



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](#)

2021년 2월

석사학위 논문

주급수펌프 비정상 발생에 관한  
운전원 조치 개선연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 판 길

# 주급수펌프 비정상 발생에 관한 운전원 조치 개선연구

- A Study on Improvement of Operator's Measures for  
Abnormal Occurrence of Main Feed Water Pump -

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 판 길

# 주급수펌프 비정상 발생에 관한 운전원 조치 개선연구

지도교수 : 이경진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 판 길

## 김판길의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정운관 (인)

위원 조선대학교 교수 이경진 (인)

위원 조선대학교 교수 김종현 (인)

2020 년 11 월

조선대학교 대학원

## 목차

표목차 .....	iv
그림목차 .....	v
ABSTRACT .....	vii
제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 본론 .....	3
제 1 절 증기발생기 수위제어 관련계통 .....	3
1. 개요 .....	3
2. 주급수계통 .....	3
가. 개요 .....	3
나. 계통 주요 구성기기 .....	4
(1) 증기발생기	
(2) 주급수펌프	
(3) 주급수펌프 재순환밸브	
3. 급수제어계통(FWCS) .....	6
가. 개요 .....	6
나. 급수제어계통 운전모드 .....	7
(1) 저출력(15% 이하) 수위제어모드	
(2) 고출력(15% 이상) 수위제어모드	
(3) 원자로정지 후 수위제어모드	
4. 원자로출력급감발계통(RPCS) .....	10
가. 개요 .....	10
나. 계통구성 및 기능 .....	10
제 2 절 증기발생기 저수위에 의한 원자로정지 사례 .....	12

1. 개요	12
2. 경험사례	12
3. 주급수승압펌프 04 정지원인	12
4. 주요경위 및 운전변수 추이분석	13
가. 주요경위	13
나. 운전변수 추이분석	14
제 3 절 저출력운전(30% 이하) 중 펌프 정지사례 분석	15
1. 저출력시 주급수계통 운전	15
2. 절차서 조치사항 적절성 검토	15
가. 표준형절차서 검토	15
나. 주급수펌프 운전관련 발전소별 절차서 비교	16
다. 문제점	16
3. 원자로저출력에서 주급수펌프 정지 시 조치 개선방안 검토	17
가. 개요	17
나. 시뮬레이션	18
(1) CASE A(터빈 수동정지 및 제어봉 수동삽입)(현행절차)	
(2) CASE B(터빈 수동정지 및 RPCS 수동동작)	
다. 시뮬레이션 결과 및 분석	20
제 4 절 주급수펌프 재순환밸브 비정상 개방사례 분석	21
1. 개요	21
2. 정상출력운전 시 주급수계통 운전	21
3. 표준형절차서 조치사항 검토	21
가. 긴급조치사항 검토	21
나. 출력감발(또는 주급수펌프 수동정지) 관련 SG 수위 기준	22
다. 재순환밸브 개방 시 원자로정지 시간 시뮬레이션	22
라. 문제점	23
4. 재순환밸브 비정상 개방 시 개선방안 검토	24
가. 개요	24
나. 시뮬레이션	26

(1) CASE A : 증기발생기 수위 64%(WR)에서 터빈출력 급감발	
(2) CASE B : 증기발생기 수위에 따른 주급수펌프 수동정지	
다. 시뮬레이션 결과 및 분석	32
<b>제 3 장 결론</b>	<b>33</b>
참고문헌	35
부록1. 시뮬레이션 검증	36



## 표 목차

표 2.1 증기발생기 설계사양 .....	4
표 2.2 출력에 따른 원자로출력급감발계통 동작 .....	11
표 2.3 주급수펌프 운전관련 발전소별 절차서 비교 .....	16
표 2.4 발전소별 출력감발 증기발생기 수위기준 절차서 비교 .....	22
표 2.5 비정상 시 운전원 조치 가능시간 .....	23
표 2.6 터빈출력 급감발 CASE .....	32
표 2.7 주급수펌프 수동정지 CASE .....	32

## 그림 목차

그림 2.1	주급수계통 개략도	3
그림 2.2	증기발생기	4
그림 2.3	주급수펌프 터빈계통 증기공급 개략도	5
그림 2.4	주급수제어계통 논리도	6
그림 2.5	저출력 수위제어모드 논리도	7
그림 2.6	고출력 수위제어모드 논리도	8
그림 2.7	원자로정지 후 수위제어모드 논리도	9
그림 2.8	원자로출력급감발계통 단순블록선도	10
그림 2.9	원자로출력급감발계통 동작 논리도	11
그림 2.10	원자로정지 발생 흐름도	12
그림 2.11	원자로출력급감발계통 램프 미점등	13
그림 2.12	신월성2호기 주급수펌프 01 정지 시 운전변수	14
그림 2.13	저출력 운전 중 주급수 유로	15
그림 2.14	저출력 운전 중 주급수 정지	17
그림 2.15	제어봉 수동삽입 시 운전변수	18
그림 2.16	RPCS 수동동작 시 운전변수	19
그림 2.17	정상출력운전 중 주급수 유로	21
그림 2.18	운전원조치가 없을 경우 운전변수	22
그림 2.19	정상출력운전 중 재순환 밸브 비정상 개방	24
그림 2.20	터빈출력 급감발 시 제어 메카니즘	25
그림 2.21	주급수펌프 정지 시 제어 메카니즘	25
그림 2.22	SG수위 64%(WR)에서 출력650MW까지 급감발 운전변수	26
그림 2.23	SG수위 64%(WR)에서 출력400MW까지 급감발 운전변수	27
그림 2.24	SG수위 64%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시 운전변수	28

그림 2.25 SG수위 60%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시 운전변수	.... 29
그림 2.26 SG수위 56%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시 운전변수	.... 30
그림 2.27 SG수위 53%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시 운전변수	.... 31
부록 그림 1.1 한빛3발 스트레스테스트 성능평가용 Relap5 Nodalization .....	36
부록 그림 1.2 한빛3발 주급수유량 상실에 따른 증기발생기 수위 변화 .....	37

## ABSTRACT

### A Study on Improvement of Operator's Measures for Abnormal Occurrence of Main Feed Water Pump

Kim Pan-Gil

Advisor : Prof. Lee, Gyeong Jin, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

For the past 20 years, there were 14 cases of reactor shutdowns have occurred by low level of the steam generator, and the most operation experiences have been applied for improvement of operator's urgent action procedure of the operation procedure.

However, for the case of main feedwater pump shutdown, under the condition of low reactor power (30% or less) operation or abnormal opening of main feed water pump recirculation valve, the operator's urgent action procedure is different from plants to plants, not clearly stated. even some plants have not proper procedures for those situations.

These deficient or absence of procedures raise the possibility of reactor shutdown by steam generator low level.

Therefore, the simulation of the shutdown of main feedwater pump during reactor low power operation (30% or less) was performed on CASE A (turbine manual shutdown and control rods manual insertion) and CASE B (turbine manual shutdown and Reactor Power Cutback System (RPCS) manual operation).

The simulation of abnormal opening of main feedwater pump recirculation valve during normal power operation was performed on CASE A (sharp decrease turbine power to 400MW at 64% (WR) of the steam generator level) and CASE B (manual shutdown of the main feedwater pump at 64% (WR) of the steam generator level).

It is hoped that improved procedures developed through simulations will be applied to operator's procedures to prevent the reactor shutdown and to contribute to safe operation of the plant to help restore public trust in nuclear power.

## 제 1 장 서론

1978년 4월 고리 1호기가 우리나라 최초로 상업운전을 시작한 이후 지속적으로 원자력발전소를 건설해왔고 최근 신고리 4호기가 상업운전을 시작하면서 현재 우리나라에는 총 25기의 원자력발전소를 운영하고 있다. 원자력발전소를 운영한 이래로 약 40여년 동안 500여건의 발전소 불시정지 사건(터빈정지 포함)이 발생하였고 이러한 수많은 경험사례 및 운전 노하우를 반영하여 각 발전소별로 비정상에 상황에 대비한 운영절차서를 작성하여 사용 중에 있다. 그럼에도 불구하고 예상치 못한 비정상이 발생하는 경우가 있다.

최근 20여년간 증기발생기 저수위에 의한 원자로정지가 14건이 발생하였으며 그동안 발생했던 대부분의 증기발생기 저수위 운전경험은 원인 파악 및 해결방안을 도출하여 해당 운영절차서 운전원 긴급조치사항에 반영되어 운영 중이나 그동안 경험해보지 않았던 원자로저출력(30% 이하)에서 주급수펌프 1대 운전 중 주급수펌프 정지와 정상출력 운전 중 주급수펌프 재순환밸브가 비정상적으로 개방되었을 경우의 비정상은 운전원 조치사항에 대해 운영절차서에 반영되어 있지 않거나 발전소별로 상이하고 긴급조치사항 절차가 미흡한 부분이 있어 원자로저출력운전 중 주급수펌프 정지 및 주급수펌프 재순환밸브 비정상 개방 시 절차 및 운전원 조치 미흡에 따라 증기발생기 저수위에 의한 원자로정지가 발생할 가능성이 있다.

원자로저출력(30% 이하)에서 주급수펌프 1대 운전 중에 주급수펌프 정지로 인해 운전원 조치에도 증기발생기 저수위로 원자로가 정지가 되는 사건이 최근 신월성 2호기에서 발생하였다. 발전소 계획예방정비를 완료하고 출력 상승 운전을 하면서 원자로출력 30%이하에서 주급수펌프 1대 운전 중 RPCS(원자로출력 급감발계통) 논리회로 신호 오류를 발견하고 조치작업 후 복구 중 주급수펌프 정지가 발생하여 운전원이 조치사항에 따라 터빈 수동 트립 및 기동용 급수펌프 기동 등 긴급조치를 수행하였으나 증기발생기 저수위에 의해 원자로가 정지되는 사건이 발생하였다. 이에 대한 원인분석 중 발전소별 비정상 발생에 대한 조치사항이 미흡하여 운전원 조치사항에 따라 증기발생기 저수위에 의한 원자로정지가 발생할 수 있는 문제점이 확인되었다.

주급수펌프 재순환밸브는 제어기 고장에 의한 부분개방 사례는 있었으나 완전 개방된 사례는 없었다. 부분 개방은 충분히 운전원 조치가 가능하다. 그러나, 재순환밸브는 기기특성(Fail Open)을 고려하면 밸브 고장 시 부분개방 가능성은 낮으며 완전개방 가능성이 크다. 직접적인 재순환밸브 비정상 개방 운전경형사례는 발생하진 않았지만 발전소 재교육기간 중 주급수계통 비정상에 대비한 훈련센터 시뮬레이터에서 1대의 주급수펌프 재순환밸브 비정상 개방 시 운전원 조치사항 중에 운전원이 현행 운영절차서의 긴급조치사항의 절차에 따라 조치를 수행하면 증기발생기 저수위에 의한 원자로 정지가 빈번하게 발생하여 운영절차서 긴급조치사항의 적절성을 검토한 결과 긴급조치사항의 절차가 미흡하고 발전소별 긴급조치절차가 상이하하여 증기발생기 저수위에 의한 원자로정지가 발생할 가능성이 있다는 문제점을 확인하였다.

최근에 원자력안전에 대한 규제기관 및 국민들의 관심이 높아지면서 원자력발전소 과도상태 발생 시 원자력을 바라보는 시선은 좋지 않으며 특히 원자력발전소가 정지되는 사건이 발생하면 발전소를 재가동하기 위해서는 규제기관 뿐만 아니라 지역주민의 동의를 얻어야만 가동할 수 있어 발전소를 재가동하는데 최소 2주에서 한 달 정도의 시간이 걸려 발전소 정지에 따른 인적, 물적 비용 손실과 원자력에 대한 국민의 불신도 커지고 있는 상황이다.

이에 원자로저출력(30% 이하)에서 주급수펌프 1대 운전 중 펌프 정지 시와 정상출력운전 중 운전중인 2대의 주급수펌프 중 1대의 주급수펌프 재순환밸브 비정상 개방 시의 조치사항에 대해 표준형 원자력발전소의 운영절차서를 비교 분석하고 시뮬레이터 모의시험을 통해 적절한 운전원 대응방안에 대한 개선사항을 도출하여 발전소운영에 적용하고자 한다.

## 제 2 장 본론

### 제1절 증기발생기 수위제어 관련계통

#### 1. 개요

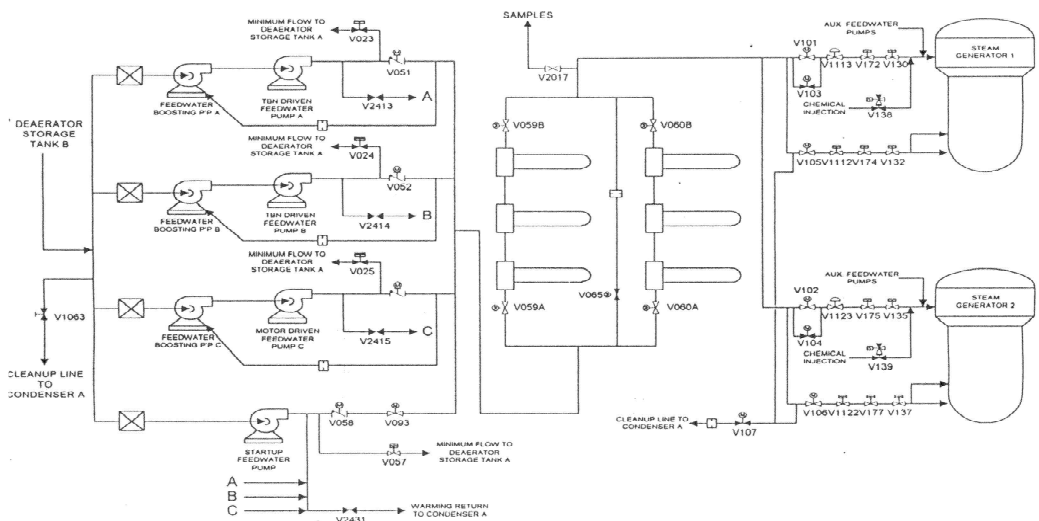
정상 및 과도상태 시 증기발생기 정상수위(44%(NR), 75%(WR)) 유지를 위해 주급수계통, 보조급수계통, 급수제어계통(FWCS), 원자로출력급감발계통(RPCS) 등이 있고 여기에서는 주급수계통, 급수제어계통(FWCS), 원자로출력급감발계통(RPCS)을 설명하고자 한다.

#### 2. 주급수계통

##### 가. 개요

주급수계통 개략도가 그림 2.1로 터빈구동 주급수펌프 2대, 전동기 구동 1대, 주급수 승압펌프 3대, 기동용급수펌프 1대, 고압급수가열기, 탈기기 저장탱크, 급수 차단 및 제어밸브, 증기발생기 2대로 구성되어 있다.

탈기기 저장탱크로부터 정격온도, 압력 및 유량으로 2대의 증기발생기로 급수를 공급하며 기동, 정지 및 고온대기 상태에서는 기동용 급수펌프가 정상출력운전 중에는 2대의 급수승압펌프와 터빈구동 주급수펌프가 일정한 수위를 유지한다.



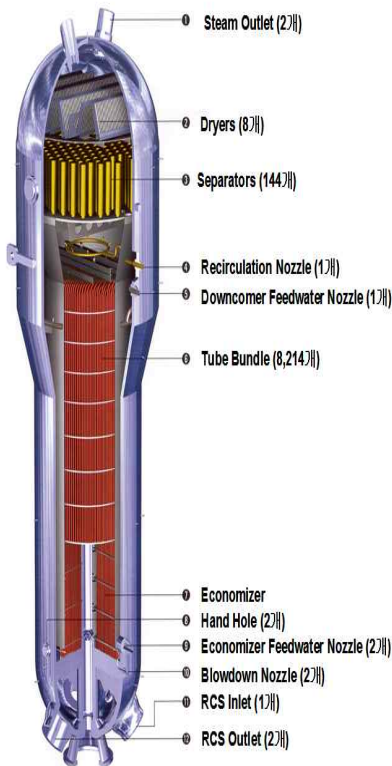
[그림 2.1 주급수계통 개략도]



## 나. 계통 주요 구성기기

### (1) 증기발생기

그림2.2의 증기발생기는 수직 U-Tube형 열교환기로서 관내측(Tube Side)에는 원자로냉각재가 동체측(Shell Side)에는 급수가 흐르면서 열교환이 이루어지며 원자로냉각재 각 루프당 1대씩 2대가 설치되어 원자로 노심에서 발생된 열을 1차측 냉각재를 통해 2차측 냉각재에 전달하여 증기를 생성하고 증기를 통해 터빈-발전기의 구동력을 제공한다. 즉 1, 2차측 압력경계 역할 및 에너지 전달 매체 역할을 한다. 증기발생기 설계사양은 표2.1에 정리되어 있다.



[그림2.2 증기발생기]

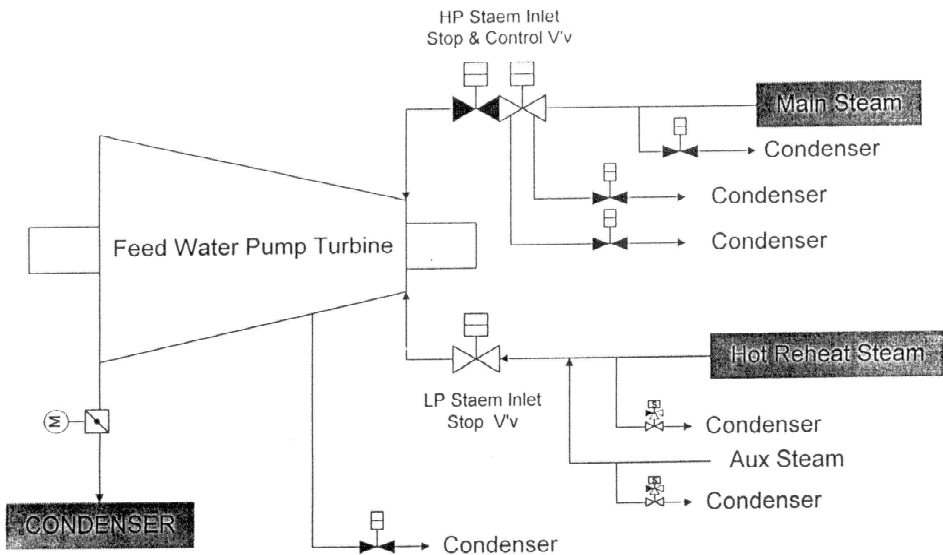
변 수		값
1차측	설계압력	2500psia(175.8kg/cm <sup>2</sup> a)
	설계온도	650°F(343.3℃)
	고온관 온도	621.2°F(327.3℃)
	저온관 온도	564.5°F(295.8℃)
	냉각재 유량	27.56 × 10 <sup>6</sup> kg/hr
2차측	설계압력	1270psia(89.3kg/cm <sup>2</sup> a)
	설계온도	575°F(301.7℃)
	증기압력(증기노즐 끝에서)	1070psia(75.2kg/cm <sup>2</sup> a)
	증기유량(각 노즐별)	1.442 × 10 <sup>6</sup> kg/hr
	전출력 급수온도	450°F(232.2℃)
	1차측 입구노즐	42"
	1차측 출구노즐	30"
	하향유로 급수노즐	6"
이코노마이저 급수노즐	12"	

[표2.1 증기발생기 설계사양]

### (2) 주급수펌프

주급수펌프는 터빈구동 주급수펌프 2대, 전동기구동 주급수펌프 1대, 주급수 승압펌프 3대, 기동용급수펌프 1대로 구성, 주급수펌프 1대당 용량은 정상출력운전 중 증기발생기 총급수유량의 65%이며 정상 운전 중에는 2대의 터빈구동 주급수펌프와 동일계열의 급수승압펌프가 운전되어 증기발생기에 각각 50% 급수를 공급한다. 터빈구동 주급수펌프는 터빈구동기에 직접 커플링으로 연결되어 있고 다음과 같이 증기를 공급받아 운전하고 그림2.3에 터빈구동 주급수펌프 증기공급원을 개략화하였다.

- 터빈출력 40% 이상시에는 습분분리재열기(MSR) 후단의 재열증기 사용
- 발전소 기동시 또는 터빈출력 40%이하 저출력 운전 시에는 주증기 사용
- 주급수펌프 터빈 시험 시에는 주증기 또는 보조증기를 사용



[그림2.3 주급수펌프 터빈계통 증기공급 개략도]

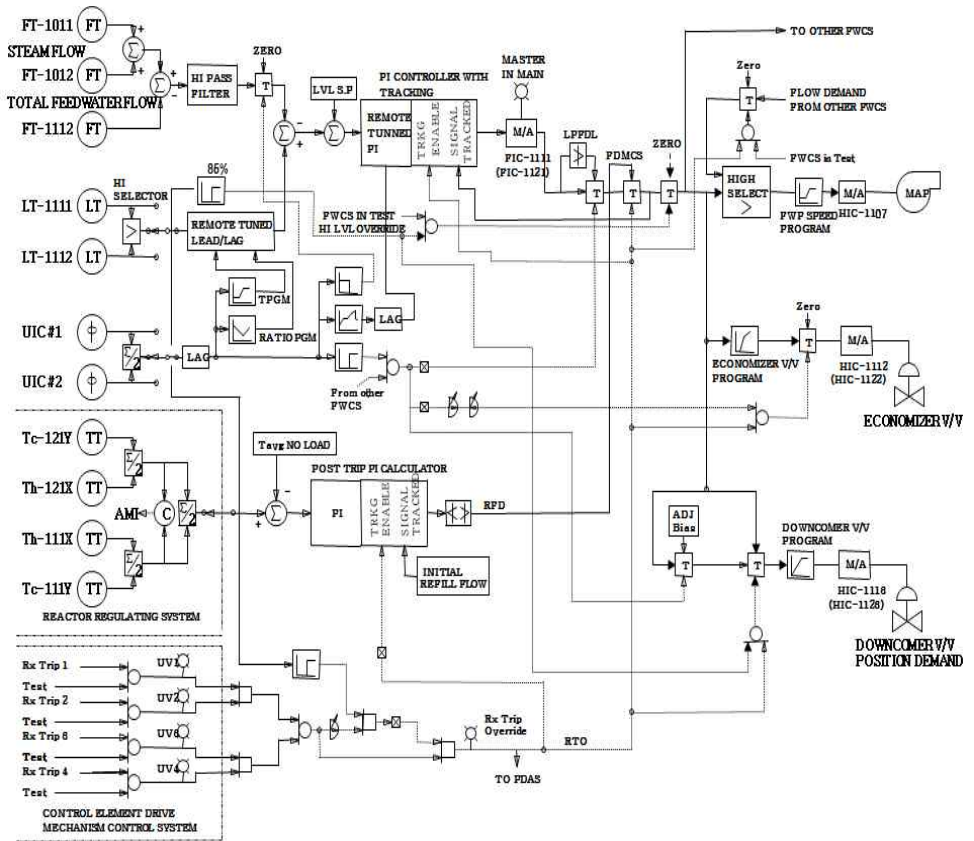
### (3) 주급수펌프 재순환밸브

주급수펌프 후단에 개별적으로 설치된 공기구동 밸브(AOV)로 주급수펌프 최소유량이 441 l/sec이하에서 조절 개방되어 탈기기 저장탱크로 재순환유량을 형성하여 주급수펌프 손상을 방지한다.

### 3. 급수제어계통(FWCS)

#### 가. 개요

급수제어계통은 증기발생기 수위를 적절하게 유지시키기 위하여 증기발생기로 유입되는 급수유량을 조절한다. 그림2.4에 주급수제어계통에 대한 논리가 설명되어 있으며 원자로 고출력 상태(15% 이상)에서는 3요소 급수제어방법으로 급수유량 제어에 증기유량, 급수유량 및 증기발생기 수위신호가 사용되고 원자로 저출력 상태(15% 이하)에서는 단일요소 급수제어방법으로 급수유량 제어에 증기발생기 수위만 이용된다. 급수제어계통은 다운콤마밸브와 이코노마이저 밸브의 개도와 주급수 펌프의 속도를 조절함으로써 증기발생기의 수위를 제어하며 각 증기발생기에 하나의 급수제어계통이 설치되며 각 급수제어계통은 3대의 주급수펌프를 동시에 제어할 수 있다.

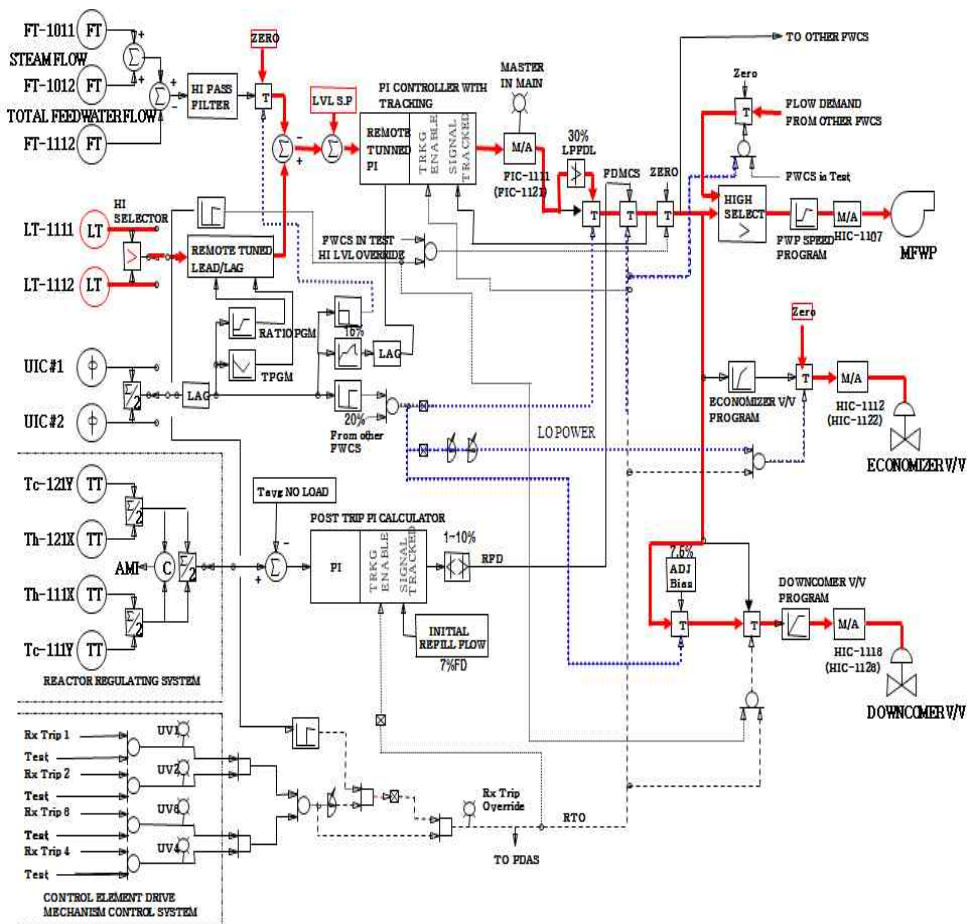


[그림2.4 주급수제어계통 논리도]

## 나. 급수제어계통 운전모드

### (1) 저출력(15% 이하) 수위제어모드

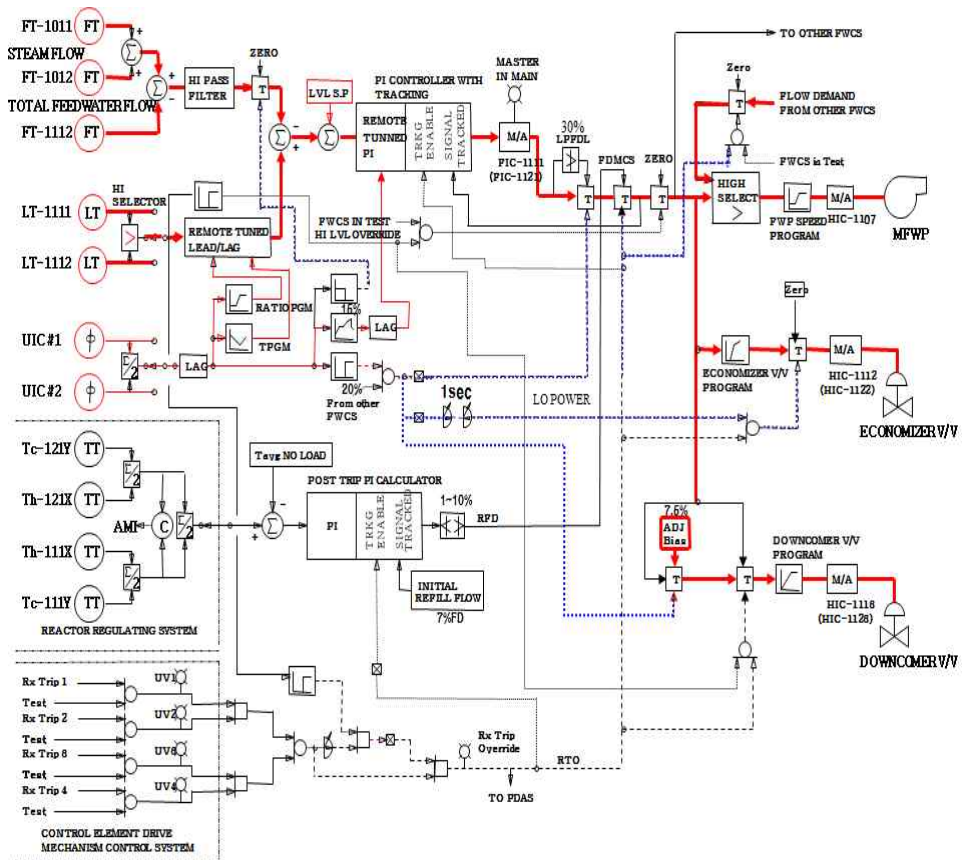
저출력 수위제어모드를 설명하는 논리도는 그림 2.5로 원자로출력 5~15% 상태에서 급수제어는 단일요소제어로서 급수유량 요구 출력신호를 발생하기 위하여 증기발생기 수위신호에 동적보상을 수행한다. 이 출력신호는 최종적으로 증기발생기 다운콤마 밸브개도 요구신호를 발생한다. 이때 증기발생기 이코노마이저 밸브는 닫혀있고 주급수펌프 속도설정치는 최저값(3,600RPM)을 유지한다.



[그림 2.5 저출력 수위제어모드 논리도]

(2) 고출력(15% 이상) 수위제어모드

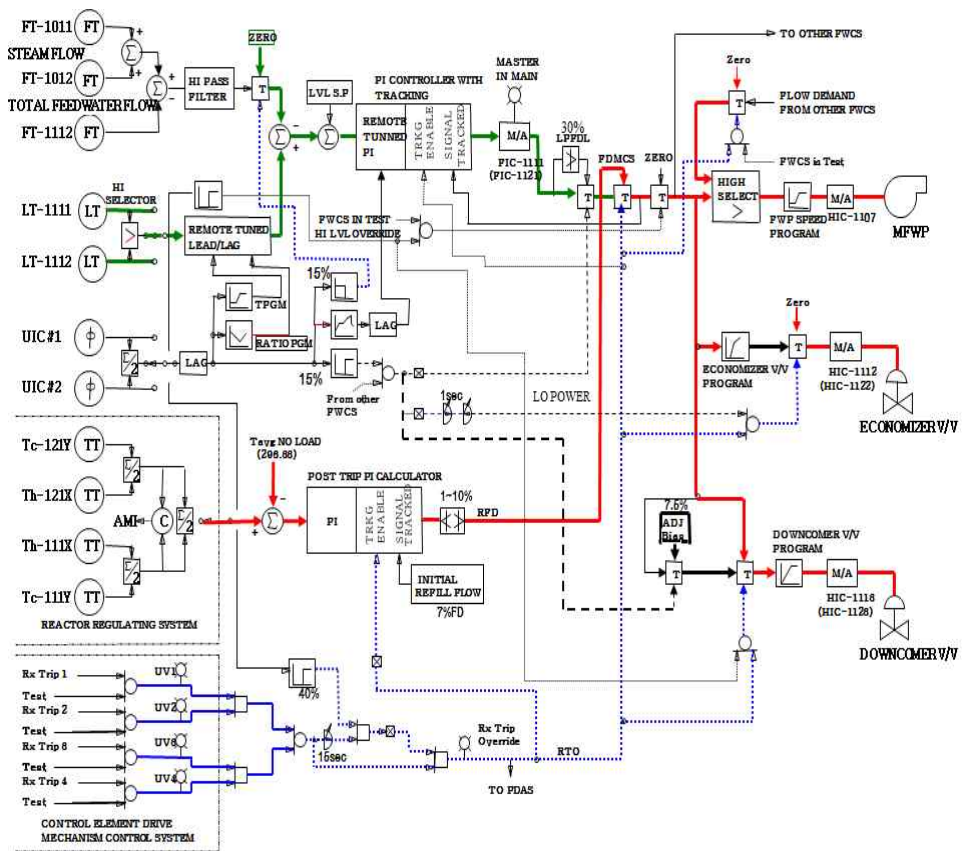
고출력 수위제어모드를 설명하는 논리도는 그림2.6으로 원자로출력 15% 이상 상태에서 급수제어는 3요소 제어모드로써 증기발생기 급수유량 요구 출력신호를 발생시키기 위하여 증기발생기 수위신호, 급수유량신호 및 증기유량신호에 동적보상을 수행한다. 급수제어 출력신호는 출력 15~20%까지는 주급수펌프 속도와 다운콤마 밸브개도 제어, 20%이상에서 주급수펌프 속도, 다운콤마 밸브개도(정격유량 10%) 및 이코노마이저 밸브개도를 제어하여 증기발생기 수위를 프로그램된 정상운전 설정치(44%(NR), 75%(WR))와 일치시킨다.



[그림2.6 고출력 수위제어모드 논리도]

### (3) 원자로정지 후 수위제어모드

원자로정지 후 수위제어모드 논리도는 그림 2.7로 원자로정지 후 증기발생기 급수유량은 무부하 냉각재 평균온도(295.6℃)에 해당하는 값으로 자동 감소된다. 이 신호는 냉각재 평균온도 신호 와 무부하 냉각재 평균온도 설정치 신호의 합으로 이루어진다. 평균온도 합 신호는 비례 적분제어를 통하여 원자로정지 후 유량 요구 신호가 된다. 양(음)의 입력신호는 출력신호가 최대(최소)를 향하도록 증가(감소)하도록 동작된다. 냉각재 평균온도 및 설정치가 일정할 때 냉각재 평균온도 편차보상의 출력신호는 영(Zero)이 된다.



[그림 2.7 원자로정지 후 수위제어모드 논리도]

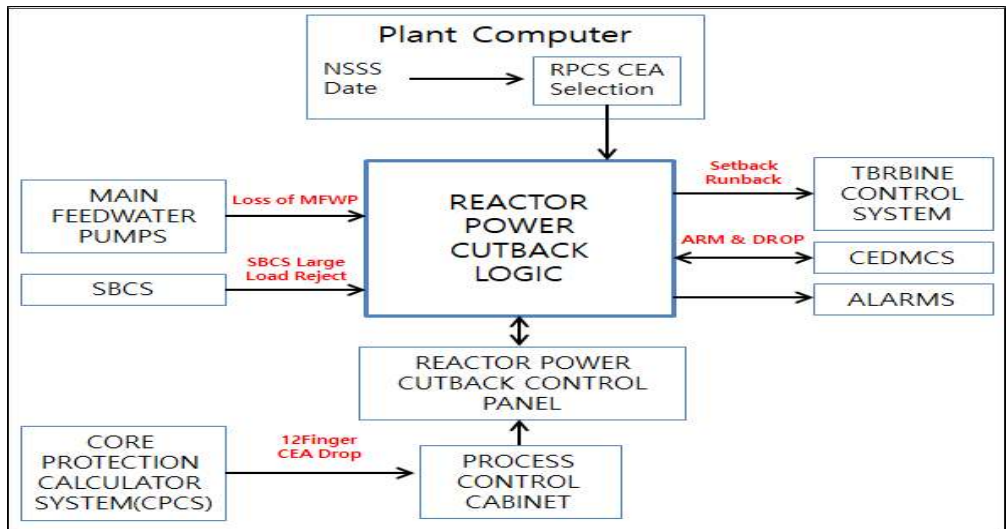
## 4. 원자로출력급감발계통(RPCS)

### 가. 개요

핵증기공급계통은 자동운전 모드에서 5%/min 비율변화 및 10% 단계변화를 수용할 수 있도록 설계되어있다. 터빈-원자로 출력이 일치되지 못하면 원자로 제어계통(RRS), 증기우회제어계통(SBCS), 급수제어계통(FWCS)과 가압기 수위 및 압력 제어계통(PLCS&PPCS)이 상호 조화를 이루어 동작됨으로서 이를 극복해낸다. 그러나 어떤 큰 과도현상 즉, 대형부하 탈락(터빈정지 등)이나 운전 중인 2대의 주급수 펌프 중 1대가 정지된 경우 이들 제어계통으로도 감당해낼 수 없기 때문에 원하지 않은 원자로 정지가 발생할 수도 있다. 이러한 과도현상에 대응하여 원자로출력급감발계통(RPCS : Reactor Power Cutback System)은 선택된 제어봉 부그룹(Subgroup)을 노심바닥에 낙하(Cutback)시키고 터빈 출력은 신속하게 감소(Setback/Runback) 시킨다. 원자로 출력은 RPCS 동작 전 초기 원자로 출력에 따라 20~75% 사이에서 안정 되고 터빈출력은 Setback/Runback 신호에 의해 원자로 출력에 맞추어진다. 증기우회제어계통과 원자로 제어계통은 출력 75% 이내의 용량을 조절하는 범위 내에서 동작된다.

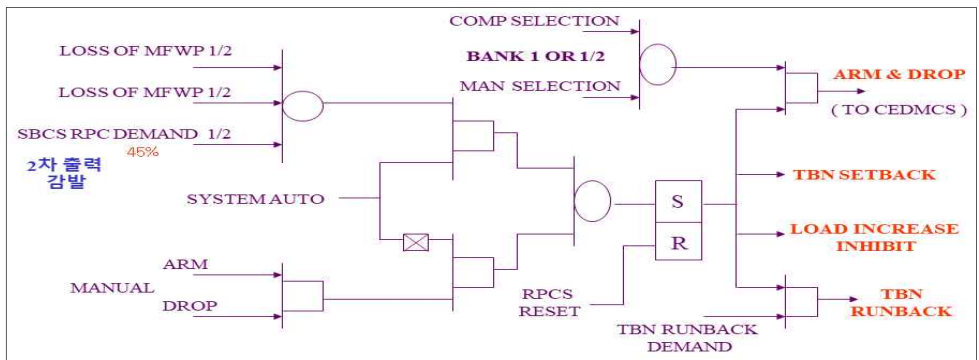
### 나. 계통구성 및 기능

원자로출력급감발계통(RPCS) 구성은 그림2.8, 동작논리는 그림2.9 이다.



[그림2.8 원자로출력급감발계통 단순블록선도]

- 원자로출력 60% 이상에서 주급수펌프가 정지되거나 증기우회제어계통 (SBCS)에서 감당하지 못하는 터빈트립 또는 큰 부하감발이 발생할 경우 선택된 제어봉이 낙하되어 원자로출력과 터빈출력을 신속하게 감소시켜 주급수펌프 정지에 따른 증기발생기 저수위에 의한 원자로정지 방지
- 터빈트립이나 큰 부하감발 시 증기우회제어계통으로부터 신호를 받아 원자로출력을 신속하게 감소시켜 가압기 고압력에 의한 원자로정지 및 1,2차측 안전밸브 개방 방지
- 터빈출력 87% 이상에서 12발 제어봉 1개 낙하 시 터빈출력을 신속히 감소시켜 원자로정지 방지



[그림2.9 원자로출력급감발계통 동작 논리도]

- 출력에 따른 원자로출력급감발계통 동작은 표2.2로 원자로출력 60% 이하 일 때는 증기우회제어계통이 55%까지 부하감발을 담당하여 원자로출력급감발계통이 동작되지 않으며 원자로출력 60~75% 미만일 때는 컴퓨터가 낙하될 제어봉을 선택하지 않고 터빈출력만 60%까지 감발, 원자로출력 75% 이상에서는 선택된 제어봉이 동작되어 원자로출력을 감소시켜 안정하게 유지

원자로 출력(%)	주급수펌프 정지시			터빈 트립시
	제어봉 낙하	터빈 셋백	터빈 런백	제어봉 낙하
60% 이하	낙하 안됨	동작 안됨	동작 안됨	낙하 안됨
60 ~ 75%	낙하 안됨	동작	동작	낙하 안됨
75% 이상	낙하	동작	동작	낙하

[표2.2 출력에 따른 원자로출력급감발계통 동작]



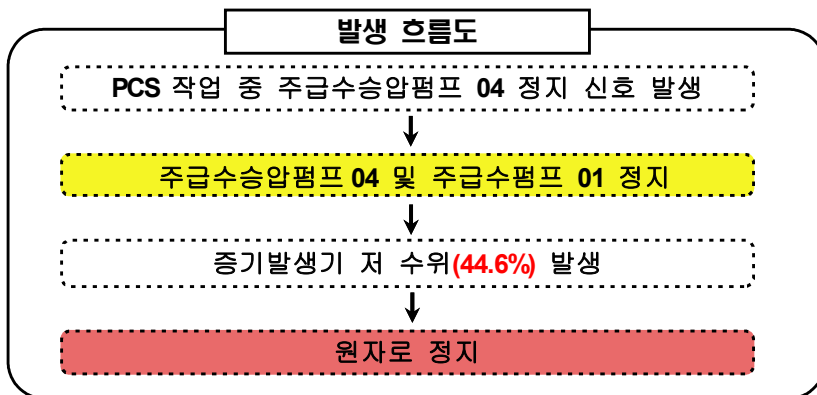
## 제2절 증기발생기 저수위에 의한 원자로정지 사례

### 1. 개요

최근 원자로저출력(30% 이하)에서 주급수펌프 정지로 운전원 조치에도 불구하고 증기발생기 저수위로 원자로가 정지된 사례에 대해 분석하고자 한다.

### 2. 경험사례

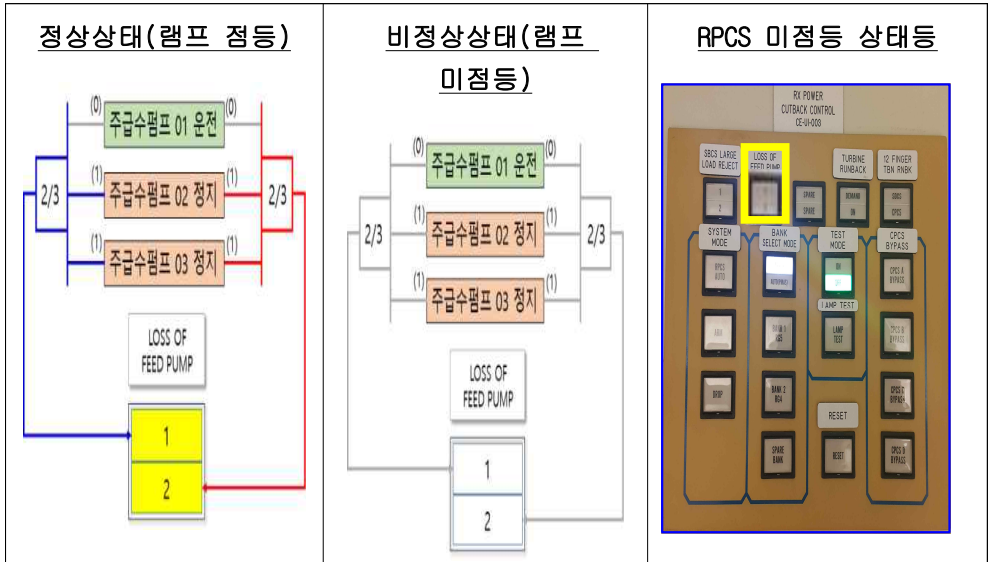
계획예방정비 후 원자로출력 30%에서 원자로 특성시험 중에 주급수펌프 1대 운전으로 증기발생기에 급수공급 중 그림2.10의 정지 흐름에 따라 발전소 제어계통(PCS) 오신호에 의한 주급수승압펌프 04 정지에 의해 주급수펌프 01이 정지되고 증기발생기에 공급되는 급수가 상실되어 운전원 조치에도 불구하고 증기발생기 저수위에 의해 원자로가 자동정지 되었다.



[그림2.10 원자로정지 발생 흐름도]

### 3. 주급수승압펌프 04 정지원인

원자로출력 약 27%에서 RPCS 패널 점검 중 주급수펌프 운전 중에는 RPCS 램프(Loss of Feed Pump 01,02)가 점등되어야 하나 미점등 상태를 발견하고 램프 미점등 원인이 시지연 회로를 추가한 임시변경의 오류로 판단되어 원인점검을 위해 시지연 회로 제거 수행 중 발전소 제어계통(PCS)에서 주급수승압펌프(04) 정지 오신호가 발생되어 운전 중인 주급수펌프(01)가 정지되었다. 그림2.11이 램프 비정상 미점등 상태이다.



[그림 2.11 원자로출력급감발계통 램프 미점등]

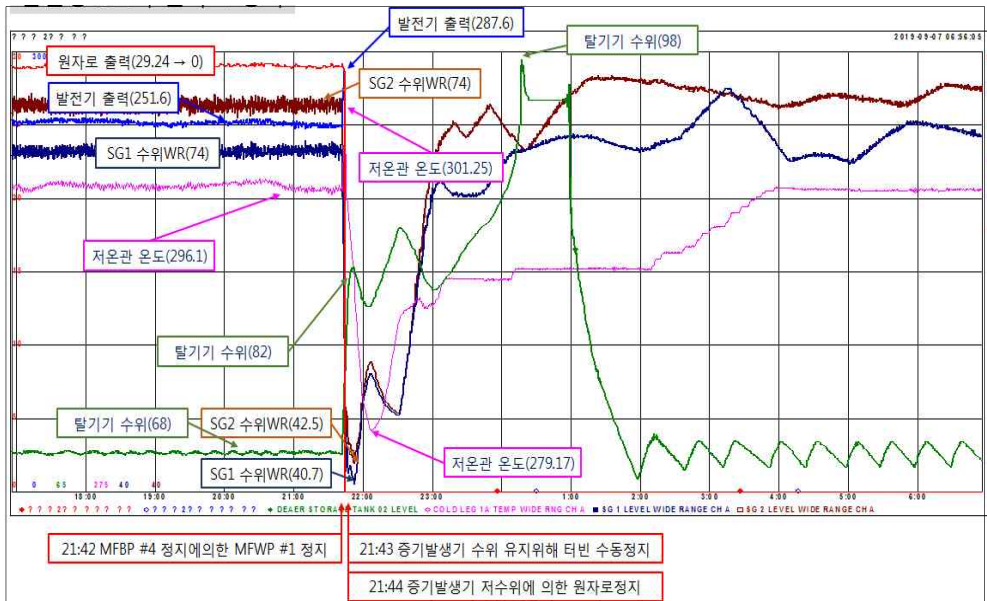
#### 4. 주요경위 및 운전변수 추이분석

##### 가. 주요경위

- 08:45 터빈/발전기 계통연결
- 13:20 주급수펌프 1대 운전 상태에서 원자로출력급감발계통(RPCS) 램프 미점등 확인
- 14:30 원자로출력 30% 도달 - 30% 원자로 특성시험 시행
- 14:30 RPCS 램프 미점등 관련 논리회로 신호 오류 추정
- 18:10 O/H 중 주급수펌프 제어유 저-저압력 정지신호 시지연(1초) 회로작업(임시변경) 후 오류 발생 추정하여 임시 변경 전 상태로 복구 작업 수행
- 21:42 임시변경 오류 확인 작업 중 주급수승압펌프 04 정지 오신호 발생 및 주급수펌프 01 자동정지
- 21:43 터빈 수동정지
- 21:44 원자로 정지(증기발생기 저수위로 정지신호 발생)

## 나. 운전변수 추이분석

- 다음은 그림2.12 주급수펌프 정지 시 운전변수에 대한 추이분석이다.
- 증기발생기 수위를 75%(NR)로 정상유지 중 주급수승압펌프 04 정지로 인한 주급수펌프 01 정지로 주급수유량이 상실되어 운전원이 터빈 수동정지 및 제어봉 삽입을 통해 원자로출력 감소를 통한 증기발생기 수위감소 최소화 조치를 하였으나 주급수펌프 정지 후 약 1분 30초만에 증기발생기 저수위 (44.6%, WR)로 원자로가 정지되었다.
- 원자로출력 30%에서 원자로정지 후 증기발생기 수위 감소로 원자로냉각재 저온관 온도가 298.3℃를 초과 후에 원자로 정지에 따라 원자로냉각재 저온관 온도가 정상범위로 복귀되었으나 기동용 급수펌프 기동에 의한 초기 증기발생기 급수공급이 과다하여 원자로 냉각재 평균온도가 정상값(288 ~ 297℃)이하로 감소 후 운전원의 적절한 조치로 정상화되었다.
- 원자로정지 후 원자로냉각재 평균온도 감소로 인한 순간적인 수축현상으로 가압기 수위가 27% 미만으로 감소하였으나 이후 정상 복구되었다.



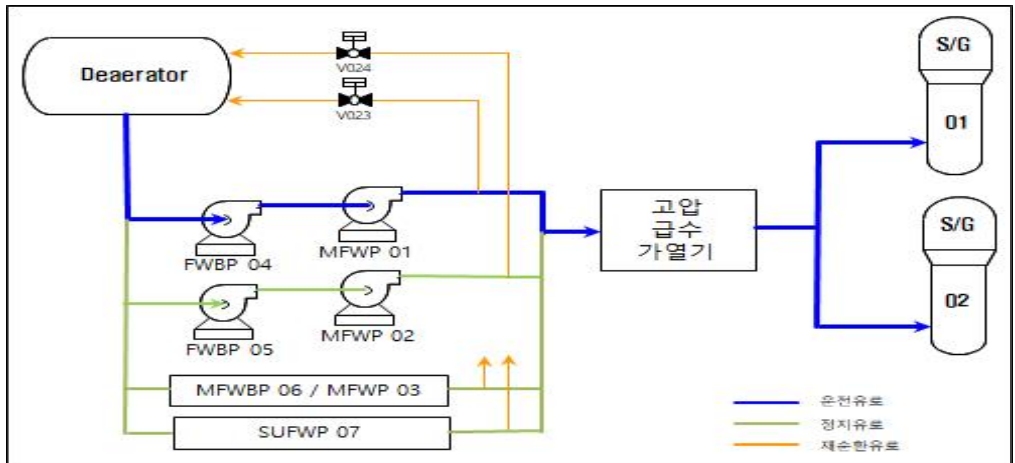
[그림2.12 신월성 2호기 주급수펌프 01 정지 시 운전변수]

운전원 조치에도 증기발생기 저수위로 인한 원자로정지가 발생되어 이번 사례 및 시뮬레이션을 통해 운전원 조치 및 운영절차서의 적절성을 분석하여 원자로정지 방지를 위한 개선사항을 도출하고자 한다.

## 제 3 절 저출력운전(30% 이하) 중 펌프 정지 사례분석

### 1. 저출력 시 주급수계통 운전

원자로저출력(30% 이하)에서는 주급수펌프 3대중 터빈구동 주급수펌프 1대만 운전하여 증기발생기 2대 모두에 급수를 공급하며 나머지 주급수펌프 2대는 대기상태에 있으며 그림2.13 이 저출력운전중 주급수 유로 이다.



[그림2.13 저출력운전 중 주급수 유로]

### 2. 절차서 조치사항 적절성 검토

#### 가. 표준형절차서 검토

한빛3발 운영절차서(종합-3003, 출력운전)에는 원자로 출력 30% 이하 및 이상 시 조치사항이 적절히 명시되어 있으나 그 외 표준형원전(OPR 1000노형) 운영절차서에는 기술되어 있지 않다.

#### 원자로 저출력 운전 중 주급수펌프 정지 시 조치사항(종합-3003, 한빛3발)

##### ○ 원자로 출력 30% 이하 시 조치(주급수펌프 1대 운전 중)

- ① 원자로 출력을 5%까지 급감소(제어봉 이용)
- ② 기동용 급수펌프 기동하여 S/G 수위 유지(출구밸브 Jog 운전)
- ③ 터빈출력 급감소 또는 터빈 수동 정지
- ④ 증기발생기 취출수 차단

## 나. 주급수펌프 운전관련 발전소별 절차서 비교

절차서	한빛2발		한울2발		한울3발	
	Rx 출력	출력별 2차측 펌프 운전	Rx 출력	출력별 2차측 펌프 운전	Rx 출력	출력별 2차측 펌프 운전
종합-3003 25→100%	40%	MFWP 2 추가기동(부하)	40%	MFWP 2 부하운전		
			30%	MFWP 2 추가기동(무부하)	30%	MFWP 2 추가기동(부하)
	25%	COP 2 추가기동		COP 2 추가기동		COP 2 추가기동
종합-3002A 0~Rx 25% or 30%	5%	S/U PP 정지	5%	S/U PP 정지	5%	S/U PP 정지
	2%	MFWP 1 기동	2%	MFWP 1 기동	2%	MFWP 1 기동
	0	S/U PP, COP 1 운전 중	0%	S/U PP, COP 1 운전 중	0%	S/U PP, COP 1 운전 중
절차서	한빛3발		신월성1발(월성3발)		신고리1발(고리3발)	
	Rx 출력	출력별 2차측 펌프 운전	Rx 출력	출력별 2차측 펌프 운전	Rx 출력	출력별 2차측 펌프 운전
종합-3003 25→100%			70%	MFWP 3 추가기동	70%	MFWP 3 추가기동
	40%	MFWP 2 부하운전				
			35%	MFWP 2 추가기동(부하)		
종합-3002A 0~Rx 25%	30%	MFWP 2 추가기동(무부하) COP 2 추가기동	30%	COP 2 추가기동	30%	MFWP 2 추가기동(부하) COP 2 추가기동
	5%	S/U PP 정지	5%	S/U PP 정지	5%	S/U PP 정지
	2%	MFWP 1 기동	2%	MFWP 1 기동	2%	MFWP 1 기동
	0%	S/U PP, COP 1 운전 중	0%	S/U PP, COP 1 운전 중	0%	S/U PP, COP 1 운전 중
특이사항	-주급수펌프 용량 65% -정상운전 중 터빈구동 주급수 펌프 2대 운전(모터구동 대기)		-주급수펌프 용량 55% -정상운전 중 터빈구동 주급수 펌프 3대 운전		-정상운전 중 터빈구동 주급수 펌프 3대 운전	

[ 표2.3 주급수펌프 운전관련 발전소별 절차서 비교 ]

## 다. 문제점

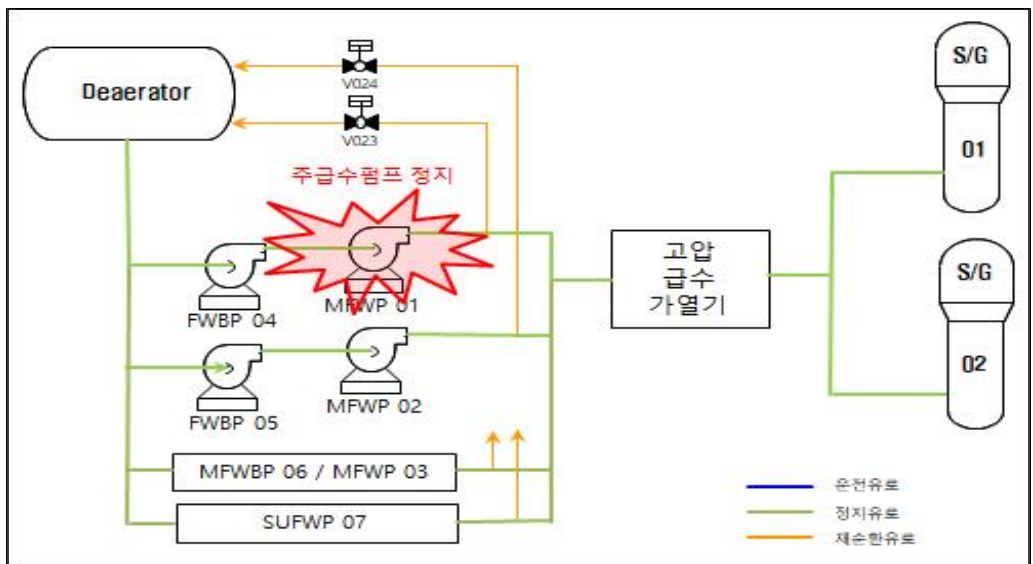
- 한빛3발을 제외한 표준형발전소 운영절차서에 원자로저출력(30% 이하)에서 주급수펌프 정지 시 운전원 조치사항이 기술되어 있지 않음
- 한빛3발전소도 주급수펌프가 정지되면 현재 절차에 따라 제어봉 수동삽입 및 터빈 출력감발(수동정지), 기동용급수펌프 기동 등의 운전원 조치에도 증기발생기저수위에 의한 원자로정지가 발생할 가능성이 있음
- 최근 표준형발전소에서 주급수펌프 정지에 의한 원자로정지 운전경험사례 발생
- 저출력 운전 중 주급수펌프 정지 시 조치사항에 대한 개선이 필요함

현행 운전원 조치사항에 대한 원자로정지 가능성을 확인하여 시뮬레이션을 통해 운전원 조치에 대한 개선방안을 도출하고자 한다.

### 3. 원자로저출력에서 주급수펌프 정지 시 조치 개선방안 검토

#### 가. 개요

원자로저출력(30% 이하)에서 운전 중 주급수펌프 정지를 그림2.14에 도식화하였으며 주급수펌프 1대(01) 운전 중(주급수펌프 02/03 정지 중)에 주급수펌프가 정지되면 증기발생기에 공급되는 급수가 완전 상실되어 운전원의 적절한 조치가 없을 경우 증기발생기 수위감소에 의한 저수위 설정치 도달로 원자로가 정지된다. 이에 한빛 5,6호기 훈련센터 시뮬레이터실에서 원자로저출력에서 운전 중인 주급수펌프 정지를 가정하여 운전원이 주급수펌프 정지를 인지하고 현행 운영절차서 조치사항인 CASE A(터빈 수동정지 및 제어봉 수동 삽입) 조치와 현행 절차가 아닌 CASE B(터빈 수동정지 및 RPCS 수동동작) 조치 2가지 모의시험을 통해 급수상실로 인한 증기발생기 저수위 원자로정지 방지를 위한 운전원의 적절한 조치사항을 확인하였다.



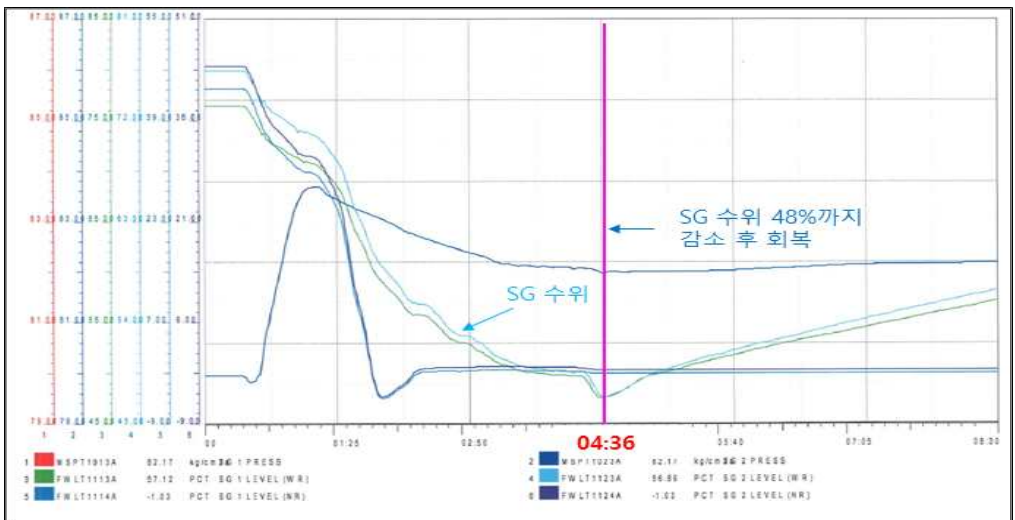
[그림2.14 저출력운전 중 주급수펌프 정지]

## 나. 시뮬레이션

원자로저출력(30% 이하) 운전 중 현행 절차서 조치사항인 CASE A(터빈 수동정지 및 제어봉 수동삽입)와 CASE B(터빈 수동정지 및 원자로출력감발계통(RPCS) 수동동작)에 대해 시뮬레이션 수행하였다.

### (1) CASE A : 터빈 수동정지 및 제어봉 수동삽입(현행 절차)

주급수펌프 1대 운전 중 펌프가 정지되면 증기발생기에 공급되는 주급수 유량이 상실되어 증기발생기 수위가 감소되는데 운전원이 주급수펌프가 정지되고 10초 후에 터빈 수동정지를 수행하고 30초 후에 제어봉 수동삽입을 통해 1,2차 출력감발을 수행하여 출력감발에 의한 증기발생기 급수요구량을 감소시키고 기동용 급수펌프를 신속하게 기동하여 급수유량을 증가시키는 조치를 통해 주급수펌프가 정지 되고 약 4분 36초 후에 증기발생기 수위가 48%(WR)까지 감소되었다가 회복(원자로정지 설정치 : 42.8% WR)되어 제어봉 삽입을 중지하고 원자로 출력 및 증기발생기 수위를 안정화시킨 후 수위를 정상화(44% NR)하였다. 주급수펌프 정지 시 운전원의 적극적인 개입으로 인해 증기발생기 수위를 회복하는데 약 4분 36초의 시간이 소요되었으며 증기발생기 저수위 설정치(42.8% WR)보다 약 5% 정도 여유를 가지고 회복되었다. 그림2.15가 제어봉 수동삽입 시 시뮬레이션 결과이다.

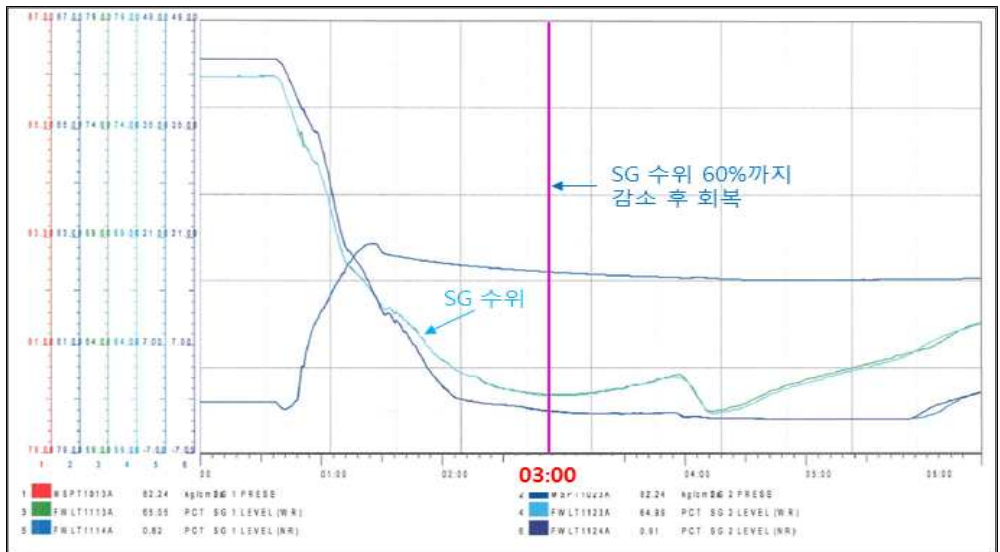


[그림2.15 제어봉 수동삽입 시 운전변수]

(2) CASE B : 터빈 수동정지 및 RPCS 수동동작

주급수펌프 1대 운전 중 펌프가 정지되면 증기발생기에 공급되는 주급수 유량이 상실되어 증기발생기 수위가 감소되는데 운전원이 주급수펌프 정지 10초 후에 터빈 수동정지를 수행하고 14초 후에 원자로출력급감발계통(RPCS) 수동동작을 통해 1,2차 출력을 신속히 감소하여 급수요구량을 감소시키고 24 초 후에 기동용 급수펌프 기동을 통한 급수유량 증가로 주급수펌프가 정지되고 약 3분 후에 증기발생기 수위가 60%(WR)까지 감소되었다가 회복(원자로정지 설정치 : 42.8% WR)되어 RPCS Reset 및 제어봉을 인출하여 원자로출력 5% 유지 및 증기발생기 수위를 안정화시킨 후 정상화(44% NR)하였다.

주급수펌프 정지 후에 운전원의 적극적인 개입으로 제어봉 수동삽입보다 신속한 RPCS 수동동작을 통해 제어봉을 삽입하여 1차 출력을 급격하게 감소시켜 증기발생기의 급수요구량 감소하여 증기발생기 수위 감소를 최소화하고 안정화하는데 약 3분의 시간이 소요되었으며 증기발생기 저수위 설정치 (42.8% WR) 보다 18% 정도 여유를 가지고 회복되었다. 그림 2.16이 RPCS 수동 동작 시 시뮬레이션 결과이다.



[그림 2.16 RPCS 수동동작 시 운전변수]



## 다. 시뮬레이션 결과 및 분석

주급수펌프 정지 후에 운전원이 현행절차인 CASE A(터빈정지 및 제어봉 수동 삽입)를 수행 하였을 경우에는 주급수펌프가 정지되고 약 4분 36초 후에 증기발생기 수위가 48%(WR)까지 감소 후에 회복되었으나 원자로정지 수위 설정치(WR 42.8%)와 차이가 5%로 이는 운전원의 조치가 지연되거나 터빈 수동정지에 의한 증기발생기 압력증가 및 수위회복을 위한 급수유량의 급격한 증가로 수축현상(Shrink) 발생하여 이로 인한 수위감소로 증기발생기 저수위(WR 42.8%)에 의한 원자로 정지가 발생할 가능성이 있고, CASE B(터빈정지 및 RPCS 수동 동작)를 수행 하였을 경우에는 주급수펌프가 정지되고 약 3분 후에 증기발생기 수위가 60%(WR)까지 감소 후 회복되어 CASE A(터빈정지 및 제어봉 수동 삽입) 조치 보다 약 1분 10초정도 빠르게 증기발생기 수위가 원자로정지 설정치(WR 42.8%)보다 18% 이상 높은 수위에서 회복되어 운전원 조치시간에 여유가 생기고 터빈 수동정지에 의한 증기발생기 압력증가 및 수위회복을 위한 급수유량의 급격한 증가로 인한 수축현상(Shrink)으로 인한 수위감소에 여유가 있었다.

CASE A의 제어봉 수동삽입은 운전원이 제어봉을 조작하면 일정한 속도로 삽입이 되고 CASE B의 RPCS 수동동작은 운전원이 ARM & DROP 스위치를 동시에 누르면 선택된 제어봉집합체가 1~2초 이내에 노심 내 삽입되어 제어봉 수동삽입에 비해 1차 출력이 신속하게 감발되어 급수요구량을 낮추고 증기발생기 수위 감소를 최소화하여 CASE B의 경우가 빨리 회복하게 된다.

CASE A는 운전원 조치시간에 따라 증기발생기 수위가 원자로정지 설정치(WR 42.8%) 이하로 감소되어 원자로정지가 발생할 가능성이 크지만 CASE B의 운전원 조치는 터빈정지 및 제어봉 수동 삽입에 비해 증기발생기 수위가 원자로정지 설정치 수위보다 약 18% 높은 상태에서 회복되어 원자로정지가 발생할 가능성이 없는 것으로 분석되었다.

시뮬레이션 결과 원자로 저출력(30% 이하)에서 주급수펌프 1대 운전 중에 정지가 발생할 경우 운전원이 CASE A(터빈정지와 제어봉 수동삽입) 보다 CASE B(터빈정지 및 RPCS 수동동작)을 수행하고 신속하게 기동용 급수펌프 기동하는 것이 증기발생기 수위감소를 최소화하여 원자로정지를 방지할 수 있다는 것을 알게 되었다.

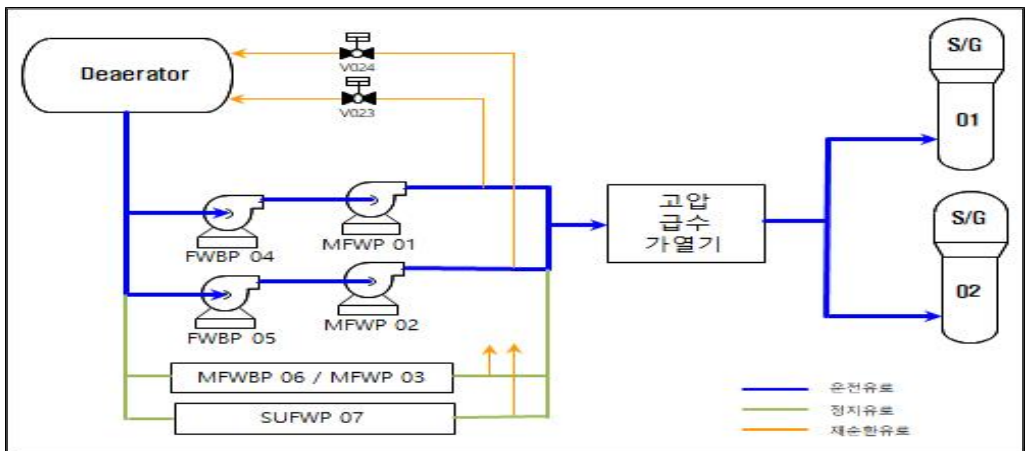
## 제 4 절 주급수펌프 재순환밸브 비정상 개방사례 분석

### 1. 개요

정상출력운전 중 주급수펌프 재순환밸브 제어기 고장에 의한 부분 개방사례는 있으나 완전 개방된 사례는 없었다. 재순환밸브는 기기특성(Fail Open)을 고려하면 밸브 고장 시 부분개방 가능성은 낮아 완전개방 시 조치사항을 분석하고자 한다.

### 2. 정상출력운전 시 주급수계통 운전

정상출력운전 중 주급수유로는 그림2.17로 주급수승압펌프 2대(04,05)와 터빈 구동 주급수펌프 2대(01,02)가 운전되고 주급수승압펌프 1대(06)와 전동기 구동 주급수펌프 1대(03)는 대기 중이며 증기발생기 2대에 급수를 공급하고 재순환밸브는 급수유량이 감소하여 441 l /sec 이하가 되면 조절 개방되어 탈기기 저장탱크로 재순환유량을 형성하여 펌프손상을 방지한다.



[그림2.17 정상출력운전 중 주급수 유로]

### 3. 표준형절차서 조치사항 검토

#### 가. 긴급조치사항 검토

- [MCR] 재순환밸브 격리 시도(밸브 제어기) → [현장] 재순환밸브 격리 시도(M/A Station 이용)
- [MCR] (한빛3발) 출력 긴급감발(65%) 또는 주급수펌프 수동 정지, (월성3발, 고리3발) 주급수펌프 수동 정지, (한빛2발, 한울2/3발) 증기발생기 수위에 따라 출력 감발 또는 주급수펌프 수동 정지

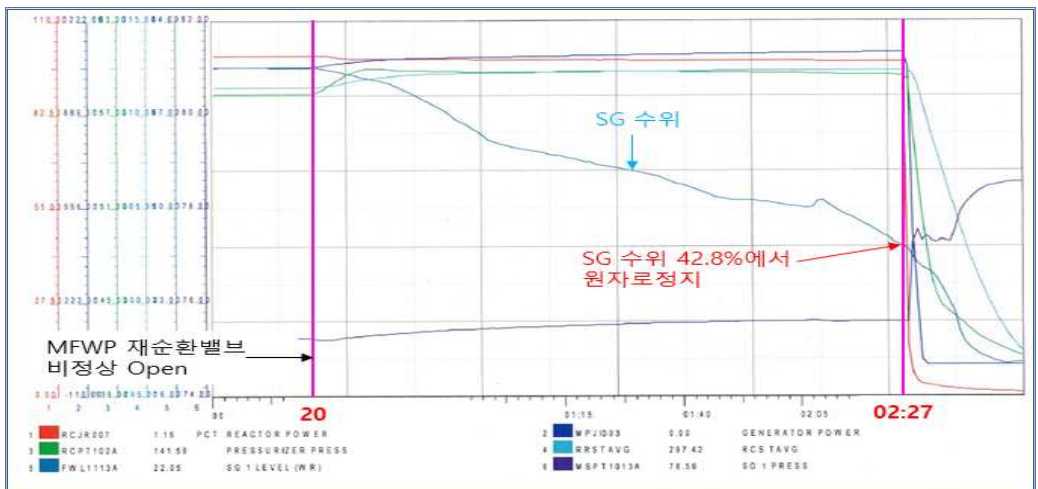
### 나. 출력 감발(또는 주급수펌프 수동 정지) 관련 SG 수위 기준

발전소	출력 감발	주급수펌프 수동 정지
한빛 3발	수위 기준 無	수위 기준 無
월성 3발 고리 3발	출력감발 긴급조치 없음	수위 기준 無
한빛 2발	NR 10 % (WR 63 %) 이하	NR 3 % (WR 60 %) 이하
한울 2발	NR 10 % 이하	WR 60 % 이하
한울 3발	NR 10 % 이하	NR 3 % 이하

[표2.4 발전소별 출력감발 증기발생기 수위 기준 절차서 비교]

### 다. 재순환밸브 개방 시 원자로 정지 시간 시뮬레이션

정상출력운전 중 1대의 주급수펌프 재순환밸브가 100% 비정상 개방되면 운전원 조치가 없을 경우 그림2.18 처럼 증기발생기에 공급하는 급수유량 감소로 인한 증기발생기 수위감소로 급수요구량이 증가하지만 건전한 주급수펌프 1대가 최대 공급할 수 있는 급수유량이 정상출력운전 중 증기발생기 2대에 공급하는 총 급수유량의 65%이므로 운전원 조치가 없을 경우 재순환밸브 비정상 개방 2분 7초 후에 증기발생기 저수위(42.8%, WR)로 원자로가 정지되었다.



[그림2.18 운전원 조치가 없을 경우 운전변수]

## 라. 문제점

- 현장 운전원의 긴급조치까지 실패할 경우에 출력 긴급감발 (또는 주급수펌프 수동 정지) 을 수행하도록 되어 있음
- 현행 절차서(비정상-3541E)의 긴급조치사항을 순차적으로 수행하면, 증기발생기 저수위로 원자로 정지가 발생함
  - 100% 출력운전 중 재순환밸브 비정상 열림(Full Open) 시 원자로 정지까지 소요시간 (한빛 3발 훈련센터 시뮬레이터) : 2분 7초
  - 현장(TGB 165 ft) 도착 소요시간 (운전원 호출 + 지시 + 현장 도착)

구 분	소요시간
2차측 현장 운전원 사무실에서 출발	4분 30초
비안전디젤발전기실에서 출발	7분 10초

[표2.5 비정상 시 운전원 조치 가능시간]

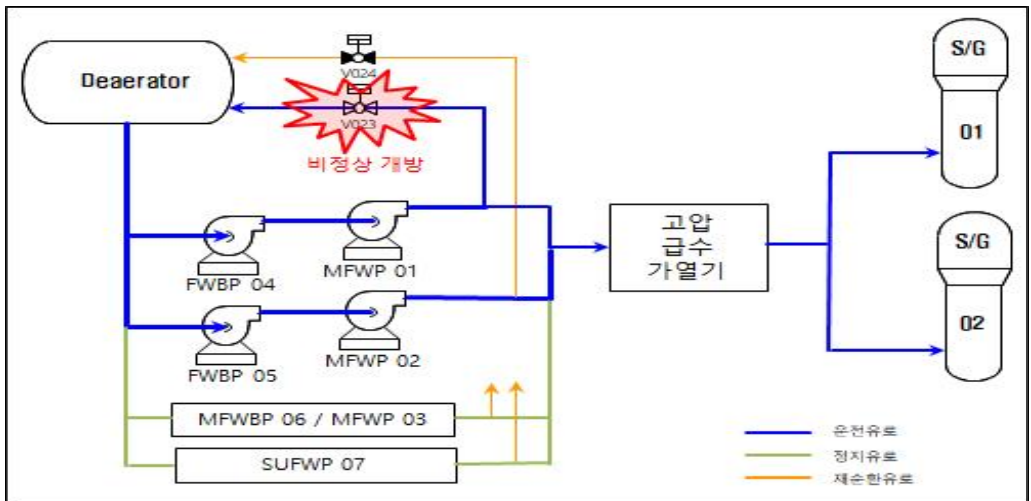
- 재순환밸브 전단 수동격리밸브(12 인치) Close 소요시간 : 8분
- 주급수펌프 수동정지(또는 출력 급감발)이 요구되는 증기발생기 수위 기준이 명시되어 있지 않음
  - 증기발생기 수위가 너무 낮은 상태에서 해당 조치를 수행하면, Shrink (수축) 현상으로 인해 원자로 정지가 발생할 수 있음

정상출력운전 중 주급수펌프 재순환밸브 비정상 제어기 고장에 의한 부분 개방 사례는 있었으나 완전 개방된 사례는 없었다. 부분 개방은 충분히 운전원 조치가 가능하다. 그러나, 재순환밸브는 기기특성(Fail Open)을 고려하면 밸브 고장 시 부분개방 가능성은 낮고 시뮬레이터 실습 교육 시 비정상 완전개방 시에 현행 절차대로 조치사항을 수행하면 증기발생기 저수위로 원자로 정지가 발생하여 이에 대한 개선사항을 확인하여 절차를 개선하고자 한다.

#### 4. 재순환밸브 비정상 개방 시 개선방안 검토

##### 가. 개요

정상출력운전 중에 각각 총 급수유량의 최대 65% 공급이 가능한 2대의 주급수 펌프가 운전되어 각 50%씩 증기발생기에 급수를 공급하는데 1대의 주급수 펌프 재순환밸브가 비정상 개방되면 비정상 주급수 펌프 유로의 급수가 급격히 감소되어 증기발생기에 공급되는 총 급수유량의 급격한 감소로 증기발생기 수위가 감소하고 증기발생기 수위제어 프로그램에 의해 주급수 펌프 속도증가 및 급수제어 밸브 추가개방으로 정상운전중인 주급수 펌프 1대의 급수유량이 총 급수유량의 최대 65%까지 증가하지만 현행 절차대로 현장조치를 우선 수행하면 가장 빨리 조치할 경우 약 12분이 소요되는데 1차 출력(원자로출력) 및 2차 출력(터빈출력)을 신속하게 감발(급수요구량 감소)하지 않으면 급수유량 감소로 재순환밸브 비정상 개방 후 약 2분 7초만에 증기발생기 저수위에 의한 원자로 정지가 발생된다.

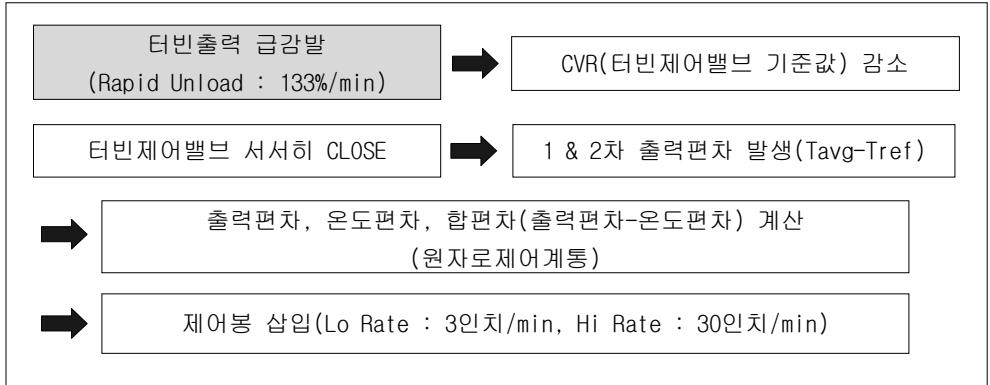


[그림2.19 정상출력운전 중 재순환밸브 비정상 개방]

이에 한빛3발 훈련센터 시뮬레이터실에서 1대의 재순환밸브가 비정상 개방된 경우를 가정하여 CASE A(증기발생기 수위 64%(WR)에서 터빈출력 650MW/400MW까지 급감발), CASE B(증기발생기 수위 64%/60%/56%/53%(WR))에서 해당 주급수 펌프 수동정지) 등 2가지 유형의 시뮬레이션을 통해 운전원 조치 개선방안을 확인하였다.

□ 터빈출력 급감발 시 제어 메카니즘

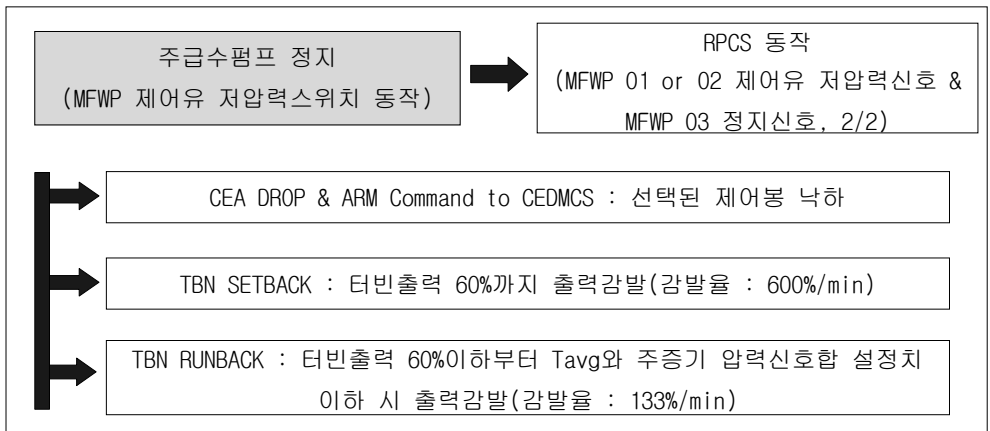
- 터빈출력 급감발 시 제어 메카니즘 그림2.20은 운전원이 터빈출력 급감발 신호입력 후에 여러 단계의 제어계통을 통해 계산되고 제어봉이 삽입되어 2차출력 보다 1차출력 감소가 늦어 증기발생기 급수요구량 감소보다 급수유량 감소가 더 커서 수위가 계속 감소됨



[그림2.20 터빈출력 급감발 시 제어 메카니즘]

□ 주급수펌프 정지 시 제어 메카니즘

- 주급수펌프 정지 시 제어 메카니즘 그림2.21은 주급수펌프를 정지하면 정지신호가 바로 RPCS를 동작 시키고 RPCS 동작으로 인해 제어봉 낙하와 동시에 터빈 Setback/ Runback을 통해 2차 출력을 급감발하여 1차와 2차 출력이 동시에 감소되어 증기발생기 급수요구량 감소가 급수유량 감소보다 더 커서 수위가 빨리 회복됨



[그림2.21 주급수펌프 정지 시 제어 메카니즘]

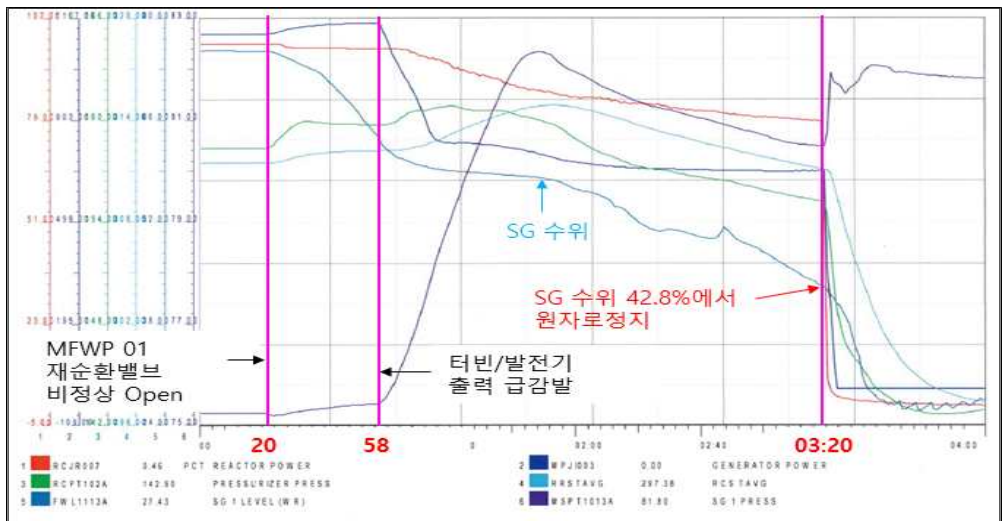
## 나. 시뮬레이션

정상출력운전 중 주급수펌프 재순환밸브 비정상 완전개방을 가정하여 CASE A (증기발생기수위 64%에서 650/400MM까지 급감발)와 CASE B(증기발생기 수위 64/60/56/53%에서 주급수펌프 수동정지)에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

### (1) CASE A : 증기발생기 수위 64%(WR)에서 터빈출력 급감발

#### □ 터빈출력 650MW까지 급감발

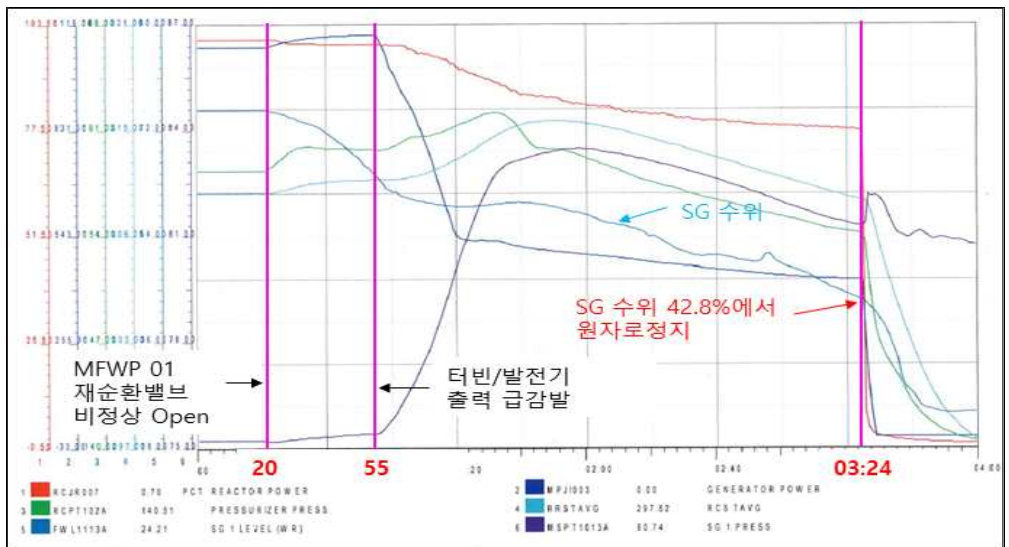
출력 650MW까지 급감발 시뮬레이션 결과가 그림2.22로 정상출력운전 중 2대의 주급수펌프 운전 중에 1대의 주급수펌프 재순환밸브가 100% 비정상 개방 시 운전원이 비정상을 인지하고 원인파악 시간을 고려하여 급수유량 감소로 증기발생기 수위 64%(WR)에서 운전원이 터빈/발전기 출력을 133%/min 감발율로 650MW까지 급감발하면 터빈출력 감발로 원자로출력은 터빈출력과의 편차 ( $T_{avg}-T_{ref}$ )에 의해 제어봉을 자동삽입하여 출력을 감발하며 1차 및 2차 출력 감소로 증기발생기의 급수요구량을 감소시키지만 출력감소에 의한 급수요구량 감소보다 터빈출력 급감발에 의한 증기발생기 압력 증가 및 수위 수축현상과 재순환밸브 비정상 개방에 의한 급수유량감소가 더 커서 출력감발을 시작하고 약 2분 22초 후에 증기발생기 저수위(WR 42.8%)로 원자로가 정지되었다.



[그림2.22 SG 수위 64%(WR)에서 출력 650MW까지 급감발 운전변수]

□ 터빈출력 400MW까지 급감발

터빈출력 400MW까지 급감발한 시뮬레이션 결과가 그림2.23으로 정상출력운전 중 2대의 주급수펌프 운전 중에 1대의 주급수펌프 재순환밸브가 100% 비정상 개방 시 운전원이 비정상을 인지하고 원인파악 시간을 고려하여 급수유량 감소로 증기발생기 수위 64%(WR)에서 운전원이 터빈/발전기 출력을 133%/min 감발율로 400MW까지 급감발 할 경우 650MW까지 급감발하는 것 보다 터빈출력을 더 낮춤으로서 증기발생기의 급수요구량은 더욱 감소하여 수위감소 시간을 지연시키지만 출력감소에 의한 급수요구량 감소보다 터빈출력 급감발에 의한 증기발생기 압력 증가 및 수위 수축현상과 재순환밸브 비정상개방에 의한 급수유량감소를 회복하지 못해 출력감발을 시작하고 약 2분 29초 후에 증기발생기 저수위(WR 42.8%)로 원자로가 정지되었다.



[그림2.23 SG 수위 64%(WR)에서 출력 400MW까지 급감발 운전변수]

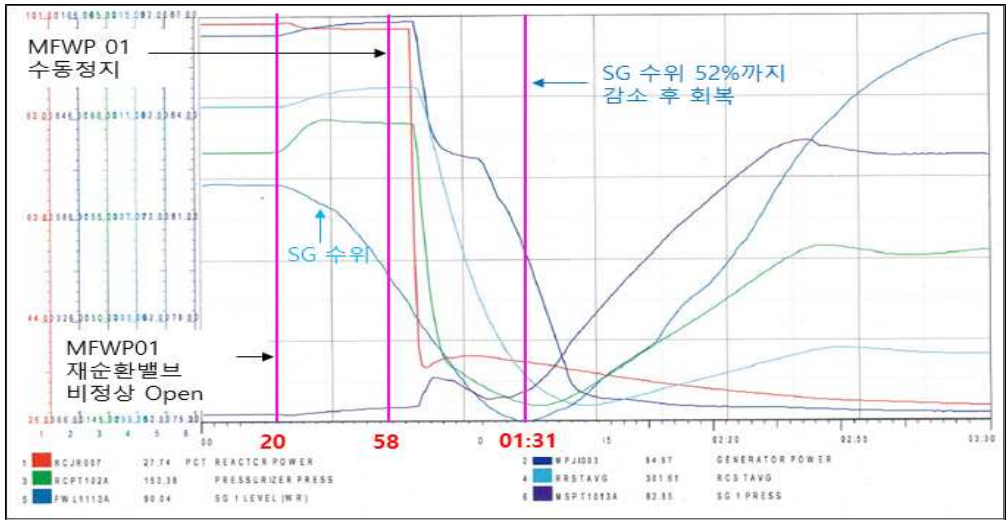
증기발생기 수위 64%(WR)에서 터빈출력을 650MW/400MW까지 급감발하는 시뮬레이션 결과 증기발생기 수위감소를 회복하지 못하고 저수위에 의해 원자로가 정지되었다.



(2) CASE B : 증기발생기 수위에 따른 주급수펌프 수동정지

□ 수위 64%(WR)에서 주급수펌프 수동정지

증기발생기 수위 64%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시뮬레이션 결과가 그림 2.24로 정상출력운전 중 1대의 주급수펌프 재순환밸브가 100% 비정상 개방 시 운전원이 비정상을 인지하고 원인파악 시간을 고려하여 급수유량이 감소하여 증기발생기 수위 64%(WR)에서 운전원이 해당 주급수펌프를 수동정지하면 주급수펌프 정지에 의한 원자로출력급감발계통(RPCS)이 동작되어 선택된 제어봉집합체 그룹이 1~2초이내에 삽입되어 1차출력을 급감발하고 RPCS 동작과 동시에 2차출력을 600%/min 감발율(Setback)로 60%까지 감발 이후 133%/min 감발율(Runback)로 1차출력과 균형을 맞추면서 2차출력을 감소하여 증기발생기 급수요구량을 급격하게 감소시켜 급수요구량이 비정상 개방에 의한 급수유량감소보다 더 커서 출력감발로 터빈제어밸브 닫힘에 의한 증기발생기 압력증가와 수위 수축현상에도 주급수펌프 수동정지 후 약 33초 경과 시점에서 증기발생기 수위가 52%(WR)까지 감소 후 회복되었다.

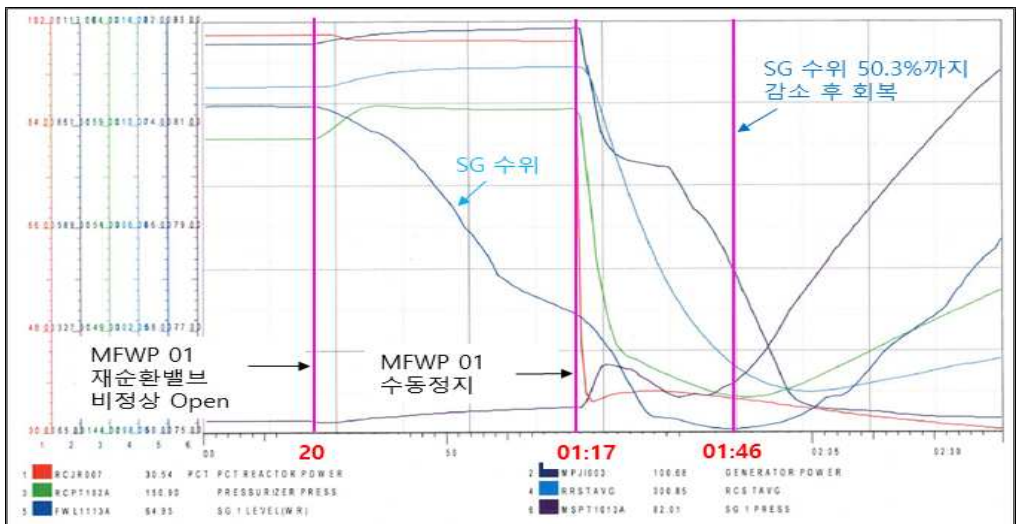


[그림 2.24 SG 수위 64%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시 운전변수]

증기발생기 수위 64%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시뮬레이션 결과 주급수펌프 정지 후 약 33초 만에 증기발생기 저수위 설정치보다 약 10% 정도 여유를 가지고 회복되었다.

□ 수위 60%(WR)에서 주급수펌프 수동정지

증기발생기 수위 60%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시뮬레이션 결과가 그림 2.25로 정상출력운전 중 1대의 주급수펌프 재순환밸브가 100% 비정상 개방 시 급수유량이 감소하여 증기발생기 수위 60%(WR)에서 운전원이 해당 주급수펌프를 수동정지하면 주급수펌프 정지에 의한 원자로출력급감발계통(RPCS)이 동작되어 선택된 제어봉집합체 그룹이 1~2초이내에 삽입되어 1차출력을 급감발하고 RPCS 동작과 동시에 2차출력을 600%/min 감발율(Setback)로 60%까지 감발 이후 133%/min 감발율(Runback)로 1차출력과 균형을 맞추면서 2차출력을 감소하여 증기발생기 급수요구량을 급격하게 감소시켜 급수요구량이 비정상 개방에 의한 급수유량감소보다 더 커서 출력감발로 터빈제어밸브 닫힘에 의한 증기발생기 압력증가와 수위 수축현상에도 주급수펌프 수동정지 후 약 29초 경과 시점에서 증기발생기 수위가 50.3%(WR)까지 감소 후 회복되었다.

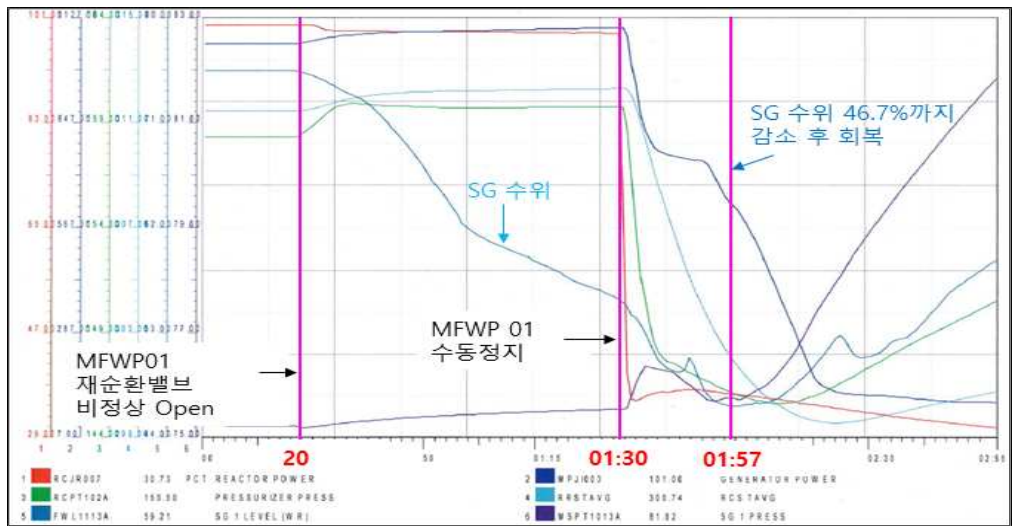


[그림 2.25 SG 수위 60%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시 운전변수]

증기발생기 수위 60%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시뮬레이션 결과 주급수펌프 정지 후 약 29초 만에 증기발생기 저수위 설정치보다 약 8% 정도 여유를 가지고 회복되었다.

□ 수위 56%(WR)에서 주급수펌프 수동정지

증기발생기 수위 56%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시뮬레이션 결과가 그림 2.26로 정상출력운전 중 1대의 주급수펌프 재순환밸브가 100% 비정상 개방 시 급수유량이 감소하여 증기발생기 수위 56%(WR)에서 운전원이 해당 주급수펌프를 수동정지하면 주급수펌프 정지에 의한 원자로출력급감발계통(RPCS)이 동작되어 선택된 제어봉집합체 그룹이 1~2초이내에 삽입되어 1차출력을 급감발하고 RPCS 동작과 동시에 2차출력을 600%/min 감발율(Setback)로 60%까지 감발 이후 133%/min 감발율(Runback)로 1차출력과 균형을 맞추면서 2차출력을 감소하여 증기발생기 급수요구량을 급격하게 감소시켜 급수요구량이 비정상 개방에 의한 급수유량감소보다 더 커서 출력감발로 터빈제어밸브 닫힘에 의한 증기발생기 압력증가와 수위 수축현상에도 주급수펌프 수동정지 후 약 27초 경과 시점에서 증기발생기 수위가 46.7%(WR)까지 감소 후 회복되었다.

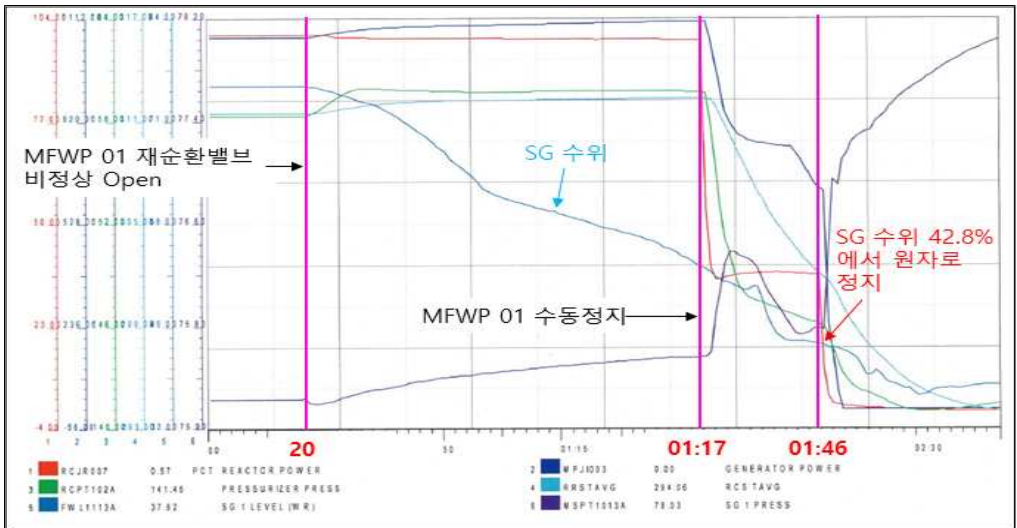


[그림 2.26 SG 수위 56%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시 운전변수]

증기발생기 수위 56%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시뮬레이션 결과 주급수펌프 정지 후 약 27초 만에 증기발생기 저수위 설정치보다 약 4% 정도 여유를 가지고 회복되었다.

□ 수위 53%(WR)에서 주급수펌프 수동정지

증기발생기 수위 53%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시뮬레이션 결과가 그림 2.27로 정상출력운전 중 1대의 주급수펌프 재순환밸브가 100% 비정상 개방 시 급수유량이 감소하여 증기발생기 수위 53%(WR)에서 운전원이 해당 주급수펌프를 수동정지하면 주급수펌프 정지에 의한 원자로출력급감발계통(RPCS)이 동작되어 선택된 제어봉집합체 그룹이 1~2초이내에 삽입되어 1차출력을 급감발하고 RPCS 동작과 동시에 2차출력을 600%/min 감발율(Setback)로 60%까지 감발 이후 133%/min 감발율(Runback)로 1차출력과 균형을 맞추면서 2차출력을 감소하여 증기발생기 급수요구량을 급격하게 감소시키지만 해당 주급수펌프 정지 시점의 증기발생기 수위가 원자로정지 설정치(42.8%, WR)와 10% 차이 밖에 나지 않아 출력감발로 터빈제어밸브 닫힘에 의한 증기발생기 압력증가와 수위 수축현상과 비정상개방에 의한 급수유량 감소를 회복하지 못하고 주급수펌프 정지 후 약 25초 경과 시점에서 증기발생기 수위 42.8%(WR)로 원자로가 정지되었다.



[그림2.27 SG 수위 53%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시 운전변수]

증기발생기 수위 53%(WR)에서 주급수펌프 수동정지 시뮬레이션 결과 증기발생기 수위감소를 회복하지 못하고 주급수펌프 정지 후 약 25초 만에 원자로가 정지되었다.

## 다. 시뮬레이션 결과 및 분석

### □ CASE A : 증기발생기 수위 64% (WR)에서 터빈출력 급감발 수행

CASE A의 경우 표2.6에 나온 결과처럼 터빈출력을 650/400MW까지 급감발을 수행해도 감발조치 수행 후 각각 2분 22초, 2분 29초 만에 증기발생기 수위감소를 회복하지 못하고 원자로가 정지되었다.

출력 감발량	결과
1045 → 650 MW	감발 2분 22초 경과 시점에서 원자로 트립 (SG 저수위)
1045 → 400 MW	감발 2분 29초 경과 시점에서 원자로 트립 (SG 저수위)

[ 표 2.6 터빈출력 급감발 CASE ]

### □ CASE B : 증기발생기 수위에 따라 주급수펌프 수동 정지(출력 100%)

CASE B의 경우는 표2.7의 결과처럼 운전원이 증기발생기 수위 64%/60%/56%(WR)에서 주급수펌프 수동정지를 통해 증기발생기 수위감소를 회복하고 원자로 정지를 방지하였고 수위 53%에서는 저수위 설정치와 10% 정도 차이에서 주급수펌프를 수동정지하여 급수유량 감소 및 수축현상을 극복하지 못하고 원자로가 정지되었다.

수위	결과
WR 64 %	정지 33초 경과 시점에서 수위 WR 52.0 % 까지 감소 후 복구
WR 60 %	정지 29초 경과 시점에서 수위 WR 50.3 % 까지 감소 후 복구
WR 56 %	정지 27초 경과 시점에서 수위 WR 46.7 % 까지 감소 후 복구
WR 53 %	정지 25초 경과 시점에서 원자로 트립 (SG 저수위 WR 42.8 %)

[ 표 2.7 주급수펌프 수동정지 CASE ]

터빈출력 급감발로 인한 증기발생기 압력증가 및 수축현상에 의한 증기발생기 수위 감소량은 한빛3발 시뮬레이터 검증 및 국내 운전경험을 바탕으로 9~12%로 예상되어 주급수펌프 수동정지 수행을 위한 증기발생기 수위 기준값 설정이 필요하고 주급수펌프 수동정지 지연에 의한 원자로정지를 방지할 수 있도록 저수위 설정치(WR 42.8%)에 여유도를 고려하여 증기발생기 수위 50.3%(WR)까지 감소 후 회복되는 CASE B의 수위 60%(WR)에서 주급수펌프를 수동정지하는 절차를 기존절차서의 현장운전원 조치보다 먼저 조치가 필요함을 알게되었고 절차서에 주급수펌프 수동정지 수위 기준값을 60%(WR)로 명시되어야 한다.

## 제 3 장 결론

발전소를 운전하면서 경험한 수많은 운전경험사례를 통해 과도상태에 대비한 운영절차서를 작성하고 수많은 이미지트레이닝을 통해 과도상태에 대비하지만 경험하지 않거나 생각지도 않은 과도상태가 발생이 되면 운영절차서에 따라 운전원이 조치를 하더라도 기술되지 않은 사항과 조치시간 지연에 따라 원자로정지와 같은 최악의 상황이 발생할 수도 있다. 원자로저출력(30% 이하) 에서 주급수펌프 1대 운전 중에 정지가 발생하면 시뮬레이터에서는 운전원이 주급수펌프가 정지될 것을 인지하고 있는 상태에서 정지가 발생하므로 신속한 조치를 하여 모든 시뮬레이터 조건에서 증기발생기 수위를 정지 설정치 도달 전에 안정화시켜 원자로가 정지되지 않았으나 발전소에서는 주급수펌프 정지를 의식하지 않은 상태에서 펌프 정지 시에 조치사항이 운영절차서에 기술되지 않은 발전소도 있고 조치사항이 반영된 절차서를 운영하는 발전소도 원인파악 및 운전원 조치사항이 조금만 지연되도 원자로 정지가 발생할 가능성이 크다는 것을 운전경험과 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

정상운전중 주급수펌프 재순환밸브가 비정상 개방에 대한 조치사항이 발전소별로 상이하고 현장조치 절차가 우선인 상태에서는 현장운전원 조치 중 증기발생기 저수위에 의한 원자로정지가 빈번하게 발생하는 경우를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이에 따라 원자로저출력 운전 중 주급수펌프 정지 및 정상운전 중 주급수펌프 재순환밸브 비정상 개방 절차서 조치사항의 도출된 개선사항에 대한 반영이 필요하다.

□ 원자로저출력(30% 이하) 에서 주급수펌프 정지에 대한 조치사항은 기존의 제어봉 수동삽입으로 인한 출력감발이 아닌 터빈수동정지 및 RPCS 수동동작을 우선 수행하고 기동용급수펌프를 기동하는 절차로 개선을 하고 모든 표준형원전 운영절차서에 저출력 운전 중 주급수펌프 정지 시 조치사항 내용을 기술하여 주급수펌프 정지로 인한 과도상태에서 적절한 운전원 조치로 증기발생기 저수위에 의한 원자로 정지를 방지하도록 하였다.

**원자로 저출력 운전 중 주급수펌프 정지 시 조치사항(종합-3003)**

○ 원자로 출력 30% 이하 시 조치(주급수펌프 1대 운전 중)

- ① 터빈 수동 정지 또는 터빈출력 급감소
- ② RPCS 수동 동작
- ③ 기동용 급수펌프 기동하여 S/G 수위 유지(출구밸브 Jog 운전)
- ④ 증기발생기 취출수 차단

□ 정상출력 운전 중 1대의 주급수펌프 재순환밸브 비정상 개방 시 현재 절차서 조치사항에 따라 현장 운전원 조치를 먼저 수행하고 조치 실패 시 출력급감발 또는 주급수펌프 정지를 통한 원자로출력급감발계통(RPCS) 동작으로는 재순환밸브 개방으로 인한 급수감소로 증기발생기 저수위에 의한 원자로 정지가 발생하는 시간(약 2분 7초)내에 조치가 불가능하고 시뮬레이션을 통해 증기발생기 수위가 60%(WR) 도달하면 운전원이 해당 주급수펌프를 즉시 수동정지하여 원자로 출력급감발계통(RPCS) 동작으로 제어봉 낙하 및 터빈 Setback/Runback을 통해 원자로 및 터빈출력을 주급수펌프 1대 정격유량(65%)이하로 급감소시켜 증기발생기 저수위 원자로 정지를 방지하는데 가장 적절한 방법임을 확인할 수 있었다. 이에 표준형절차서의 출력급감발 조치를 삭제하고 주급수펌프 수동정지를 통한 원자로출력급감발계통(RPCS) 동작을 위한 증기발생기 수위 기준값(WR 60%)을 명시하는 것이 필요하다는 것을 입증하였다.

- [MCR] 증기발생기 수위 60%(WR) 도달 확인 → 주급수펌프 수동 정지 → RPCS 동작 확인 → [MCR] 재순환밸브 격리 시도(제어기 이용) → [현장] 재순환밸브 격리 시도(M/A Station 이용) → [현장] 재순환밸브 전/후단 수동밸브 격리

위의 2가지 사례에 대해 시뮬레이션을 통해 도출된 운전원 조치 개선방안을 표준형발전소의 운영절차서에 적용함으로써 운전원이 긴급조치사항 수행에 따른 인적실수 방지 및 과도상태 조치에 대한 부담감을 낮추고 시뮬레이션 모의시험을 통해 운전원의 긴급조치 대응능력을 향상, Image Training 등 교육자료 활용을 통해 증기발생기 저수위에 의한 원자로정지를 방지함으로써 발전소 안전운전에 기여하여 원자력에 대한 국민의 신뢰를 회복하는데 도움이 될 것이다.

## 참고문헌

- [1] 주급수펌프 매뉴얼, 한빛2, 3발, 한울2, 3발전소
- [2] 주급수제어계통 설명서 및 논리도, 한빛2, 3발전소, 한울2, 3발전소
- [3] 원자로출력급감발계통 매뉴얼, 한빛3발전소, 한울2, 3발전소
- [4] 종합운전절차서, 한빛2, 3발전소, 한울2, 3발전소, 신월성1발전소, 신고리1발전소
- [5] 비정상절차서, 한빛2, 3발전소, 한울2, 3발전소, 신월성1발전소, 신고리1발전소
- [6] 원자로저출력 운전 중 주급수펌프 정지에 의한 원자로정지 보고서, 신월성2호기 (2019)
- [7] 원자로출력 30%이하 주급수펌프 정지 시 대처방안 개선, 한빛3발전소(2019)
- [8] 주급수펌프 재순환밸브 비정상 열림 시 긴급조치사항 타당성검토, 한빛3발전소 (2020)
- [9] 주급수펌프 재순환밸브 비정상 열림 시 원자로정지시간 및 주급수펌프 정지 기준값 검토, KONIS 기술지원, 관리번호 2020-1-0729(2020)



## 부록1. 시뮬레이션 검증

원자로출력 100% 운전 중 운전원 조치가 없을 경우, 주급수펌프 재순환밸브 개방 후 약 2분 7초 후에 증기발생기 저수위 (WR 42.8%)에 도달하여 원자로 정지발생

□ 계통코드 분석

□ 사용코드

- RELAP5 : 미국 NRC 개발 원전 안전해석 코드(버전 : RELAP5 MODE 3.3 patch 5)

□ 정상상태 입력

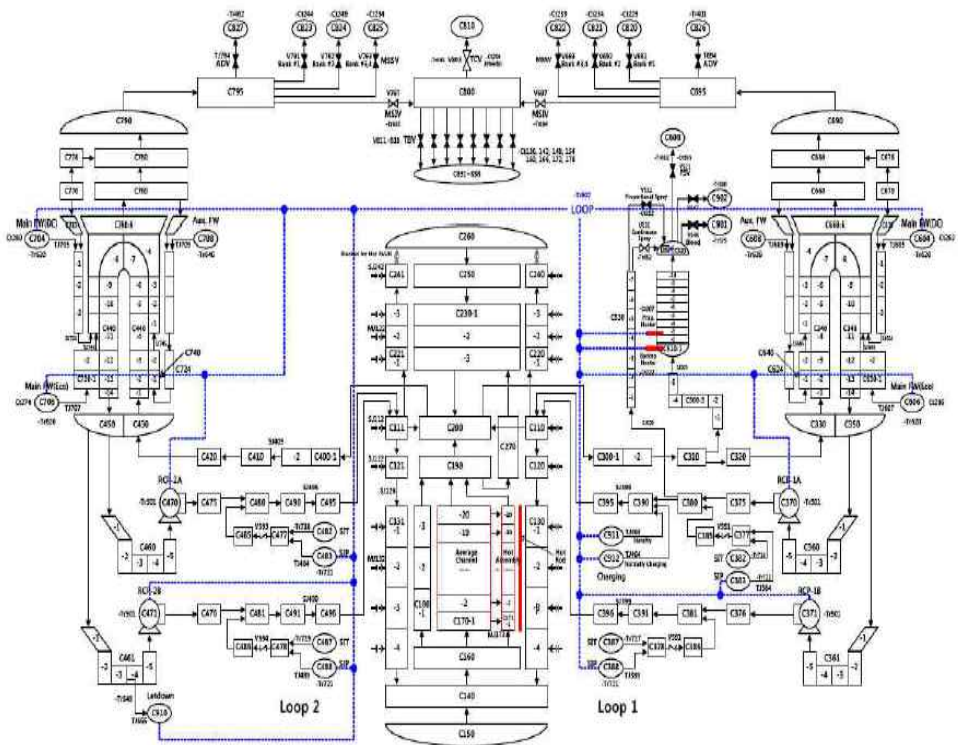
- 한빛3발 스트레스 테스트 성능평가용 입력문(제어계통 모델 포함) 사용

- 100% 출력 운전, 증기발생기 수위 : 정상수위(WR 79%, NR 44%, FSAR 기준)

□ 경계조건 입력

- CASE I : 주급수유량 100 → 50%로 감소

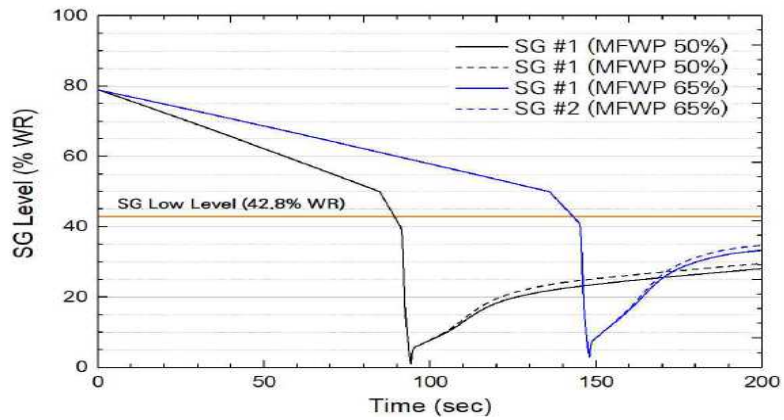
- CASE II : 주급수유량 100 → 65%로 감소



[그림1.1 한빛3발 스트레스 테스트 성능평가용 Relap5 Nodalization]

□ 원자로정지시간 평가결과

- CASE I : 주급수유량 100 → 50%로 감소 : 1분 30초
- CASE II : 주급수유량 100 → 65%로 감소 : 2분 24초
- 주급수펌프 재순환밸브 완전개방 시 정상출력 운전 중 50% 급수유량을 담당하는 반대편의 주급수펌프 유량은 빠르게 정격유량인 65%로 증가하므로 약 2분 내외에서 증기발생기 저수위로 인한 원자로정지가 발생할 것으로 예상됨



[그림 1.2 한빛3발 주급수유량 상실에 따른 증기발생기 수위 변화]