
- 6) 표준형 원전 비정상운전절차서(증기발생기 튜브누설)
- 7) 한빛 3,4호기 계통설명서
- 8) 한빛 3,4호기 Functional Block Diagram
- 9) Steam Bypass System Guideline(10487-SE-OG610-02)
- 10) CWP OM Manual
- 11) KONIS(Korea Hydro&nuclear Power Plant Nuclear Information System)
- 12) A/E's Suspended SFR Review(1994), KOPEC
- 13) Hanbit #3 Simulator

감사의 글

논문작성을 마치고 ‘감사의 글’ 을 접하고 보니 만감이 교차합니다. 한빛 3,4호기 시운전을 시작으로 20여 년간 발전업무와 교육훈련센터 교수실 업무를 수행하면서 학업에 대한 갈증은 있었지만 바쁘다는 핑계로 부지런하지 못했던 기억들! 이런 저에게 석사학위 과정은 제 자신을 담금질할 수 있는 소중한 새 출발이었고 인생의 전환점이 되었습니다.

그 동안 논문을 지도해 주시고 끊임없는 용기와 희망을 심어주신 이경진 교수님, 논문 심사과정에 조언과 격려를 아끼지 않으셨던 정운관 교수님, 송종순 교수님께도 머리 진심으로 감사드리며, 학위과정 중 소중한 가르침을 주신 모든 교수님들께도 감사의 말씀을 드립니다.

학위과정에 도전할 수 있도록 용기를 주신 이병식 소장님과 이선일 실장님, 학위과정을 무리없이 소화할 수 있도록 지원해 주신 양창호 본부장님께 머리숙여 깊은 감사를 드립니다. 또한 바쁜 업무에도 불구하고 시뮬레이터를 통한 검증시험에 도움을 주신 박복열 센터장님과 오치호 과장님께 특별히 감사를 드립니다.

마지막으로 오늘이 있기까지 항상 기도를 해주신 어머니, 묵묵히 논문작업을 지켜보고 용기를 준 사랑하는 아내와 아들 호영, 호균에게도 고마움을 전합니다.

2015년 11월 26일

김 효 진