



KR0100878

KAERI/TR-1798/2001

SMART 성능해석 방법론

SMART Performance Analysis Methodology

한국원자력연구소

32 / 43

**PLEASE BE AWARE THAT
ALL OF THE MISSING PAGES IN THIS DOCUMENT
WERE ORIGINALLY BLANK**

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2000 년도 “일체형원자로 설계 기술개발” 과제중 “일체형원자로 안전해석 기술개발” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

2001. 4. 3.

주저자 : 임홍식
공저자 : 김희철
이두정

요 약 문

SMART 핵중기공급계통 설계를 위한 성능 및 안전성을 검증하기 위해서 안전 및 성능 분석이 수행된다. 이중 성능 분석은 발전소 수명동안 요구되거나 목표로 하는 성능을 보장하기 위한 수단으로 설계 요건 및 기준에 의해 선정된 성능관련 설계기준사건들에 대해 정해진 분석 방법론에 따라 수행된다. 성능관련 설계기준사건은 발전소 설계시 반영되어야 하는 핵중기공급계통 과도 사건을 말하며, 성능관련 설계기준사건의 발생 결과가 발전소 기기의 정상운전 영향보다 더 큰 영향을 미쳐서는 안된다. 즉 설계기준사건의 발생 결과로 인하여 별도로 기기를 교체하거나, 검사 및 시험할 필요가 없어야 한다.

성능해석 방법론은 성능관련 설계기준사건을 분석하기 위한 방법 및 절차를 체계화하는 것으로 다음과 같이 정리할 수 있다. 핵중기공급계통 특성에 맞는 운전 모드에 근거하여 성능관련 설계기준사건 및 이 사건들에서 공정 변수의 허용범위를 도출한다. 각 운전 모드의 특성에 적절한 제어 논리를 개발한 다음, 계통의 열수력 거동을 분석할 수 있는 전산코드를 이용하여 선정된 성능관련 설계기준사건들에 대해 계통 분석을 수행한다. 이 과정에서 제어 논리의 적합성 그리고 성능관련 설계기준사건의 선정 타당성등이 조사된다. 부적절하게 선정된 성능관련 설계기준사건이 제거되거나 새로이 도출된 성능관련 설계기준사건이 추가될 수 있으며, 제어논리도 개선되거나 변경될 수 있다. 특히 SMART의 경우 기존 상용로와는 다른 계통 특성으로 인해 SMART에 맞는 운전 모드, 성능관련 설계기준사건, 제어 논리 그리고 분석 코드 체계를 갖추어야 한다.

본 보고서는 각 운전모드 혹은 운전모드간의 천이 등으로부터 도출된 성능관련 설계기준사건의 목록 및 이 사건들에서 만족되어야 할 허용기준을 체계화하였다. 또한 각 운전모드에서의 제어논리 개념 및 각 성능관련 설계기준사건들에 대해 상세한 분석 방법 및 절차도 제시하고 있다. 따라서 본 보고서는 현재까지 진행된 SMART 설계를 바탕으로 SMART 성능분석을 위한 전반적인 체계를 정립한 것으로, 상세 성능분석을 위한 지침서로서 활용될 것이다.

SUMMARY

To achieve the safety and performance requirements for the SMART NSSS design, the safety and performance analyses are performed. The performance analysis is done by means of the specified analysis methodologies for the performance related design basis events (PRDBE), which are selected based on the design requirements and criteria, to ensure the required and desired operation over the plant lifetime. The PRDBE is an occurrence (event) that shall be accommodated in the design of the plant and whose consequence would be no more severe than normal service effects of the plant equipment. That is, no additional equipment replacement, inspection, or testing is required because of the occurrence of the PRDBE.

The performance analysis methodology which systematizes the methods and procedures to analyze the PRDBEs is as follows. Based on the operation mode suitable to the characteristics of the SMART NSSS, the corresponding PRDBEs and allowable range of process parameters for these events are deduced. With the developed control logic for each operation mode, the system thermalhydraulics are analyzed for the chosen PRDBEs using the system analysis code. During this process, the control logics are tested for fitness and whether the PRDBEs are correctly chosen is examined. The improperly chosen PRDBEs can be removed and additional PRDBE can be included, and also the control logic can be improved or changed for better performance. Particularly, because of different system characteristics of SMART from the existing commercial nuclear power plants, the operation mode, PRDBEs, control logic, and analysis code should be consistent with the SMART design.

This report presents the categories of the PRDBEs chosen based on each operation mode and the transition among these and the acceptance criteria for each PRDBE. It also includes the analysis methods and procedures for each PRDBE and the concept of the control logic for each operation mode. Therefore this report in which the overall details for SMART performance analysis are specified based on the current SMART design, would be utilized as a guide for the detailed performance analysis.

목 차

제출문	1
국문요약	3
영문요약	4
국문목차	5
영문목차	7
표목차	9
그림목차	10
제 1 장 서 론	11
제 2 장 성능관련 설계기준	13
제 1 절 정의 및 목적	13
제 2 절 성능관련 설계기준사건의 일반 분류	13
제 3 절 성능관련 설계기준사건의 일반 허용기준	15
제 3 장 SMART 운전 모드	17
제 1 절 정상 출력 운전	17
제 2 절 비정상 출력 운전	18
1. 증기발생기 1구역 차단 운전	18
2. 주냉각재펌프 1대 정지 운전	18
제 3 절 기동 운전	19
1. 핵적 기동 운전	19
2. 원자로 가열 운전	19
3. 원자로 기동 운전	20
제 4 절 저온 정지 운전	20
제 5 절 고온 정지 운전	21
제 6 절 재장전 운전	21
제 4 장 SMART 제어 논리	23
제 1 절 핵적 기동 운전 제어 논리	23
제 2 절 원자로 가열 운전 제어 논리	23
제 3 절 원자로 기동 운전 제어 논리	24
제 4 절 출력 운전 제어 논리	25
제 5 절 원자로 트립시 제어 논리	25

제 6 절	주급수 유량 제어 논리	26
제 7 절	주증기 압력 및 증기 우회 제어 논리	26
제 5 장	성능관련 설계기준사건의 세부 분류 및 허용기준	29
제 1 절	성능관련 설계기준사건의 분류	29
제 2 절	성능관련 설계기준사건의 허용기준	31
제 6 장	성능 분석 코드 및 해석 방법론	33
제 1 절	성능분석용 전산 코드	33
제 2 절	SMART TASS/SMR 모델	34
제 3 절	성능 해석 방법론	35
	1. 출력 운전	36
	2. 증기발생기 1구역 차단 운전	36
	3. 주냉각재펌프 1대 정지 운전	37
	4. 원자로 기동 운전	38
	5. 원자로 가열 운전	38
	6. 핵적 기동 운전	39
	7. 고온 정지 운전	39
	8. 저온 정지 운전	39
	9. 재장전 운전	39
	10. 출력운전에서 기동운전 혹은 기동운전에서 출력운전으로 전환	40
	11. 기동 운전에서 고온정지 운전으로 전환	40
	12. 고온정지 운전에서 저온정지 운전으로 전환	40
	13. 저온정지 운전에서 재장전 운전으로 전환	40
	14. 기타 자연순환 출력운전	40
제 7 장	결 론	43
제 8 장	참고 문헌	44

CONTENTS

Presentation	1
Summary (in Korean)	3
Summary (in English)	4
Contents (in Korean)	5
Contents (in English)	7
List of Tables	9
List of Figures	10
Chapter 1. Introduction	11
Chapter 2. Design Bases for Performance	13
Section 1. Definition and Purpose	13
Section 2. General Category for PRDBE	13
Section 3. General Criteria for PRDBE	15
Chapter 3. SMART Operation Mode	17
Section 1. Normal Power Operation Mode	17
Section 2. Abnormal Power Operation Mode	18
1. One Steam Generator Section Isolation Mode	18
2. One Main Circulation Pump Stop Mode	18
Section 3. Startup Mode	19
1. Nuclear Startup Mode	19
2. Reactor Heatup Mode	19
3. Reactor Startup Mode	20
Section 4. Cold Shutdown Mode	20
Section 5. Hot Shutdown Mode	21
Section 6. Refueling Mode	21
Chapter 4. SMART Control Logic	23
Section 1. Nuclear Startup Logic	23
Section 2. Reactor Heatup Logic	23
Section 3. Reactor Startup Logic	24
Section 4. Power Operation Logic	25
Section 5. Control Logic at Reactor Trip	25

Section 6. Main Feedwater Flow Control Logic	26
Section 7. Main Steam Pressure and Steam Bypass Control Logic	26
Chapter 5. PRDBE Classification and Acceptance Criteria	29
Section 1. PRDBE Classification	29
Section 2. PRDBE Acceptance Criteria	31
Chapter 6. Computer Code and Analysis Methodology	33
Section 1. System Analysis Computer Code	33
Section 2. SMART TASS/SMR Model	34
Section 3. Performance Analysis Methodology	35
1. Normal Power Operation	36
2. One Steam Generator Section Isolation	36
3. One Main Circulation Pump Stop	37
4. Reactor Startup	38
5. Reactor Heatup	38
6. Nuclear Startup	39
7. Hot Shutdown	39
8. Cold Shutdown	39
9. Refueling	39
10. Transition between Startup Mode and Power Operation Mode	40
11. Transition from Startup Mode to Hot Shutdown Mode	40
12. Transition from Hot Shutdown to Cold Shutdown Mode	40
13. Transition from Cold Shutdown to Refueling Mode	40
14. Natural Circulation	40
Chapter 7. Conclusions	43
Chapter 8. References	44

표 목 차

표 1. 경보 신호와 원자로트립 신호 및 신호 설정치	45
표 2. 성능관련 설계기준사건의 세부 허용 기준	46

그림 목 차

그림 1.	핵적 기동운전 제어논리도	49
그림 2.	원자로 가열운전 제어논리도	50
그림 3.	핵중기공급계통 열평형도 및 제어 변수	51
그림 4.	출력-기준 냉각재 온도 프로그램	52
그림 5.	기동 및 출력운전 제어논리도	53
그림 6.	주급수 유량 제어논리도	54
그림 7.	주중기 압력 및 증기 우회 제어 논리	55
그림 8.	SMART 성능분석용 TASS/SMR 모델	56

제 1 장 서론

SMART 핵증기공급계통 설계를 위한 성능 및 안전성을 검증하기 위해서 안전 및 성능 분석이 수행된다. 이중 성능 분석은 발전소 수명동안 요구되거나 목표로 하는 성능을 보장하기 위한 수단으로 모든 설계 과정에 걸쳐 수행되는 일련의 업무로 정의된다. 이러한 분석을 통해 보조계통이나 부품 설계자에게 설계 요구사항을 제시하고 제어계통 설계를 통해 제어 논리 개발을 수행하며 제어 및 보호계통 작동 설정치를 제공한다. 이러한 일련의 분석 업무는 성능해석 방법론에서 제시하는 체계화된 방법 및 절차를 따라 수행하며 다음과 같이 정리할 수 있다. 우선 핵증기공급계통 특성에 맞는 운전 모드에 근거하여 성능관련 설계기준사건 및 이 사건들에서 공정 변수의 허용범위를 제한하는 허용기준을 도출한다. 다음으로 각 운전 모드의 특성에 적절한 제어 논리를 개발한 다음, 계통의 열수력 거동을 분석할 수 있는 전산코드를 이용하여 선정된 성능관련 설계기준사건들에 대해 해석방법론에 따라 분석을 수행한다. 이 과정에서 제어 논리의 검증 및 개선 그리고 성능관련 설계기준사건의 선정 적합성 등이 도출된다. 필요시 부적절하게 선정된 성능관련 설계기준사건이 제거되거나 새로이 도출된 성능관련 설계기준사건이 추가될 수 있으며, 제어논리도 개선되거나 변경될 수 있다. 이러한 일련의 과정은 계통 설계와 밀접하게 관련되어 SMART 핵증기공급계통이 요구된 성능을 확보할 수 있도록 지속적으로 수행된다.

특히 SMART의 경우 일체형원자로로 비응축개스에 의한 자기 조절형 가압기를 채택하고 큰 음의 온도 반응도 궤환을 가지는 무붕산 노심으로 기존 상용로와는 다른 계통 특성을 가진다. 또한 거대한 증기발생기를 사용하는 기존 상용로와는 전혀 다르게 이차계통을 구성하고 있다. 이로 인해 SMART에 대한 성능해석 체계가 새롭게 정립되어야 함은 필수 불가결하다. 따라서 SMART 특성에 맞는 운전 모드, 성능관련 설계기준사건, 제어 논리 그리고 분석 코드 체계를 갖추어야 할 것이고, 이를 본 보고서에서 종합적으로 다루고자 한다.

SMART 성능해석 방법론 보고서는 위에서 언급한 내용을 체계적으로 검토 및 정립하여 SMART 성능분석을 위한 지침서가 되도록 작성된다. 제 2장에서는 핵증기공급계통 설계시 궁극적으로 달성하고자 하는 목표와 성능관련 설계요건 및 기준을 제시한다. 운전 모드의 목록 및 이에 근거한 성능관련 설계기준사건의 일반 분류 및 일반 허용기준을 제시하여 전반적인 성능분석의 범위를 파악하

도록 한다. 제 3장에서는 정상 및 비정상 운전모드를 포함하는 9가지 운전 모드에 대한 운전 특성 및 각 운전 모드에서 행해지는 조치 및 거동을 기술한다. 제 4장은 각 운전 모드에서 혹은 운전 모드간의 천이시 사용하는 제어 논리의 개념과 그 특성을 기술한다. 제 5장은 성능관련 설계기준사건의 상세 분류 및 상세 허용기준을 제시하여 성능분석시 고려해야 하거나 점검해야 할 사항을 제시한다. 제 6장은 계통 열수력 분석코드에 대한 기술과 SMART 계통 모델에 대한 설명 그리고 성능관련 설계기준사건의 각각에 대한 분석 내용 및 분석 범위등에 대한 세부 내용을 기술한다.

제 2 장 성능관련 설계기준

SMART 핵증기공급계통 설계를 위한 성능 및 안전 특성을 수립하는데 필요한 설계 요건 및 기준은 참고문헌 1에 제시되어 있다. 참고문헌 1의 내용은 SMART 성능해석 방법론의 체계를 수립하는데 토대가 된다.

제 1 절 정의 및 목적

성능관련 설계기준사건은 발전소 설계시 반영되어야 하는 핵증기공급계통 과도 사건을 말하며, 성능관련 설계기준사건의 발생 결과가 발전소 기기의 정상운전 영향보다 더 큰 영향을 미쳐서는 안된다. 기기의 정상운전 영향은 설계기준사건의 발생 결과로 인하여 별도로 기기를 교체하거나, 검사 및 시험할 필요가 없어야 하는 것을 의미한다. 계획된 성능관련 설계기준사건으로는 발전소 기동 및 가열, 정상적인 정지, 재장전 운전 등이 포함된다. 계획되지 않은 성능관련 설계기준사건으로는 주급수펌프 한 대의 상실이나 터빈 부하 상실 등이 포함된다.

성능관련 설계기준사건의 세부 목록은 핵증기공급계통 설계의 시작점으로써 제 5장에서 기술된다. 어느 특정의 실제 사건이 제 5장의 목록에 포함되어 있지 않았거나 혹은 목록에 포함되지 않은 사건이 성능관련 설계기준사건의 목록에서 예상된 결과치를 벗어나거나 예상되지 않은 방향으로 진행되는 경우에, 이 실제 사건은 추가적으로 성능관련 설계기준사건 목록에 포함될 수 있다. 반면 성능관련 설계기준사건으로 분류된 사건이라도 실제 발생할 가능성이 없는 경우에는 성능관련 설계기준사건 목록에서 제외될 수 있다.

이와 같은 성능관련 설계기준사건의 분류는 기기 운전을 위한 핵증기공급계통 공정변수(즉, 압력, 온도, 유량 등)의 정상운전 범위를 결정하는데 사용될 수 있으며, 또한 핵증기공급계통의 성능 요구 사항을 정의하는 데에도 사용될 수 있다.

제 2 절 성능관련 설계기준사건의 일반 분류

성능관련 설계기준사건은 일반적으로 설계기준사건이 발생하는 운전 모

드에 관련되는 분류에 따라 나뉜다. 그 외에 추가로 필요한 분류는 이들 운전 모드간의 천이 운전중 발생하는 사건에 대하여 다시 세분된다. SMART의 성능관련 설계기준사건을 정의하기 위한 목적으로 사용되는 일반 운전 모드는 다음과 같다.

- 정상 출력 운전(normal power operation)
- 비정상 출력 운전 (abnormal power operation)
 - ① 증기발생기 1구역 차단 운전
 - ② 주냉각재펌프 1대 정지 운전
- 기동 운전 (startup)
 - ① 핵적 기동(nuclear startup) 운전
 - ② 원자로 가열(reactor heatup) 운전
 - ③ 원자로 기동(reactor startup) 운전
- 고온 정지(hot shutdown) 운전
- 저온 정지(cold shutdown) 운전
- 재장전(refueling) 운전

상기 운전 모드 및 운전 제어논리에 대한 상세한 설명은 제 3장과 제 4장에서 기술된다. 상기 일반 운전 모드에 따라 성능관련 설계기준사건을 분류하면 일반적으로 다음과 같다.

- 20%와 100% 사이에서의 출력 증감발 운전($\pm 5\%$ /분)
- 터빈 출력 $\pm 20\%$ 급감발
- 원자로 정지를 수반하지 않는 임의의 출력운전중 핵증기공급계통에 대한 즉각적인 최대 100%의 부하 상실
- 원자로 정지를 수반하지 않는 주급수펌프 1대 고장
- 원자로 정지를 수반하지 않는 주냉각재펌프 1대 고장
- $100^{\circ}\text{C}/\text{시간}$ 의 변화로 일차계통의 온도 변화
- $K_{\text{eff}} < 0.95$ 인 조건에서 미임계에서 임계 상태에 도달
- 20% 출력 상태에서 $K_{\text{eff}} < 0.95$ 인 미임계 상태에 도달
- 기동 및 출력 운전중 원자로 정지

출력 운전중 모든 핵증기공급계통의 유체 계통, 제어 계통 및 기기는 자동 운전 형태(기술사양서에서 특별히 제한하지 않는 한 최대 용량)에 있는 것으로 가정한다.

제 3 절 성능관련 설계기준사건의 일반 허용기준

성능관련 설계기준사건은 다음 사항을 위반하지 않아야 한다.

- 임의의 핵증기공급계통 기기나 계통의 정상운전영향(Normal Service Effects) 초과
- 기술사양서(Technical Specifications)에 기술된 운전제한조건(Limiting Condition for Operation, LCO)이나 다른 발전소 운전제한 위반
- 원자로보호계통(Reactor Protection System, RPS)의 작동
- 공학적안전설비 작동계통(Engineered Safety Features Actuation System, ESFAS)의 작동
- 가압기 안전밸브의 개방

제 3 장 SMART 운전모드

SMART는 일체형원자로 고유의 특성으로 인해 분리형 상용 원자로와는 상당히 다르다. 일체형원자로 구조상 원자로 압력용기 내에 장착되는 주냉각재펌프에서 발생하는 열이 매우 적다. 따라서 펌프 열을 이용하여 일차계통 냉각재를 가열한 후 임계상태로의 전환을 하는 상용로와 달리, SMART에서는 핵적기동에 의해 임계상태에 먼저 도달한 후 핵적 노심열을 이용하여 일차계통 냉각재를 가열하는 방식을 채택한다. 또한 기동 운전과 출력 운전에서는 SMART 고유의 특성인 큰 음의 감속재온도 반응도의 효과를 이용한다. 즉 이차계통 주급수 유량을 제어함으로써 노심 출력이 이를 추종하는 방식이다. 이와 같이 기존 상용로와 상이한 특성은 매우 다른 형태의 운전 모드와 이를 위한 제어 논리를 가지게끔 한다. 따라서 본 장에서는 제 5장의 세부 성능관련 설계기준사건과 세부 허용기준을 추출하기 위한 운전 모드에 대해 요약 및 기술한다. 보다 상세한 내용은 참고문헌 2의 SMART 핵중기공급계통 설명서에 기술되어 있다.

제 1 절 정상 출력 운전

원자로 출력이 20%에서 100%까지 변화되고 모든 핵중기공급계통의 공정변수가 정상적으로 운전되고 있는 상태(20% 출력에서의 자연순환운전을 포함)를 의미하며, 모든 상태가 자동으로 조정된다. 운전원이 원하는 출력을 제어실에서 입력시키면, 이미 정해진 출력-기준 냉각재 온도 프로그램에 따라서 발전소 제어계통에 의하여 자동으로 주급수 유량이 정격 출력의 5%/분의 속도로 바뀌면서 원자로 출력은 주급수 유량의 변화에 자동으로 따라가게 된다. 즉, 원자로심 출력이 주급수 유량의 변화에 피동적으로 바뀌게 되며, 일차계통의 공정변수의 변화율에 따라 자기 반응도(무봉산 노심이 가지는 큰 음의 감속재온도 반응도 귀환 효과) 변화에 의한 출력의 증감 또는 제어봉 이동에 의한 출력의 증감이 이루어지게 된다.

출력 운전중 주증기압을 항상 일정하게 유지하기 위해 주증기의 일부(2~3%)는 항상 터빈우회계통에 설치되어 있는 가습조절기를 통해 복수기로 방출된다. 특히 터빈우회계통이 터빈발전기의 제어계통과 긴밀하게 연관되어 갑작스런 무부하 운전을 포함하여 일체의 출력 변동에 능동적으로 대처한다.

제 2 절 비정상 출력 운전

SMART에서는 정상 출력운전중 주냉각재펌프 1대가 정지되거나 이차계통 배관에서 냉각수 누설이 발생할 경우, 출력을 감소시킨 상태에서 출력운전을 지속하는 운전모드를 보유하고 있다. 이를 비정상 운전모드라 하며 이러한 운전모드에서 필연적인 유량 혹은 온도 비대칭이 노심운전에 미치는 영향(즉 성능 저하)은 출력준위를 감소시킴으로써 보상된다. 비정상운전으로의 천이 과정은 자동(주냉각재펌프 1대 정지운전) 혹은 수동(증기발생기 1구역 차단운전)으로 이루어 진다.

1. 증기발생기 1구역 차단 운전

정상 출력 운전중 증기관이나 급수관 그리고 증기발생기 튜브에서 냉각수 누설이 발생할 경우, 누설이 발생한 섹션을 차단시킨 상태에서 출력운전을 지속하게 된다. 이때 노심 입구 온도 증가로 인해 핵비등이탈(DNB) 여유도가 저해되므로 출력운전 범위는 20%에서 50%사이로 제한된다. 100% 전출력 운전중 운전원이 상기 배관들에서의 누설을 탐지하게 되면, 운전원이 발생한 출력감발신호에 의해 주급수 유량은 100%에서 50%로 급속히 감소한다. 그후 공정 변수가 안정화된 시점에서 증기 및 급수 섹션차단밸브들을 작동시켜 증기발생기 1구역을 차단시킨다. 그 후 공정 변수가 안정화됨에 따라 20%에서 50%사이의 출력 운전이 가능하며, 출력 변동은 최대 5%/분의 속도로 이루어 진다.

2. 주냉각재펌프 1대 정지 운전

정상 출력 운전중 주냉각재펌프 1대가 고장나 정지되는 경우, 정상 작동 중인 나머지 3대의 주냉각재펌프만으로 출력운전을 지속하게 된다. 이때 노심 유량 감소로 인해 핵비등이탈(DNB) 여유도가 저해되므로 출력운전 범위는 20%에서 50%사이로 제한된다. 100% 전출력 운전중 4대의 주냉각재펌프중 어느 1대에서의 펌프 속도가 정격 속도의 80%에 도달하면 발생하는 출력감발신호에 의해 주급수 유량은 100%에서 50%로 급속히 감소한다. 그후 공정 변수가 안정화됨에 따라 20%에서 50%사이의 출력 운전이 가능하며, 출력 변동은 최대 5%/분의 속도

로 이루어 진다.

제 3 절 기동 운전

터빈발전기나 담수화 계통에 요구된 최소 증기가 공급되도록 핵증기공급 계통을 준비하는 과정을 기동 운전모드라 하며, SMART에서는 세가지 기동운전 모드로 세분된다. 노심을 임계상태에 도달시키는 핵적기동 운전모드와 노심열을 이용하여 일차 냉각재를 가열 및 가압하는 원자로가열 운전모드와 노심출력을 20%로 증가시키는 동시에 이 출력에서 이차계통의 급수 및 증기 그리고 복수 계통이 열평형을 이루도록 준비하는 원자로기동 운전모드이다.

1. 핵적 기동 운전

핵적기동 운전은 원자로 기동의 시작점으로 다음의 사항이 준비되어야 한다:

- 이차계통은 정격 유량의 5%에 해당하는 저온의 급수를 제공한다. 이를 위해 복수 펌프와 기동 급수 펌프가 작동되어 증기발생기에 냉각수를 공급한다. 증기발생기 출구로부터의 이차 냉각수는 기동냉각기(SCD)를 거쳐 복수기로 방출됨으로써 이차계통 냉각수의 순환회로를 형성한다.
- 노심은 초기에 모든 제어봉이 삽입된 미임계 상태로 핵적기동 운전 전에 제어봉이 일정 높이까지 인출된다.
- 일차계통에서는 주냉각재펌프가 저속 모드로 운전되어 일차계통내 냉각재 순환유로를 형성한다.
- 일차계통 냉각재의 압력은 기설정된 초기 상태로 가압된다.

이상의 조건이 만족되면 핵적기동 운전을 개시할 수 있으며 요구된 최종 상태에 도달할 때까지 자동으로 이루어진다. 핵적기동 운전의 목적은 미임계 상태의 노심을 임계상태로 만드는 것으로 제어 논리에 따라 제어봉을 자동 인출하게 된다. 약 0.1% 출력 준위에 접근하면 제어봉이 자동으로 멈추면서 핵적기동 운전은 종료된다.

2. 원자로 가열 운전

핵적기동 운전 완료시 원자로가열 운전이 개시되며 이미 설정된 기준 출력 프로그램을 추종하도록 제어봉이 조절된다. 이차계통 급수는 5% 정격 유량을 지속적으로 제공하며 가열 운전 중반 정도부터 증기를 생산해 준다. 증기의 조건(압력과 온도)이 요구된 값(1.6 MPa)에 도달하면 기동냉각기를 닫고 가슴조절기(THD)를 개방함으로써 이차계통 증기압은 설정된 값으로 자동 조절된다.

일차계통은 제어봉 인출로 인한 출력 증가로 냉각재가 가열 및 팽창되어 비응축개스가 차지하는 체적을 줄이게 된다. 따라서 냉각재 온도 증가와 아울러 가압기 압력이 상승한다. 정상 가열을 40°C/시간(최대 100°C/시간)로 가열 운전 모드가 진행되어 일차측 증기발생기 입구의 냉각재 온도가 295°C 이상 그리고 가압기 압력이 15 MPa에 도달한 상태에서 종료된다. 이때 원자로 출력이 5%로 이차계통과 열평형을 이루게 되면, 기동급수펌프를 정지하고 주급수펌프를 기동하여 자동 주급수 유량 제어모드로 전환한다.

3. 원자로 기동 운전

원자로 출력을 5%에서 20%까지 변화시키는 모드로 주급수 유량은 5%/분로 변화한다. 이 운전모드에서 행해지는 조치는 대개 터빈발전기나 담수화 계통을 위해 고온의 증기를 공급하기 위한 이차계통의 준비 과정으로 다음과 같은 조치가 취해진다:

- 5% 출력에서 주증기 공통헤더의 주증기 압력 설정치를 1.6MPa에서 3.3MPa로 증가시킨다.
- 주증기 압력이 3.3MPa이 되면, 주급수 유량을 5%/분으로 5%에서 20%로 서서히 증가시킨다.
- 주급수 유량이 20%가 되고 주증기 압력이 3.3MPa로 유지되면, 복수기 진공의 형성을 확인한 후 터빈발전기를 기동시킨다.
- 20% 출력에서 일·이차계통 열평형이 이루어지면 주냉각재펌프를 저속 모드에서 고속 모드로 전환한다.

제 4 절 저온 정지 운전

일차계통 냉각재 온도가 150°C이하에서 원자로가 정지해 있는 상태를 말하며, 이러한 상태는 주급수 유량을 이용하는 정상 냉각 운전에 의해 달성되거나 피동잔열제거계통이 사용되는 경우에는 피동잔열제거계통 냉각펌프를 기동함으로써 달성된다. 저온 정지상태로부터 기동운전은 제 3절의 방식과 같다.

제 5 절 고온 정지 운전

일차계통 냉각재 온도가 150°C이상에서 원자로가 정지해 있는 상태를 말하며, 고온 정지상태로부터 기동운전을 하는 과정은 원칙적으로 저온 정지상태로부터 기동운전을 하는 방식과 동일하다. 단지 소요되는 기동 시간만 다르다. 단 고온 정지상태가 원자로 비상정지등과 같은 비상 운전(피동잔열제거계통 사용시)에 의하여 유지되는 경우에는 비상 정지된 원인을 제거한 후(즉 피동잔열제거계통 격리 및 주급수 공급 확보)에 기동운전이 이루어진다.

제 6 절 재장전 운전

노심 재장전을 위해 원자로 압력용기 상부 덮개의 볼트를 해제하여 원자로 압력용기 상부 덮개 및 관련 기기를 제거한다. 다음으로 원자로심 상부의 내부 구조물을 제거한 다음, 원자로심에서 제어봉 및 정지봉을 핵연료와 함께 제거하거나 교체한다.

제 4 장 SMART 제어 논리

본 장에서는 제 3장의 운전 모드 및 운전 모드간의 천이를 위한 제어논리를 기술한다. 성능관련 설계기준사건을 분석함에 있어 모든 제어계통은 정상 작동하는 것으로 가정됨으로 다음의 제어 논리를 제 6장에서 논의될 성능분석용 전산코드에 의해 구현할 수 있어야 한다. 아래의 제어 논리는 성능분석에 의해 그 결과가 원하지 않는 방향으로 진행될 경우에는 변경될 수 있다. 새로이 개발된 원자로 가열운전을 제외한 SMART 핵증기공급계통 내의 주요 계통 및 기기의 제어 논리에 대한 일반적인 사항은 참고문헌 3에 기술되어 있다.

제 1 절 핵적 기동 운전 제어 논리

핵적기동 운전은 원자로 출력을 0% 출력에서 0.1% 출력으로 증가시키는 과정으로 초기 미임계 상태에서 출발하여 핵적기동 운전 종료시 임계 상태에 도달한다. 출력 제어를 위해 중성자 출력이 사용되며 출력증배시간(doubling time period)이 40초 부근에서 유지되도록 제어한다. 핵적기동 운전동안 노심 출력이 매우 낮으므로 출력은 노심 동특성과 제어봉 이동에 의해서만 결정된다. 그림 1은 핵적기동 운전에서 사용되는 제어 논리로서 limiter의 설정치나 이득값은 성능 분석으로부터 결정되어 진다. 예측된 출력증배시간(대수 출력변화율의 역수)과 기준 값과의 편차가 1 이상으로 벗어날 경우 제어봉을 일정한 속도로 움직이며, 이 편차가 0이 되면 멈춘다.

제 2 절 원자로 가열 운전 제어 논리

원자로가열 운전시의 원자로출력 제어는 단계적으로 노심출력을 여러 일정 값으로 제어함으로써 목표로 하는 노심출구온도 가열율을 얻는 방식이다[4]. 증기발생기 이차측 압력이 자동으로 제어되기 전까지는 목표 출력을 Q1으로 낮게 잡고 증기가 생성된 후에는 목표 출력을 Q2로 높게 잡는 방식의 2 단계 출력 설정 방식으로 원자로 출력을 제어함으로써 노심 출구온도에 대한 목표 가열율(dT/dt)을 만족하도록 해 준다.

그림 2는 다단계 출력 설정 제어논리의 개념 흐름도를 보여준다. 설정된

목표 출력(Q1 또는 Q2)과 노외 중성자 계측기에서 측정된 중성자속(neutron flux)으로부터 산정된 노심출력(Q)과 차이가 나게 되면 제어봉이 움직이게 된다. 목표 출력이 설정되면 제어봉이 인출되고 양의 제어봉 반응도가 노심에 투입되어 노심 출력이 증가한다. 이에 따라 노심출구 온도가 증가하여 온도 반응도(음의 값임)가 커지게 되므로 총 반응도가 작아지게 된다. 총 반응도가 음의 값이 되면 노심출력이 감소하게 되는데 출력제어 목표값이 일정값으로 고정되어 있기 때문에 제어봉이 인출된다. 따라서 제어봉은 가열운전 중에 지속적으로 인출된다. 그림 2는 이러한 제어봉 반응도 및 온도 반응도의 궤환(feedback)효과 개념을 포함한 다단계 출력 설정의 전체 제어 논리도를 보여 준다. 제어 논리도에 나타난 변수(Q1과 Q2 등)들이나 이득값은 성능분석으로부터 결정되어 진다.

제 3 절 원자로 기동 운전 제어 논리

출력 변동이나 운전중 예상과도시 공정 변수의 변화로 계통조건이 정상 운전조건으로부터 벗어나게 될 경우에 적절한 제어를 통해 안정모드로 복귀시킬 필요가 있다. 그림 3에서 보여진 제어변수를 적절히 제어함으로써 영향변수들의 변동을 최소화 하기 위해 이에 맞는 제어 논리를 구비해야 한다. SMART 에서의 출력제어는 짧은 시간에 걸쳐 계통에 영향을 미치는 변수와 지연되어 나타나는 변수 모두를 적절히 제어하는 출력제어 방식으로 출력-유량 편차와 온도 편차를 결합한 제어방식으로 아래와 같으며 이를 “T/N-제어기”라 한다.

$$U = 0.333 \times \Delta T + 0.5 \times \Delta N,$$

여기서 $\Delta N = N - Q_w$ 로 중성자 출력(N)과 주급수 유량(Q_w)과의 편차이고, $\Delta T = T_{hot} - T_{ref}$ 로 일차측 증기발생기 입구 온도(T_{hot})와 기준온도 프로그램(T_{ref})간의 편차이다. 계통 특성에 따라서는 어느 한 편차만을 이용할 수도 있다. 출력-유량 편차만을 사용하는 경우를 “N-제어기”라 하고, 온도 편차만을 사용하는 경우를 “T-제어기”라 한다.

기동운전과 같이 주냉각재펌프가 저속운전되는 경우 일차측 증기발생기 출구 즉 노심 입구 영역의 냉각재 온도가 너무 낮게 되어 냉각재 수축이 크다. 큰 냉각재 수축은 일차계통 압력을 낮추므로 바람직하지 않다. 따라서 그림 4에서 보여진 것과 같이 고온측(일차측 증기발생기 입구) 온도(T_{hot})가 출력과 무관하게 일정한 값을 가지는 기준온도 프로그램을 사용한다.

T/N-제어기를 이용한 출력제어 방식이 그림 5에 보여지는데 이때 제어봉은 $|U| > 1$ 일때 이동하여 $|U| = 0$ 일때 정지하는 이력특성을 따른다. 이 제어봉 이력특성은 성능분석에 의해 변경될 수도 있다.

제 4 절 출력 운전 제어 논리

출력운전 제어도 기동운전시의 출력제어 방식을 따르며 그림 5의 제어논리에 의해 수행된다. 이때 일차계통의 조건은 출력 변동으로 인한 냉각재 팽창 및 수축을 최소화하는 기준온도(T_{ref}) 프로그램을 따른다[5]. 즉, 그림 4에서 보여진 것과 같이 고온측(일차측 증기발생기 입구) 온도(T_{hot})가 출력의 함수로 선형적으로 변하는 값을 가진다. 출력운전을 위한 제어논리의 경우 불필요한 제어봉 이동을 최소화하기 위해 다음과 같은 세가지 제어 논리를 분석후 계통 특성에 부합하는 적절한 방식을 채택함이 바람직하다.

- 1) T/N-제어기를 사용하는 방식으로 기동운전시와 같다.
- 2) T-제어기만을 사용하는 방식으로 적정한 음의 반응도 귀환으로 출력은 제어되나, 냉각재 수축 및 팽창이 큰 경우에 사용한다.
- 3) 제어봉 제어가 없는 자기 제어방식으로 큰 음의 반응도 귀환으로 출력뿐만 아니라 냉각재 수축 및 팽창 모두가 제어되는 경우에 사용한다.

자연순환 출력운전에서는 일차계통 유량이 정격 유량의 약 1/8 정도로 작기 때문에 일차측 증기발생기를 통한 냉각재 온도 감소가 커지게 된다. 이는 노심 입구 온도의 감소를 의미하므로 냉각재 수축을 증가시켜 일차측 압력을 감소시키는 원인이 된다. 따라서 기동운전에서도 같이 고온측(일차측 증기발생기 입구) 온도(T_{hot})가 출력과 무관하게 일정한 값을 가지는 기준온도 프로그램을 사용한다.

비정상 운전시 공정변수의 큰 변화가 발생되며 원자로트립 신호설정치에도달할 가능성이 있다. 이 것을 막기 위해 표 1을 보면, SMART에는 예비보호(pre-scrum)신호가 있어서 비정상 운전시 예비보호신호가 발생하면 이 신호가 소거될 때까지 제어봉이 급속히 삽입되어 원자로출력을 낮추게 된다. 이때 제어봉의 이동은 삽입만이 가능하다.

제 5 절 원자로 트립시 제어 논리

여러 가지 원인으로 예상치 않은 원자로트립 신호가 발생하였을 경우 원자로를 안정한 정지상태에 도달하도록 발전소보호계통이 자동 작동한다. 제어봉이 급속히 삽입되어 원자로 출력을 붕괴열 준위로 낮춘다. 원자로트립 신호에 의해 터빈이 정지되며 붕괴열 제거를 위한 열제거원을 확보하기 위해 피동잔열 제거계통을 작동하도록 한다. 원자로트립 신호에 의해 주증기 및 주급수 격리밸브가 폐쇄되고 피동잔열제거계통 입구 및 출구 차단밸브 그리고 보상탱크 차단밸브가 개방됨으로써 자연순환 폐회로가 형성된다. 초기 과도후 안정한 자연순환 유로가 형성되면 일차계통으로부터의 붕괴열은 피동잔열제거계통의 열교환기를 통해 지속적으로 제거된다.

제 6 절 주급수 유량 제어 논리

주급수 제어계통의 주된 기능은 5%에서 100% 출력사이의 기동 및 출력 운전에서 증기발생기로 공급되는 주급수 유량을 자동으로 제어하는 것이다. 주급수 유량제어를 위한 주급수 제어밸브에 대한 제어논리는 그림 6에 주어져 있다. SMART에서는 두가지 주급수유량 변화율을 채택한다:

- 1) 기동 운전 및 정상 출력운전 중에는 5%/분의 속도로 주급수 유량이 자동 제어된다.
- 2) 주냉각재펌프 1대 정지, 주급수펌프 1대 정지, 증기발생기 1구역 차단에는 최대 10%/초(분석에 의해 결정)로 주급수 유량이 급속히 감소한다.

제 7 절 주증기 압력 및 증기 우회 제어 논리

정상 운전중 증기압 조절계통은 주증기의 일부를 주증기 계통으로부터 복수기로 지속적으로 방출하면서 주증기 압력을 설정치로 유지한다. SMART에서는 정상 운전중 주증기압을 출력에 관계없이 일정한 값으로 유지하도록 증기압 조절계통(가습조절기)이 작동하도록 설계되어 있다.

원자로출력 제어계통은 터빈 출력 20% 계단 변화, 5%/분 점진적 변화까지는 원자로 출력과 일차측 증기발생기 입구 온도를 제어봉 구동 장치의 도움없이 정상 허용 범위 이내로 유지할 수가 있다. 그러나, 더 큰 양의 부하 감발을

감당하고 터빈 발전기의 운전을 원활하게 하기 위해서는 인위적인 여분의 증기 부하가 필요하다. 이와 같은 핵증기공급계통의 연속적인 운전에 필요한 것이 증기우회 제어계통(가습조절기)이다. 이러한 인위적인 증기 부하는 높은 압력의 주증기를 바로 복수기로 보내는 가습조절기에 의하여 이루어진다. 증기우회 제어계통은 100%의 증기를 모두 우회할 수 있도록 설계되며, 주증기의 압력을 일정하게 유지하는 데에도 사용된다.

그림 7에 보여지는 것과 같이 주증기 압력제어와 터빈 속도제어가 유압식 기계장치에 의해 피동적으로 이루어진다. 터빈 속도(혹은 출력)가 일정한 상태에서 주증기 압력이 변동되면, 유압기에 연결된 레버가 압력 변동에 즉각 반응하여 가습조절기의 유량을 제어함으로써 원래의 설정된 압력으로 복귀시킨다. 마찬가지로 터빈 속도 변동시 역시 유압기에 의해 터빈 유량이 조절되고, 동시에 터빈 유량 변화로 야기된 압력 변동을 가습조절기의 유압기에 의해 조절된다. 터빈발전기 정지시에는 터빈 전단에 설치된 터빈정지밸브가 급속히 폐쇄되며, 나머지 잉여 주증기 유량은 가습조절기를 통해 복수기로 방출된다. 이 과정에서 가습조절기의 유압식 압력 조절에 의해 일정 값을 유지하므로 일차계통이나 급수 계통에 영향을 주지 않는다.

제 5 장 성능관련 설계기준사건의 세부 분류 및 허용 기준

제 1 절 성능관련 설계기준사건의 분류

성능관련 설계기준사건은 이들 사건이 발생하는 운전 모드에 따라 일반적인 종류로 나뉜다. 추가적인 종류는 이들 운전 모드 사이의 천이시 발생하는 사건에 대하여 정의된다. 성능관련 설계기준사건을 정의하기 위한 목적에 적절한 일반적인 운전 모드로 제 3장에서 서술된 내용을 요약하면 아래의 표와 같이 정리할 수 있다.

운전 모드	반응도 Keff	%정격 출력 (N_{nom})	일차측 증기발생기 입구 냉각재 온도 ($^{\circ}\text{C}$)
정상 출력 운전	≥ 0.99	$20 \leq N_{nom} \leq 100$	≥ 295
비정상 출력 운전			
- 증기발생기 1구역 차단시 운전	≥ 0.99	$20 \leq N_{nom} \leq 50$	≥ 295
- 주냉각재펌프 1대 정지시 운전	≥ 0.99	$20 \leq N_{nom} \leq 50$	≥ 295
기동 운전			
- 원자로 기동 운전	≥ 0.99	$5 \leq N_{nom} \leq 20$	≥ 295
- 원자로 가열 운전	≥ 0.99	$0.1 \leq N_{nom} \leq 5$	≥ 295
- 핵적 기동 운전	≥ 0.99	0.1	≤ 60
고온 정지운전	≤ 0.99	-	$150 \leq$
저온 정지운전	≤ 0.99	-	≤ 150
재장전 운전	≤ 0.95	-	≤ 60

SMART에 적용할 성능관련 설계기준사건에 대한 운전 모드에 따른 세부 목록은 아래와 같으며, 아래 목록은 유체계통 설계문서 “SMART 핵증기공급계통 설계요건 및 기준[1]”를 기초로 한 것이다.

가) 출력 운전 (20% - 100%)

- 정상 출력 변화율 $\pm 5\%$ /분의 주급수 유량 변화
- 계단 출력 변화 $\pm 20\%$ 의 터빈 출력 변화
- 원자로 비상정지를 수반하지 않는 임의의 출력운전중 핵증기공급계통에

대한 즉각적인 최대 100%의 부하 상실

- 주급수펌프 1대의 정지(2대 운전중)
- 고속 운전모드의 100% 출력에서 원자로 비상정지

나) 증기발생기 1구역 차단 운전 (20% - 50%)

- 100% 정상 출력운전에서 증기발생기 1구역 차단시의 50% 출력운전으로의 전환
- 최대 출력 변화율 $\pm 5\%$ /분의 주급수 유량 변화
- 계단 출력 변화 $\pm 10\%$ 의 터빈 출력 변화
- 주급수펌프 1대의 정지(2대 운전중)

다) 주냉각재펌프 1대 정지 운전 (20% - 50%)

- 100% 정상 출력운전에서 주냉각재펌프 1대 정지시의 50% 출력운전으로의 전환
- 최대 출력 변화율 $\pm 5\%$ /분의 주급수 유량 변화
- 계단 출력 변화 $\pm 10\%$ 의 터빈 출력 변화
- 주급수펌프 1대의 정지(2대 운전중)

라) 원자로 기동 운전 (5% - 20%)

- 정상 출력 변화율 $\pm 5\%$ /분의 주급수 유량 변화
- 저속운전 모드의 20% 출력에서 원자로 비상정지

마) 원자로 가열 운전 (0.1% - 5%)

- 원자로냉각재계통의 냉각재 온도를 최대 $100^{\circ}\text{C}/\text{시간}$ (정상 $40^{\circ}\text{C}/\text{시간}$) 이내의 임의의 가열율로 증가
- 냉각재 고온상태인 5% 출력에서 원자로 비상정지

바) 핵적 기동 운전 (0% - 0.1%)

- 원자로노심을 미임계상태(0% 출력)에서 임계상태(0.1% 출력)로 전환
- 저출력 임계상태인 0.1% 출력에서 원자로 비상정지

사) 고온 정지 운전

- 원자로냉각재계통의 온도를 최대 $100^{\circ}\text{C}/\text{시간}$ 이내의 임의의 냉각율로 감소

아) 저온 정지 운전

- 원자로냉각재계통의 온도를 최대 $100^{\circ}\text{C}/\text{시간}$ 이내의 임의의 냉각율로 감소

자) 재장전 운전

- 원자로심에서 제어봉 및 정지봉을 핵연료와 함께 제거하거나 교체

- 차) 출력운전에서 기동운전 혹은 기동운전에서 출력운전으로 전환(20%)
 - 출력운전에서 기동운전으로의 전환
 - 기동운전에서 출력운전으로의 전환
- 카) 기동 운전에서 고온정지 운전으로 전환
 - 원자로 출력을 0%로 낮추면서 원자로심 상태를 임계상태에서 미임계상태로 전환
- 타) 고온정지 운전에서 저온정지 운전으로 전환
 - 잔열제거를 위하여 사용중인 피동잔열제거 모드를 능동잔열제거 모드로 전환
- 파) 저온정지 운전에서 재장전 운전으로 전환
- 하) 기타 자연순환 출력운전(20%)
 - 출력운전에서 자연순환운전으로의 전환
 - 자연순환운전에서 출력운전으로의 전환
 - 자연순환 운전모드의 20% 출력에서의 원자로 비상정지

제 2 절 성능관련 설계기준사건의 허용기준

성능 분석시 공정변수 과도에 적용되는 허용기준으로, 정상운전에 대해서는 경보신호 발생이 그리고 비정상운전에 대해서는 원자로트립 신호 발생이 금지된다. 성능관련 설계기준사건의 허용기준을 만족하기 위한 구체적인 허용기준들은 다음과 같다:

- 1) 정상 기동 및 출력 운전
 - 과도후 지속적 출력 운전시 이차측 증기과열도는 40°C 이상을 확보해야 한다.
 - 출력 천이 기간중 이차측 증기과열도는 10°C 이상을 확보해야 한다.
 - 표 1에 기술된 각 운전모드에 적용되는 경보 신호가 발생하지 않아야 한다.
 - 노심에서 충분한 열적여유도를 확보하기 위해 핵비등이탈율(DNBR)이 최소 DNBR 이상이어야 하고, 냉각재 비등이 허용되지 않는다.

2) 비정상 출력 운전

- 표 1에 기술된 각 운전모드에 적용되는 원자로트립 신호가 발생하지 않아야 한다.
- 노심에서 충분한 열적여유도를 확보하기 위해 핵비등이탈율(DNBR)이 최소 DNBR 이상이어야 하고, 냉각재 비등이 허용되지 않는다.

3) 핵적기동 운전이나 원자로가열 운전 그리고 원자로 비상정지 운전에 대해서는 표 2에 기술된 별도의 기준에 따른다.

위의 구체적 허용기준중 어느 기준 및 신호가 특정한 성능관련 설계기준 사건과 관련되는 지는 표 1과 표 2에 상세히 기술된다.

제 6 장 성능 분석 코드 및 해석 방법론

SMART 성능분석은 최적 입력을 사용하여 최적(best-estimate) 계산을 수행하며 모든 공정 및 안전 계통은 정상적으로 작동하는 것으로 가정한다. 이때 모든 제어계통은 자동모드에 의하며, 각 운전모드에 해당하는 제어논리는 제 4 장에 기술되어 있다.

제 1 절 성능분석용 전산 코드

한국원자력연구소에서 원자력 중장기 개발사업의 일환으로 개발된 과도기 사고분석과 성능분석 용으로 개발된 실시간 최적 TASS 코드[6]를 기반으로, 일체형 원자로에 특수한 기기와 계통 및 열수력 모델을 장착한 TASS/SMR 전산코드[7]가 일체형 원자로의 성능분석 및 안전해석을 위하여 개발 중에 있다. 일체형원자로용으로 추가된 모델에 대해서는 참고문헌 8에서 참고문헌 15까지에 기술되어 있다. TASS/SMR 코드는 Drift Flux 모델을 사용하는 Five Equations 모델 코드로 실시간 계산이 가능하여 특히 많은 양의 계산을 해야 하는 성능분석 및 설정치 분석에 활용될 수 있다. TASS/SMR 계통 열수력 코드의 특성을 살펴보면 아래와 같다:

- Drift-Flux 모델을 사용하여 비균질/비평형 이상유체의 현상을 분석한다. 지배방정식은 액체 질량 보존식, 혼합체 질량 보존식, 혼합체 운동량 보존식, 혼합체 에너지 보존식, 증기 엔탈피 보존식으로 구성되며, 또한 비응축개스를 다루기 위하여 비응축개스 질량 보존식도 함께 풀다.
- 수치 해석은 Porsching의 fully-implicit 해법을 사용한다.
- 노심 동특성 모델로는 점근사 모델(Point Kinetics Model)과 일차원 동특성 모델(1-D Kinetics Model)을 가지고 있다.
- 노심은 12개로 세분화하여 비등시 국부 유체 조건을 모의할 수 있다.
- 계통의 각 부분은 수직관 혹은 수평관으로 구성되며 각 노드에서는 혼합체 수위 계산 모델을 가지고 있다.
- 핵연료봉을 포함하여 열교환기 튜브 및 열구조물을 모사할 수 있는 열전도 모델을 가지고 있다. 특히 SMART용으로 증기발생기 나선형 튜브를 위한 일차원 열전도 방정식 및 가압기 냉각기 모델이 추가되어 있다.

- 노심과 증기발생기 나선형 튜브 그리고 피동잔열제거계통 튜브에는 유동 모드에 따라 선정되는 열전달 상관식이 사용된다.
- 부품 모델로는 펌프, 밸브, 축압기, 임계 유량 모델등이 있다.
- 다양한 제어 계통을 모사할 수 있는 제어 모델을 가지고 있다.

제 2 절 SMART TASS/SMR 모델

그림 8은 TASS/SMR 코드를 이용한 SMART 성능 및 안전 분석을 위한 일차 및 이차계통 모델을 보여준다. 일차 및 이차 계통 전체는 총 121개의 노드와 134개의 유로로 구성되어 과도기 분석을 위한 계통 열수력 거동을 예측할 수 있다.

일차계통의 경우 노심(노드 1)에서 주냉각재펌프(유로 6,7,8,9) 그리고 증기발생기 일차측(노드 6에서 25) 및 하향유로(노드 26)를 통한 순환 유로가 형성되며, 증기발생기 일차측은 이차계통 모델과 일치하게끔 4개의 독립 유로들로 구성된다. 환형공동(노드 28)에는 가압기 영역이 연결되어 과도시 압력 보상을 담당한다. 핵연료봉은 반경방향으로 10개의 노드와 축방향으로 12개의 노드로 세분화되며, 12개의 분할(sectionalized) 유체영역을 가지는 노심 노드와 연계되어 열전도 및 열전달 거동을 예측한다. 또한 압력용기 및 내부 열구조물은 lumped wall 열전도 모델로 고려하며, 가압기 열교환기 튜브 및 증기발생기 나선형 튜브에 대해서는 별도의 열전도 모델을 사용한다.

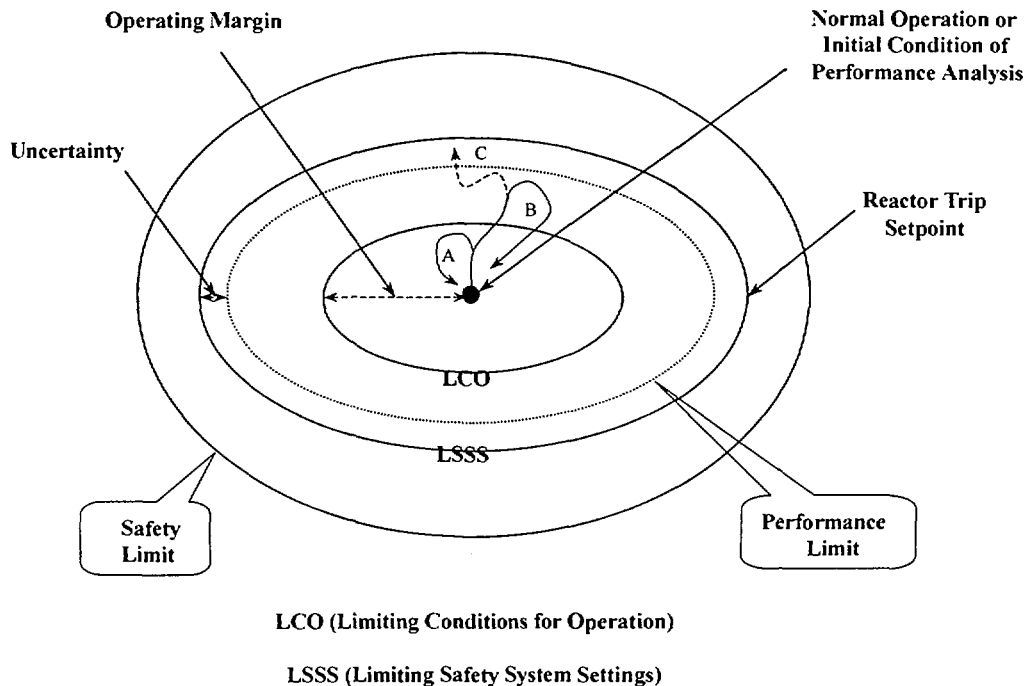
이차계통의 경우 독립된 4개의 섹션으로 구성되는 SMART 이차계통의 실제 구조와 일치하게끔, 4개의 이차계통 유로와 4개의 피동잔열제거계통으로 구성된다. 따라서 과도시 4개의 독립된 계통 각각이 다른 계통 열수력 거동을 보이는 것도 예측할 수 있다. 증기발생기 나선형 튜브와 피동잔열제거계통 열교환기 튜브 영역에서는 노드를 세분화함으로써, 단상 액체에서 이상 유체를 거쳐 단상 증기로 되는 혹은 그 역으로 되는 급격한 유체 특성 변화를 모사한다. 피동잔열제거계통 작동시 형성되는 이상 자연순환동안 예상되는 배관들과의 열교환도 lumped wall 열전도 모델을 사용하여 모사한다.

성능 및 안전 과도기 분석시 각각의 기기나 계통의 작동 및 이 들을 구동하기 위한 신호등은 TASS/SMR 코드의 제어 모델로써 적절히 구현될 수 있다. TASS/SMR 코드는 사용자 편의성을 가지도록 개발되어 사용자의 필요에 따라 수

정이나 변경이 용이하도록 되어 있다. 그러나 성능 분석 결과에 대한 신뢰성 확보를 위해서는 새로이 개발되는 열수력 코드에 대한 검증이 필수적으로 수행되어야 할 것이다.

제 3 절 성능 해석 방법론

성능 과도기 분석시 공정 변수는 운전제한조건(Limiting Condition for Operation, LCO)이내에 유지되거나, 운전제한조건을 벗어나더라도 성능제한치(Performance Limit)를 초과하지 않고 운전제한치 이내로 복귀해야 한다. 이를 아래의 그림에 예시하면, A와 B의 경우는 성능 요구사항을 만족하나 C의 경우는 성능제한치를 벗어나므로 허용되지 않는다.



성능분석시 고려되는 초기 조건은 아래와 같으며, 표 2에 기술된 성능관련 설계기준사건들에서 초기 노심 조건에 대한 민감도 분석이 고려된다.

- 10% 증기발생기 관막음(7/72 증기발생기 모듈이 관막음된 것으로 가정)
- BOC, MOC, EOC 초기 노심 조건(MTC, FTC, 노심 출력 분포, 제어봉 반응도가)

- 피동잔열제거계통 열교환기 튜브 fouling

아울러 SMART 성능분석은 성능관련 설계기준사건에 대한 허용 요건 만족 여부와 더불어 제어계통의 제어논리 개발 및 보호 계통의 경보 및 트립 설정치 분석등을 포함한다.

1. 출력 운전

가. 정상 출력 변화율 $\pm 5\%$ /분의 주급수 유량 변화

- 주급수 유량을 20%와 100%사이에서 5%/분으로 증가시키거나 감소
- 제 4장 제 4절의 출력운전 제어논리에 의해 출력 제어
- 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석

나. 계단 출력 변화 $\pm 20\%$ 의 터빈 출력 변화

- 20%와 100% 원자로 출력사이의 임의의 원자로 출력에서 터빈 속도 설정치 (즉 터빈 출력)를 계단형으로 20% 증가시키거나 감소

다. 원자로 비상정지를 수반하지 않는 임의의 출력운전중 핵중기공급계통에 대한 즉각적인 최대 100%의 부하 상실

- 터빈발전기 정지시 터빈정지밸브는 급속히 닫히며, 동시에 주중기 유량 전부를 가습조절기(THD)를 통해 우회시킴. 이때 복수기로의 과열 증기 유입을 막기 위해 가습조절기로 적정량의 저온의 급수가 공급되도록 제어

라. 주급수펌프 1대의 정지(2대 운전중)

- 정상운전 중인 2대의 주급수펌프(각 50%)중 1대의 펌프가 정지되면 주급수 유량 제어에 의해 출력을 75%까지 급속히 감소
- 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석

마. 고속 운전모드의 100% 출력에서 원자로 비상정지

- 제 4장 제 5절의 원자로 비상정지 제어논리에 의해 원자로 트립
- 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석
- 원자로트립 신호에 의해 제어봉 삽입
- 터빈 정지 밸브의 폐쇄 및 터빈 트립
- 주중기 및 주급수 격리밸브의 폐쇄와 동시에 피동잔열제거계통의 입구 및 출구 차단밸브를 개방

2. 증기발생기 1구역 차단 운전

가. 100% 정상 출력운전에서 증기발생기 1구역 차단시의 50% 출력운전으로의

전환

- 배관 누설 탐지시 주급수 유량제어에 의해 100% 출력에서 50%출력으로 급속히 줄인후, 해당 증기발생기 1구역의 증기 및 급수 섹션차단밸브를 격리
- 제 3장 제 2절의 비정상운전 절차에 의해 출력 및 기기 제어
- 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석

나. 최대 출력 변화율 $\pm 5\%$ /분의 주급수 유량 변화

- 주급수 유량을 20%와 50%사이에서 5%/분으로 증가시키거나 감소
- 제 4장 제 4절의 출력운전 제어논리에 의해 출력 제어
- 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석

다. 계단 출력 변화 $\pm 10\%$ 의 터빈 출력 변화

- 20%와 50% 원자로 출력사이의 임의의 원자로 출력에서 터빈 속도 설정치(즉 터빈 출력)를 계단형으로 10% 증가시키거나 감소
- "1의 나"항의 범주에 구속(bound)

라. 주급수펌프 1대의 정지(2대 운전중)

- "1의 라"항의 범주에 구속(bound)

3. 주냉각재펌프 1대 정지 운전

가. 100% 정상 출력운전에서 주냉각재펌프 1대 정지시의 50% 출력운전으로의 전환

- 주냉각재펌프 1대 정지시 주급수 유량제어에 의해 100% 출력에서 50%출력으로 급속히 감소
- 제 3장 제 2절의 비정상운전 절차에 의해 자동 출력 제어
- 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석

나. 최대 출력 변화율 $\pm 5\%$ /분의 주급수 유량 변화

- 주급수 유량을 20%와 50%사이에서 5%/분으로 증가시키거나 감소
- 제 4장 제 4절의 출력운전 제어논리에 의해 출력 제어
- 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석

다. 계단 출력 변화 $\pm 10\%$ 의 터빈 출력 변화

- 20%와 50% 원자로 출력사이의 임의의 원자로 출력에서 터빈 속도 설정치(즉 터빈 출력)를 계단형으로 10% 증가시키거나 감소
- "1의 나"항의 범주에 구속(bound)

라. 주급수펌프 1대의 정지(2대 운전중)

- "1의 라"항의 범주에 구속(bound)

4. 원자로 기동 운전

가. 정상 출력 변화율 $\pm 5\%$ /분의 주급수 유량 변화

- 제 4장 제 3절의 기동운전 제어논리에 의해 출력 제어
- 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석
- 5% 출력에서 수동으로 기동급수펌프를 정지하고, 주급수펌프를 작동하여 주급수 유량제어를 자동모드로 전환
- 주급수 유량을 5%와 20%사이에서 5%/분으로 증가시키거나 감소
- 주급수 유량이 20%, 주증기 압력이 3.3MPa이 되면, 복수기 진공 형성후 터빈 발전기를 가동

나. 저속 운전모드의 20% 출력에서 원자로 비상정지

- 제 4장 제 5절의 원자로 비상정지 제어논리에 의해 원자로 트립
- 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석
- 원자로트립 신호에 의해 제어봉 삽입
- 터빈 정지 밸브의 폐쇄 및 터빈 트립
- 주증기 및 주급수 격리밸브의 폐쇄와 동시에 피동잔열제거계통의 입구 및 출구 차단밸브를 개방

5. 원자로 가열 운전

가. 원자로냉각재계통의 냉각재 온도를 최대 100°C/시간 이내의 임의의 가열율로 증가

- 제 4장 제 2절의 가열운전 제어논리에 의해 출력 제어
- 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석
- 기동냉각기를 통하여 이차계통 주증기 배관을 통한 이차계통 냉각수 방출
- 이차계통 주증기압이 0.8MPa이 되면 터빈축 밀봉 및 복수기 진공 시작
- 이차계통 주증기압이 1.6MPa, 210°C이 되면 기동냉각기를 닫고 가습조절기를 개방
- 가습조절기 개방과 동시에 주증기 압력제어 계통은 자동으로 전환
- 주증기가 과열 상태가 되면 가습조절기를 통하여 주증기에 가습
- 이차계통 주증기압이 1.6MPa, 250°C이 되면 주증기 압력제어 설정치를

3. 3MPa로 설정

- 나. 냉각재 고온상태인 5% 출력에서 원자로 비상정지
 - 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석
 - 원자로트립 신호에 의해 제어봉 삽입

6. 핵적 기동 운전

- 가. 원자로심을 미임계상태(0% 출력)에서 임계상태(0.1% 출력)로 전환
 - 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석
 - 제 4장 제 1절의 제어논리에 의한 자동 제어봉 인출로 출력 제어
 - 원자로냉각재계통을 3.7MPa로 가압
 - 주냉각재펌프를 저속으로 가동
 - 기동급수펌프 가동하여 5% 주급수 유량을 공급
 - 핵적기동 운전전에 원자로 비상정지를 위해 제어봉이 일정 높이까지 인출
- 나. 저출력 임계상태인 0.1% 출력에서 원자로 비상정지
 - 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석
 - 원자로트립 신호에 의해 제어봉 삽입

7. 고온 정지 운전

- 가. 원자로냉각재계통의 온도를 최대 100°C/시간 이내의 임의의 냉각율로 감소
 - 이차계통 주급수 유량을 조절함으로써 냉각
 - 기동냉각장치를 통하여 이차계통 주중기 배관을 통한 이차계통 냉각수를 방출(필요시 잔열제거계통을 통하여 잔열 제거)

8. 저온 정지 운전

- 가. 원자로냉각재계통의 온도를 최대 100°C/시간 이내의 임의의 냉각율로 감소
 - 이차계통 주급수 유량을 조절함으로써 냉각
 - 기동냉각장치를 통하여 이차계통 주중기 배관을 통한 이차계통 냉각수를 방출(필요시 잔열제거계통을 통하여 잔열 제거)

9. 재장전 운전

- 원자로심에서 제어봉 및 정지봉을 핵연료와 함께 제거하거나 교체
10. 출력운전에서 기동운전 혹은 기동운전에서 출력운전으로 전환
- 가. 기동운전에서 출력운전으로의 전환
- 20% 저속운전 모드에서 주냉각재펌프의 속도를 저속에서 고속으로 차례로 전환
 - 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석
- 나. 출력운전에서 기동운전으로의 전환
- 20% 고속운전 모드에서 주냉각재펌프들의 속도를 고속에서 저속으로 차례로 전환
 - 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석
11. 기동 운전에서 고온정지 운전으로 전환
- 가. 원자로 출력을 0%로 낮추면서 원자로심 상태를 임계상태에서 미임계상태로 전환
- 유효반응도 K_{eff} 를 0.99이하로 전환하기 위해 제어봉 삽입
12. 고온정지 운전에서 저온정지 운전으로 전환
- 가. 잔열제거를 위하여 사용중인 피동잔열제거 모드를 능동잔열제거 모드로 전환(잔열제거계통 사용시)
- 피동잔열제거계통의 냉각펌프를 가동
13. 저온정지 운전에서 재장전 운전으로 전환
- 원자로 압력용기 상부덮개 볼트 및 상부덮개 제거
 - 별도의 계통 분석은 수행하지 않고 절차서에 의함
14. 기타 자연순환 출력운전
- 가. 출력운전에서 자연순환운전으로의 전환
- 주냉각재펌프들을 고속에서 저속으로 차례로 전환 완료후 저속에서 차례로 정지
 - 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석
- 나. 자연순환운전에서 출력운전으로의 전환

- 주냉각재펌프들을 저속으로 차례로 기동 완료후 저속에서 고속으로 차례로 전환
 - 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석
- 다. 자연순환 운전모드의 20% 출력에서 원자로 비상정지
- 제 4장 제 5절의 원자로 비상정지 제어논리에 의해 원자로 트립
 - 3가지 노심 조건(BOC, MOC, EOC)에 대한 민감도 분석
 - 원자로트립 신호에 의해 제어봉 삽입
 - 터빈 정지 밸브의 폐쇄 및 터빈 트립
 - 주증기 및 주급수 격리밸브의 폐쇄와 동시에 피동잔열제거계통의 입구 및 출구 차단밸브를 개방

제 7 장 결 론

SMART 핵증기공급계통이 설계시 의도된 성능(즉 전력 생산용 터빈이나 단수화 계통에 공급되는 고에너지의 증기 등)를 달성할 수 있는 지 혹은 설계시 예비 선정된 예상공전과도를 감당할 수 있는 지를 분석한 목적으로 성능 분석을 수행한다. 분석에 앞서 분석 체계를 세우기 위해 선정된 운전모드에 근거한 성능 관련 설계기준사건 및 이를 사건에 대한 허용범위를 규정하는 허용기준을 도출한다. 다음으로 이 사건을 분석한 계통 열수력 코드를 개발하고, 해석 방법을 몇 분석 절차를 선정한다.

본 보고서는 각 운전모드 혹은 운전모드간의 전이 등으로부터 도출된 성능 관련 설계기준사건의 목록 및 이 사건들에서 만족되어야 할 허용기준을 체계화하였다. 또한 각 운전모드에서의 제어논리 개념 및 개발 방향을 제시하고, 아울러 성능 분석용 계통 열수력 코드인 TASS/SMR의 특징과 SMART TASS/SMR 모델에 대한 설명을 담았다. 그리고 각 성능관련 설계기준사건들에 대해 상세한 분석 방법 및 절차도 제시하고 있다. 따라서 본 보고서는 현재까지 진행된 SMART 설계를 바탕으로 SMART 성능분석을 위한 체계를 정립한 것으로, SMART 성능분석을 위한 전반적인 내용을 담고 있어서 상세 성능분석을 위한 지침서로서 활용될 것이다.

제 8 장 참 고 문 헌

- [1] “SMART 핵증기공급계통 설계요건 및 기준,” SMART-PM-DB000-00, Revision 00, 일체형원자로 설계종합기술개발, January 1998.
- [2] “SMART 계통 설명서,” SMART-FS-SD210, Revision 00, 일체형원자로 계통 설계기술개발, November 1998.
- [3] “Functional Control Logic Diagram for SMART,” SMART-FS-IC300, Revision 00, 일체형원자로 계통설계기술개발, May 2000.
- [4] 서 재광외, “SMART 일차계통 핵적 가열운전 제어논리 개발,” KAERI/TR-1660/2000, 한국원자력연구소, 1998.
- [5] 임 홍식, “SMART 출력제어 개념개발을 위한 출력감발 해석,” KAERI/TR-1073/98, 한국원자력연구소, 2000.
- [6] 심 석구외, “TASS 코드 특정 기술보고서,” KAERI/TR-845/97, 한국원자력연구소, 2/13/1996.
- [7] 김 희철, “TASS/SMR 개발 요건 및 모델검증 정립,” SMART-SA-CA530-04, Rev. 0, 일체형원자로 안전해석기술개발, July 2000.
- [8] 윤 한영, “TASS/SMR Drift Flux 모델 및 수치해법 개선,” SMART-SA-CA530-10, Rev. 0, 일체형원자로 안전해석기술개발, March 2000.
- [9] 김 희철, “TASS/SMR 초기화 모델 개발,” SMART-SA-CA530-06, Rev. 0, 일체형원자로 안전해석기술개발, January 2000.
- [10] 김 희철, “TASS/SMR 가압기 냉각기 모델 개발,” SMART-SA-CA530-07, Rev. 0, 일체형원자로 안전해석기술개발, February 2000.
- [11] 이 규형, “TASS/SMR 코드의 사용자 편의를 위한 입출력 개선,” SMART-SA-CA530-11, Rev. 0, 일체형원자로 안전해석기술개발, November 2000.
- [12] 임 홍식, “TASS/SMR 단상펌프 및 밸브 모델,” SMART-SA-CA530-12, Rev. 0, 일체형원자로 안전해석기술개발, April 2000.
- [13] 정 영중, “TASS/SMR 증기발생기 열전달 모델 개발,” SMART-SA-CA530-09, Rev. 0, 일체형원자로 안전해석기술개발, March 2000.
- [14] 양 수형, “TASS/SMR PRHRS 열교환기 모델 개발,” SMART-SA-CA520-00, Rev. 0, 일체형원자로 안전해석기술개발, November 2000.
- [15] 김 희경, “TASS/SMR NPA 성능 요건서,” SMART-SA-CA530-08, Rev. 0, 일체형원자로 안전해석기술개발, January 2000.

표 1. 경보 신호와 원자로트립 신호 및 신호 설정치

계측 및 제어 변수	정격 설계값	설정치			운전 모드
		경보	예비 보호	정지	
출력증배계수, 초	40	↓25	↓25	↓15	핵적기동운전
노심 출력, %		↑33	↑33	↑40	자연순환운전
				↑40	원자로 가열 운전 (5% N _{nom})
				↑1.0	핵적기동운전 (0.15% N _{nom})
		↑38	↑38	↑45	MCP 저속운전
		↑108	↑108	↑115	출력운전
일차측 증기발생기 입구 온도, °C	310	↑325	↑325	↑335	출력운전
가압기 압력, MPa	15.0	↓13		↓12	출력운전
		↑16	↑16	↑17	
제어봉 위치차, mm		↑5.0			
가압기 수위, mm		↑2200			출력운전
		↓1800			
주냉각재펌프 회전 속도, %		1MCP ↓80	1MCP ↓80	2MCP ↓80	100% 출력운전
		1MCP ↓80	1MCP ↓80	2MCP ↓80	75% 출력운전
		1MCP ↓80	1MCP ↓80	1MCP ↓80	50% 출력운전
		1MCP ↓20		2MCP ↓20	20~25% 출력운전 (MCP 저속)
증기발생기 증기압, MPa	3.3	↑3.8		↑4.0	출력운전
복수기 압력, MPa		↑0.02		↑0.1	출력운전
주급수 유량, %				↓10	출력운전
터빈 속도, rpm	3600	↑3780			
		↓3420			

표 2. 성능관련 설계기준사건의 세부 허용 기준

운전 모드	설계기준사건	사건 기술	허용 기준	분석 범위
1. 출력 운전	가 정상 출력 변화율 $\pm 5\%$ /분의 주급수 유량 변화	20%와 100%사이의 원자로출력에서 주급수 유량을 $\pm 5\%$ /분으로 증가 혹은 감소	출력 운전관련 경고 신호 발생 금지	BOC, MOC, EOC
	나 계단 출력 변화 $\pm 20\%$ 의 터빈 출력 변화	20%와 100%사이의 터빈출력에서 터빈 속도를 $\pm 20\%$ 로 계단형 증가 혹은 감소	선택된 알고리즘에 따라 터빈 출력 변화	EOC
	다 원자로 비상정지를 수반하지 않는 임의의 출력운전중 핵중기공급계통에 대한 즉각적인 최대 100%의 부하 상실	터빈발전기 정지시 주중기 유량 전부를 가습조절기(THD)를 통해 우회	선택된 알고리즘에 따라 주중기량 우회	EOC
	라 주급수펌프 1대의 정지(2대 운전중)	정상운전 중인 주급수펌프중 1대 정지시 75%까지 주급수 유량의 급감소	출력 운전관련 원자 로트립 신호의 발생 금지	BOC, MOC, EOC
	마 고속 운전모드의 100% 출력에서 원자로 비상정지	원자로 비상정지시 제어봉 삽입, 터빈 정지, PRHR 작동	선택된 알고리즘에 따라 원자로 정지 및 PRHR에 의한 장기 냉각	BOC, MOC, EOC
2. 중기 발생기 1구역 차단 운전	가 100% 정상 출력운전에서 중기 발생기 1구역 차단시의 50% 출력운전으로의 전환	이차계통 배관 손상시 50%까지 주급수 유량 급감소후 해당 중기 발생기 1구역의 중기 및 급수 섹션차단밸브를 격리	출력 운전관련 원자 로트립 신호의 발생 금지	BOC, MOC, EOC
	나 최대 출력 변화율 $\pm 5\%$ /분의 주급수 유량 변화	20%와 50%사이의 원자로출력에서 주급수 유량을 최대 $\pm 5\%$ /분으로 증가 혹은 감소	출력 운전관련 경고 신호 발생 금지	BOC, MOC, EOC
	다 계단 출력 변화 $\pm 10\%$ 의 터빈 출력 변화	20%와 50%사이의 터빈출력에서 터빈 속도를 $\pm 10\%$ 로 계단형 증가 혹은 감소	선택된 알고리즘에 따라 터빈 출력 변화	"1의 나" 항에 의해 구속
	라 주급수펌프 1대의 정지(2대 운전중)	정상운전 중인 주급수펌프중 1대 정지시 허용값까지 주급수 유량의 급감소	출력 운전관련 원자 로트립 신호의 발생 금지	"1의 라" 항에 의해 구속
3. 주냉각재펌프 1대 정지 운전	가 100% 정상 출력운전에서 주냉각재펌프 1대 정지시의 50% 출력운전으로의 전환	주냉각재펌프 1대 정지시 50%까지 주급수 유량 급감소	출력 운전관련 원자 로트립 신호의 발생 금지	BOC, MOC, EOC
	나 최대 출력 변화율 $\pm 5\%$ /분의 주급수 유량 변화	20%와 50%사이의 원자로출력에서 주급수 유량을 최대 $\pm 5\%$ /분으로 증가 혹은 감소	출력 운전관련 경고 신호 발생 금지	BOC, MOC, EOC
	다 계단 출력 변화 $\pm 10\%$ 의 터빈 출력 변화	20%와 50%사이의 터빈출력에서 터빈 속도를 $\pm 10\%$ 로 계단형 증가 혹은 감소	선택된 알고리즘에 따라 터빈 출력 변화	"1의 나" 항에 의해 구속
	라 주급수펌프 1대의 정지(2대 운전중)	정상운전 중인 주급수펌프중 1대 정지시 허용값까지 주급수 유량의 급감소	출력 운전관련 원자 로트립 신호의 발생 금지	"1의 라" 항에 의해 구속
4. 원자로 기동 운전	가 정상 출력 변화율 $\pm 5\%$ /분의 주급수 유량 변화	5% 출력에서 기동급수펌프 정지 및 주급수펌프를 작동 주급수유량을 5%와 20%사이에서 5% /분으로 증가 복수기 진공 확보 및 터빈발전기 가동	MCP 저속운전관련 경고신호 발생 금지	BOC, MOC, EOC
	나 저속 운전모드의 20% 출력에서 원자로 비상정지	원자로 비상정지시 제어봉 삽입, 터빈 정지, PRHR 작동	선택된 알고리즘에 따라 원자로 정지 및 PRHR에 의한 장기 냉각	BOC, MOC, EOC

표 2. 성능관련 설계기준사건의 세부 허용 기준(계속)

운전 모드	설계기준사건	사건 기술	허용 기준	분석 범위	
5. 원자로 가열 운전	가	원자로냉각재계통의 냉각재 온도를 최대 100°C/시간 이내의 임의의 가열율로 증가	기동냉각기 혹은 가슴조절기를 통한 이차계통 냉각수 방출 및 주증기 압력제어 선택된 제어논리에 따라 제어봉 이동 및 출력 제어로 일차계통 냉각재 온도 상승	원자로 가열 운전 관련 경보신호 발생 금지	BOC, MOC, EOC
	나	냉각재 고온상태인 5% 출력에서 원자로 비상정지	원자로 비상정지시 제어봉 삽입	정지상태 도달	BOC, MOC, EOC
6. 핵적 기동 운전	가	원자로노심을 미임계상태 (0% 출력)에서 임계상태 (0.1% 출력)로 전환	원자로 기동 조건의 준비후 선택된 제어논리에 따라 제어봉 이동 및 출력 제어로 임계상태에 도달	핵적 기동 운전관련 경보신호 발생 금지	BOC, MOC, EOC
	나	저출력 임계상태인 0.1% 출력에서 원자로 비상정지	원자로 비상정지시 제어봉 삽입	정지상태 도달	BOC, MOC, EOC
7. 고온정지 운전	가	원자로 냉각재 계통의 온도를 최대 100°C/시간 이내의 임의의 냉각율로 감소	이차계통 주급수 유량을 조절함으로써 냉각(계획된 냉각) 비상정지시 잔열제거계통을 이용한 냉각	선택된 알고리즘에 따라 냉각	EOC
8. 저온정지 운전	가	원자로냉각재계통의 온도를 최대 100°C/시간 이내의 임의의 냉각율로 감소	이차계통 주급수 유량을 조절함으로써 냉각(계획된 냉각) 비상정지시 잔열제거계통을 이용한 냉각	선택된 알고리즘에 따라 냉각	EOC
9. 재장전 운전	가	재장전 운전	원자로노심에서 제어봉 및 정지봉을 핵연료와 함께 제거하거나 교체	선택된 알고리즘에 따라 작업	절차서에 의함
10. 출력운전에서 기동 운전 혹은 기동운전에서 출력운전으로 전환	가	기동운전에서 출력운전으로의 전환	20% 저속운전 모드에서 주냉각재펌프의 속도를 저속에서 고속으로 차례로 전환	MCP 저속운전관련 경보신호 발생 금지	BOC, MOC, EOC
	나	출력운전에서 기동운전으로의 전환	20% 고속운전 모드에서 주냉각재펌프의 속도를 고속에서 저속으로 차례로 전환	MCP 저속운전관련 경보신호 발생 금지	BOC, MOC, EOC
11. 기동 운전에서 고온정지 운전으로 전환	가	원자로 출력을 0%로 낮추면서 원자로노심 상태를 임계상태에서 미임계상태로 전환	유효반응도 Keff를 0.99이하로 전환하기 위해 제어봉 삽입	선택된 알고리즘에 따라 수행	EOC
12. 고온정지 운전에서 저온정지 운전으로 전환	가	잔열제거를 위하여 사용중인 피동잔열제거 모드를 능동잔열제거 모드로 전환(잔열제거계통 사용시)	피동잔열제거계통의 냉각펌프를 가동	선택된 알고리즘에 따라 수행	EOC

표 2. 성능관련 설계기준사건의 세부 허용 기준(계속)

운전 모드	설계기준사건	사건 기술	허용 기준	분석 범위
13. 저온정지 운전에서 재장전 운전으로 전환	가 저온정지 운전에서 재장전 운전으로 전환	인자로 압력용기 상부덮개 볼트 및 상부덮개 제거	선택된 알고리즘에 따라 수행	절차서에 의함
14. 기타 자연순환 출력운전	가 출력운전에서 자연순환운전으로의 전환	주냉각재펌프를 고속에서 저속으로 차례로 전환 완료후 저속에서 차례로 정지	자연순환운전 관련 경보신호 발생 금지	BOC, MOC, EOC
	나 자연순환운전에서 출력운전으로의 전환	주냉각재펌프를 저속으로 차례로 기동 완료후 저속에서 고속으로 차례로 전환	자연순환운전 관련 경보신호 발생 금지	BOC, MOC, EOC
	다 자연순환 운전모드의 20% 출력에서 인자로 비상정지	인자로 비상정지시 제어봉 삽입, 터빈 정지, PRHR 작동	선택된 알고리즘에 따라 인자로 정지 및 PRHR에 의한 장기 냉각	BOC, MOC, EOC

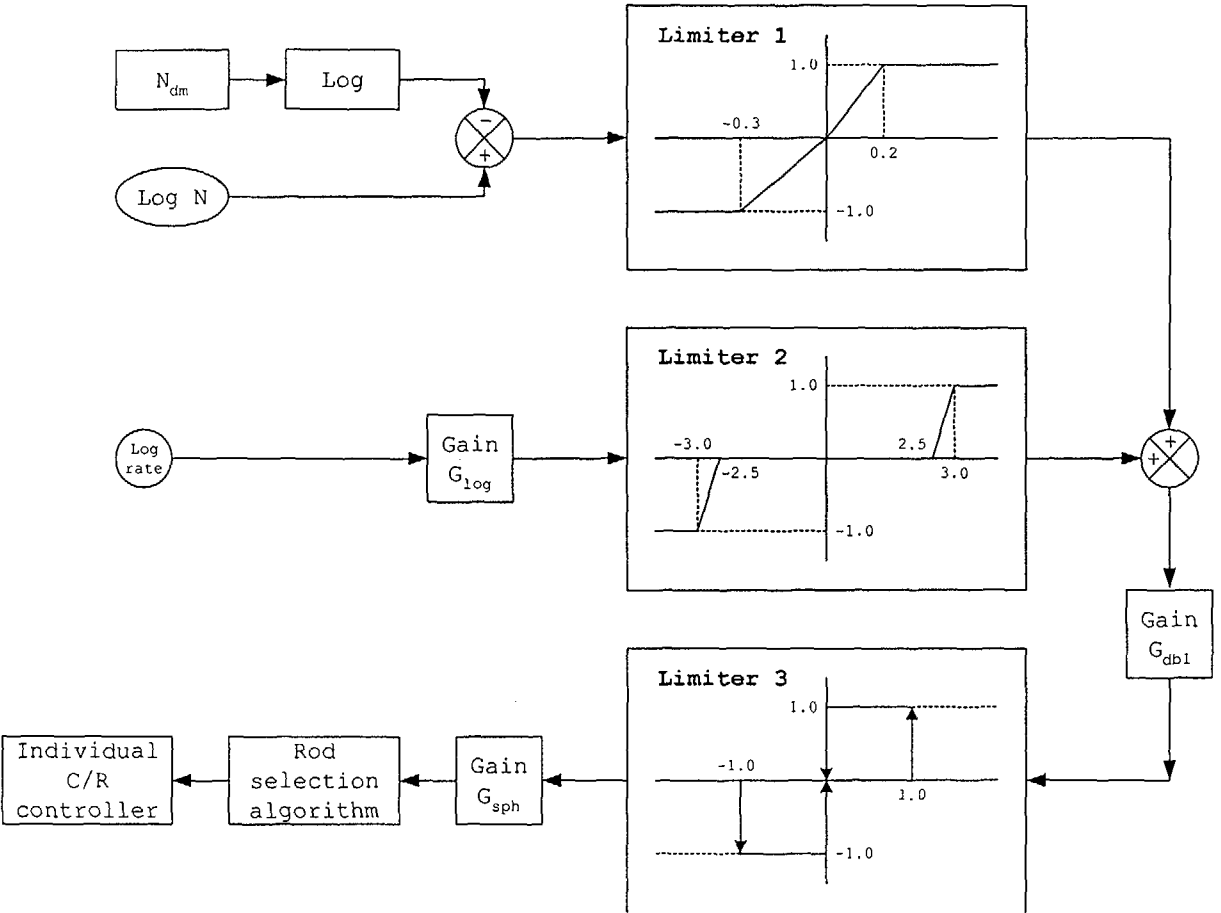
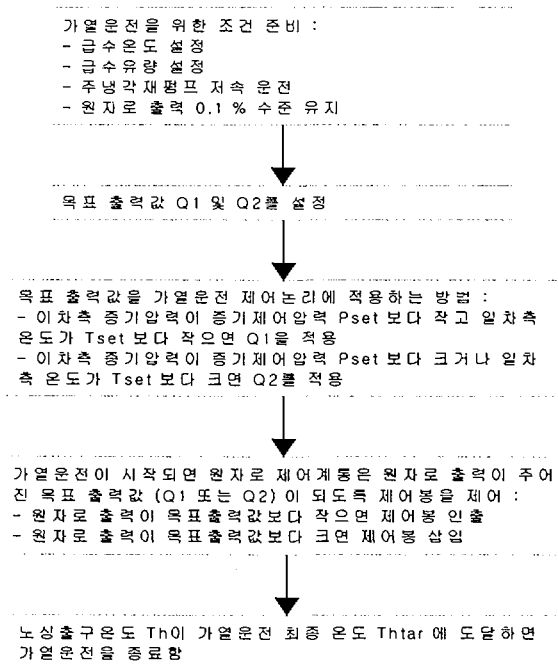


그림 1. 핵적 기동 운전 제어논리도



< 다단계 출력 설정의 흐름도 >

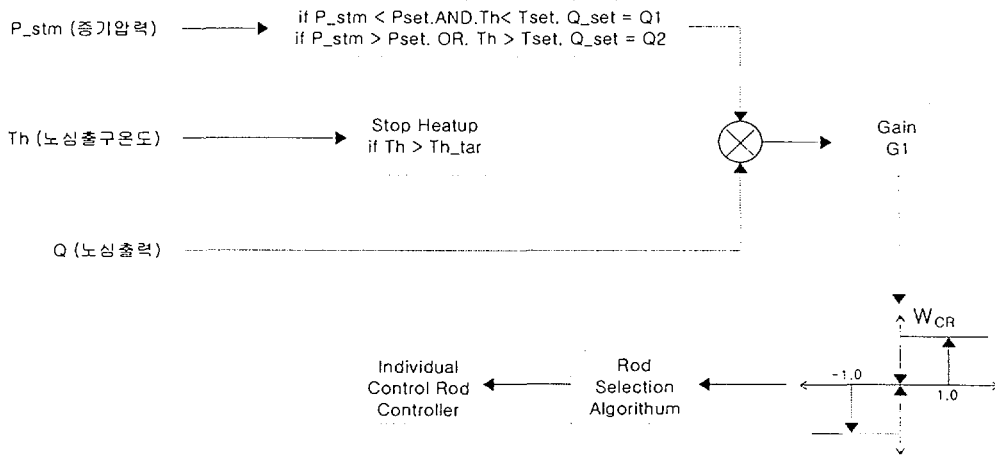
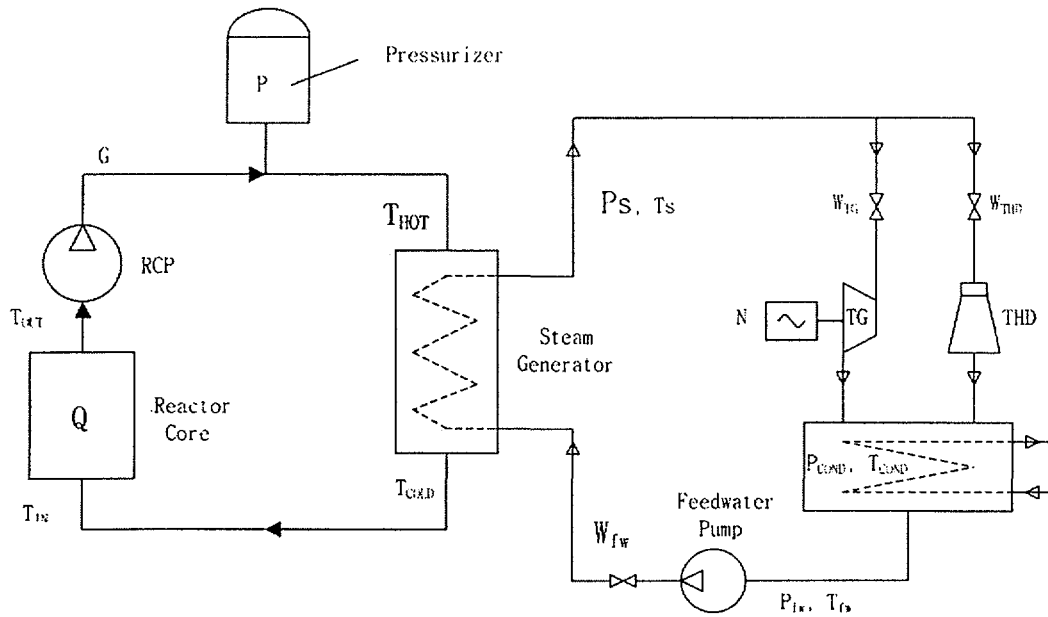


그림 2. 원자로 가열운전 제어논리도



제어 변수	영향 변수
Q : 중성자 출력	P : 가압기 압력
G : 일차측 유량	T _{COLD} : 일차측 증기발생기 출구 온도
T _{HOT} : 일차측 증기발생기 입구 온도	T _{IN} : 노심 입구 온도
W _{FW} : 주급수 유량	T _{OUT} : 노심 출구 온도
P _S : 주증기 압력	T _S : 주증기 온도
N : 터빈 속도	T _{FW} : 주급수 온도
	P _{FW} : 주급수 압력
	W _{TG} : 터빈 유량
	W _{THD} : THD 우회 유량
	P _{COND} : 복수기 압력
	T _{COND} : 복수기 온도

그림 3. 핵증기공급계통 열평형도 및 제어 변수

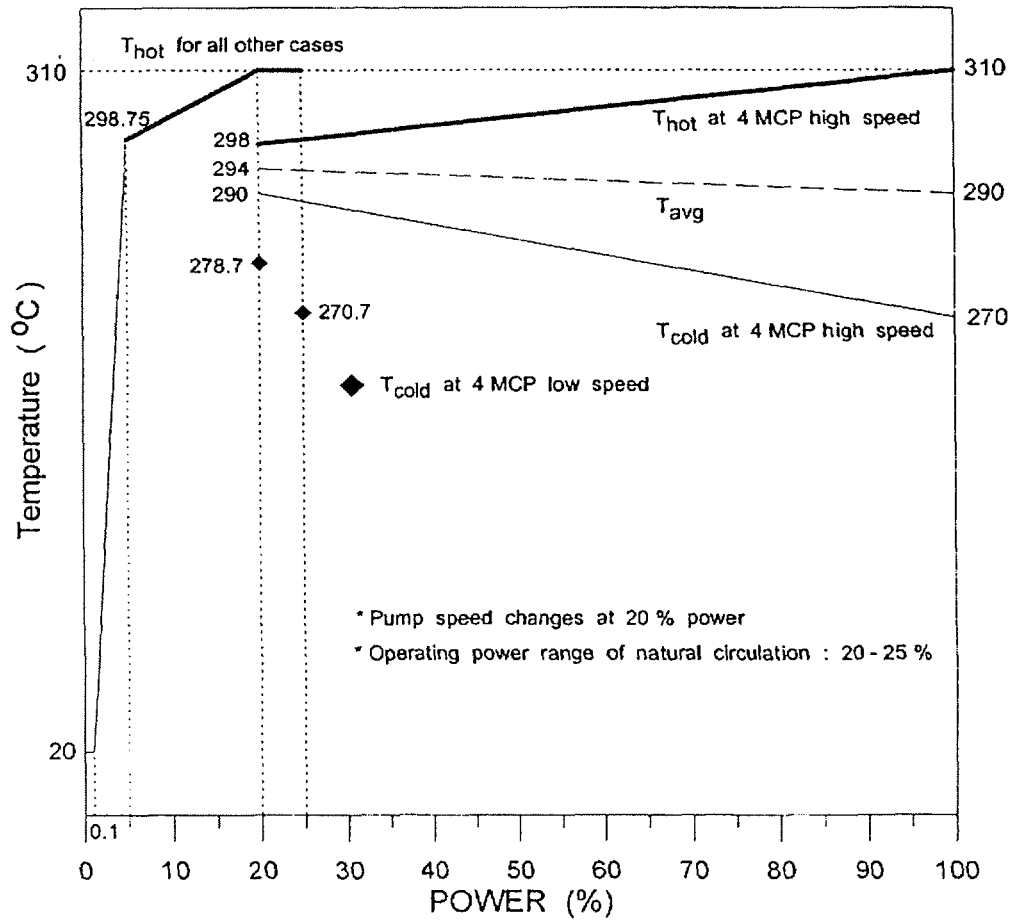


그림 4. 출력-기준 냉각재 온도 프로그램

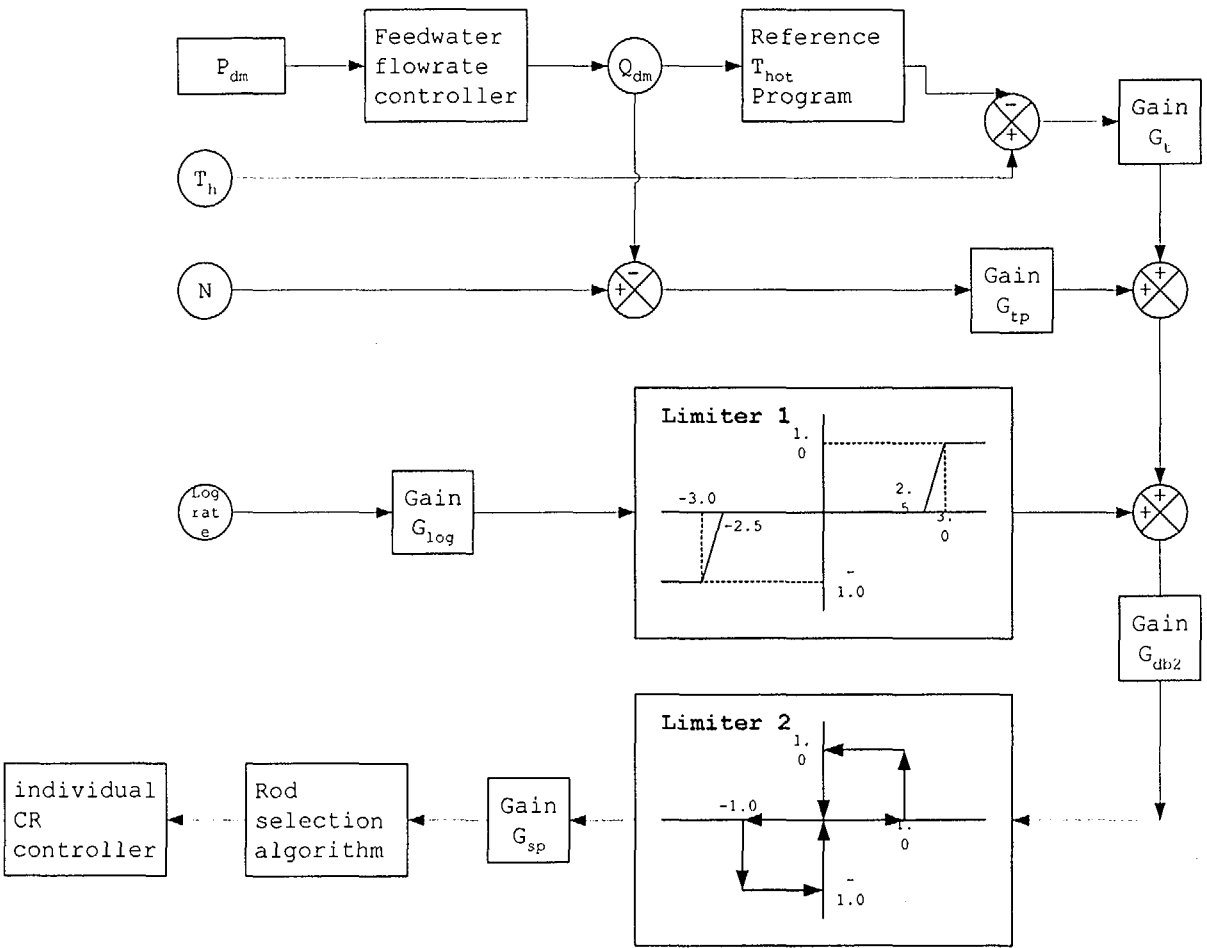
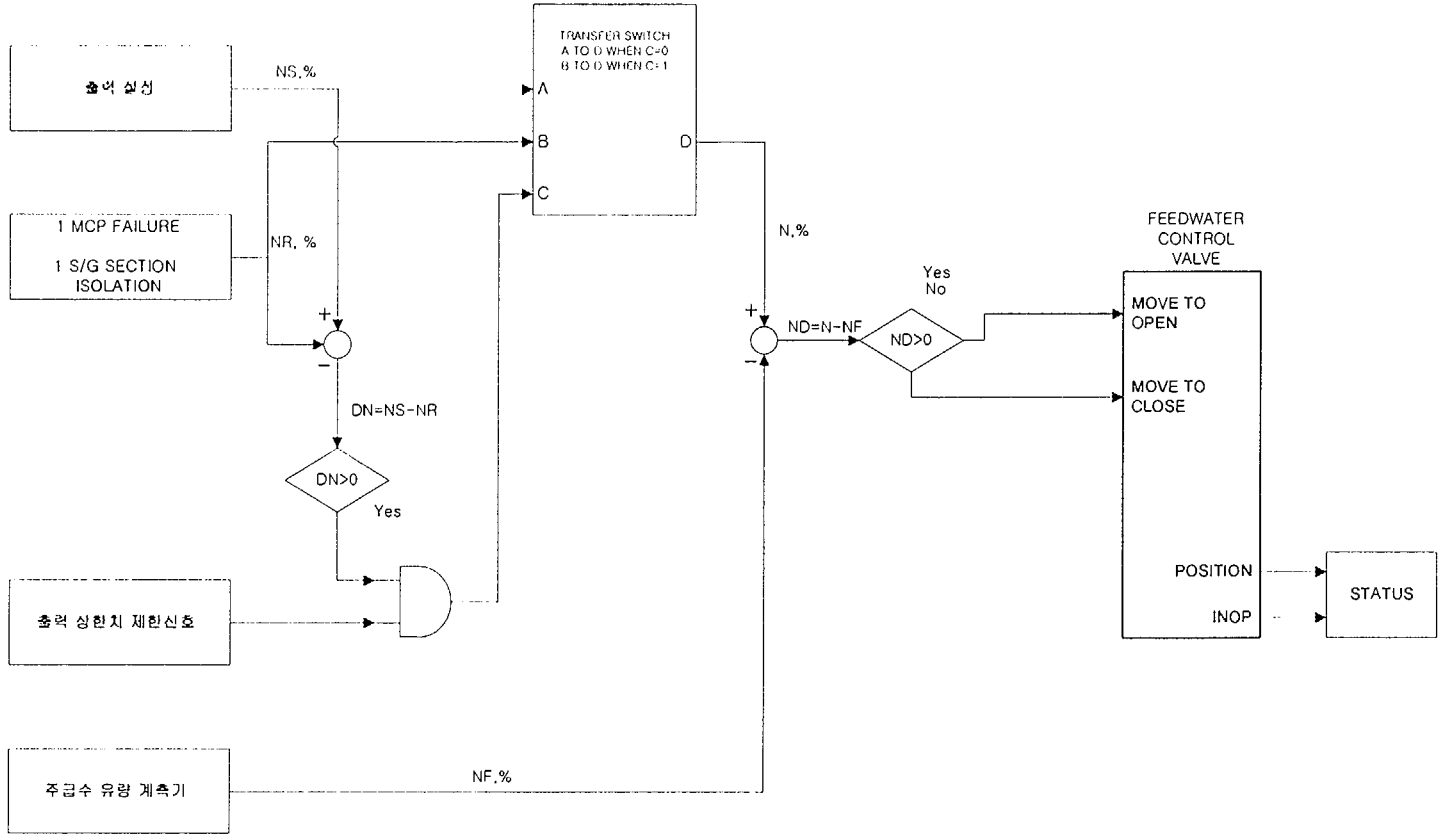
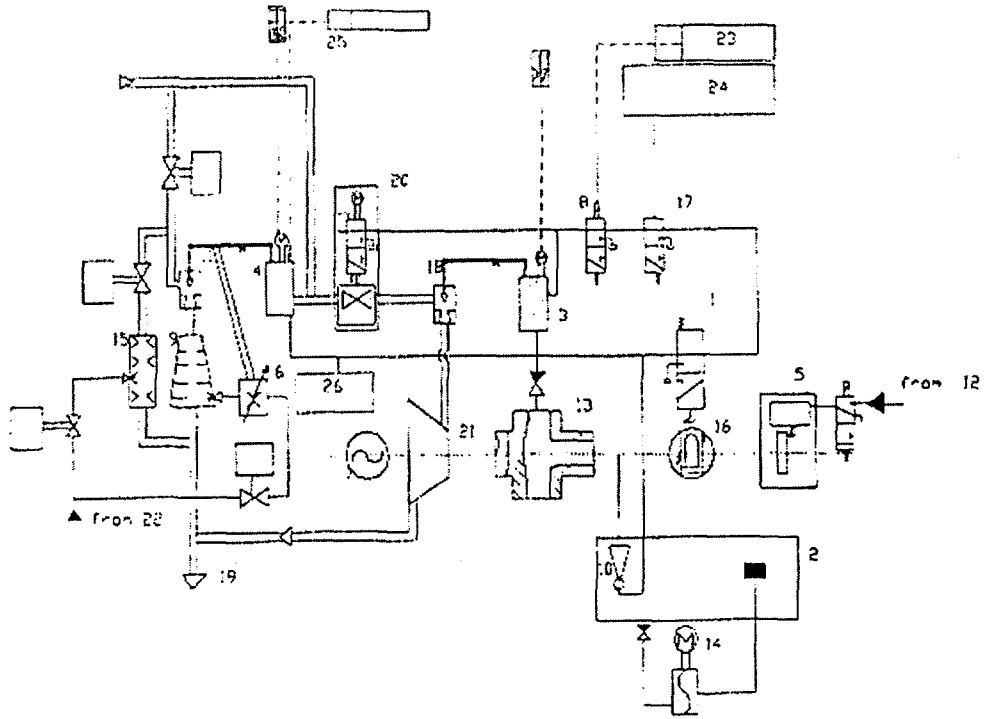


그림 5. 기동 및 출력운전 제어논리도

그림 6. 주급수 유량 제어논리도





4 - 증기압 제어계통, 9 - 가슴조절기, 15 - 기동냉각기
 18 - 터빈제어밸브, 20 - 터빈정지밸브, 21 - 터빈

< 가슴조절기와 터빈의 연계 설계도 >

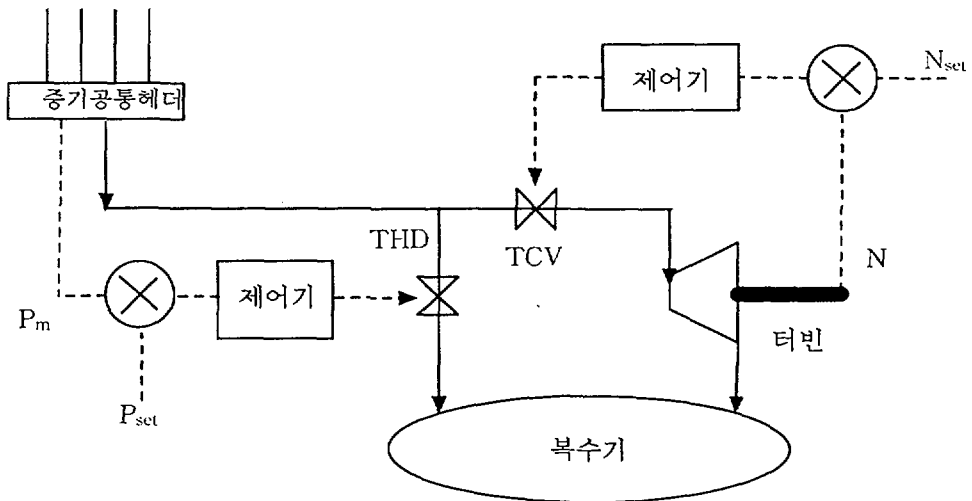
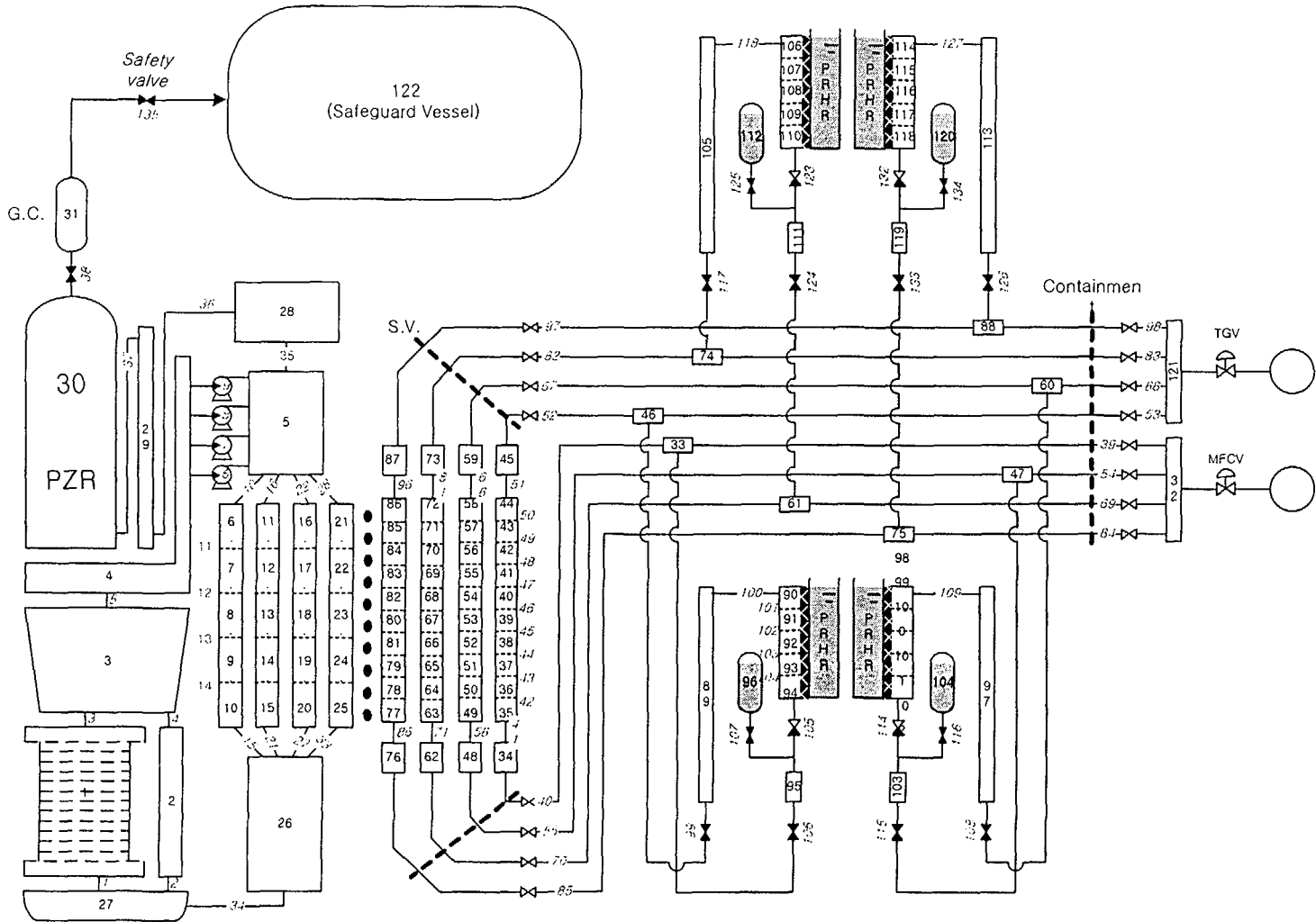


그림 7. 주증기 압력 및 증기 우회 제어 논리

그림 8. SMART 성능분석용 TASS/SWR 모델



TASS Node Numbering	관련 계통	TASS Path Numbering	관련 계통
1	노심	1	노심 입구
2	노심 우회 영역	2	노심 우회 영역 입구
3	노심 상부	3	노심 출구
4	노심상부 환형부와 펌프 흡입부	4	노심 우회 영역 출구
5	펌프 방출부와 일차측 증기발생기 입구부	5	노심 상부와 펌프 흡입부사이의 연결부
6~10, 11~15, 16~20, 21~25	증기발생기 일차측 (4 트레인)	6, 7, 8, 9	4개의 냉각재 펌프
26	일차측 증기발생기 출구부와 하향부	10, 16, 22, 28	일차측 증기발생기 입구
27	노심 하부	11~14, 17~20, 23~26, 29~32	일차측 증기발생기 내부
28	가압기 환형공동	15, 21, 27, 33	일차측 증기발생기 출구
29	가압기 중간공동	34	하향부와 노심 하부사이의 연결부
30	가압기 중앙공동	35	펌프방출부와 가압기 환형공동과의 연결부
31	개스 실린더	36	가압기 환형공동과 중간공동사이의 연결부
32	주급수 공통 헤더	37	가압기 중간공동과 중앙공동과의 연결부
33, 47, 61, 75	급수공통헤더부터 급수 노즐까지의 급수관	38	개스실린더 차단밸브
34, 48, 62, 76	압력용기내 급수관	39, 54, 69, 84	주급수 격리밸브
35~44, 49~58, 63~72, 77~86	증기발생기 나선형 튜브	40, 55, 70, 85	급수 섹션 차단밸브
45, 59, 73, 87	압력용기내 증기관	41, 56, 71, 86	급수 오리피스
46, 60, 74, 88	증기 노즐부터 증기공통헤더까지의 증기관	42~50, 57~65, 72~80, 87~95	증기발생기 튜브 내부
121	주증기 공통 헤더	51, 66, 81, 96	증기발생기 튜브 출구
89, 97, 105, 113	PRHR 입구 배관	52, 67, 82, 87	증기 섹션 차단밸브
90~94, 98~102, 106~110, 114~118	PRHR 열교환기 튜브	53, 68, 83, 98	주증기 격리밸브
95, 103, 111, 119	PRHR 출구 배관	99, 108, 117, 126	PRHR 입구 차단밸브
96, 104, 112, 120	PRHR 보상 탱크	100, 109, 118, 127	PRHR 열교환기 입구
		101~104, 110~113, 119~122, 128~131	PRHR 열교환기 내부
		105, 114, 123, 132	PRHR 출구 체크밸브
		106, 115, 124, 133	PRHR 출구 차단밸브
		107, 116, 125, 134	PRHR 보상탱크 차단밸브

그림 8. SMART 성능분석용 TASS/SMR 모델(계속)

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-1798/2001			
제목 / 부제	SMART 성능해석 방법론		
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)	임 홍 식 (동력로기술개발팀)		
연구자 및 부서명	김 희 철 (동력로기술개발팀) 이 두 정 (동력로기술개발팀)		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	57 p.	도표	있음(○), 없음()
발행년	2001. 4.	크기	26 Cm.
참고사항			
비밀여부	공개(○), 대외비(), — 급비밀	보고서종류	기술보고서
연구위탁기관		계약번호	
초록 (15-20줄내외)	<p>SMART 핵증기공급계통 설계를 위한 성능 분석은 발전소 수명동안 요구되거나 목표로 하는 성능을 보장하기 위한 수단으로 성능관련 설계기준사건들에 대해 정해진 분석 방법론에 따라 수행된다. 성능관련 설계기준사건은 발전소 설계시 반영되어야 하는 핵증기공급계통 과도 사건을 말하며, 성능관련 설계기준사건의 발생 결과가 발전소 기기의 정상운전 영향보다 더 큰 영향을 미쳐서는 안된다. 성능해석 방법론은 성능관련 설계기준사건을 분석하기 위한 방법 및 절차를 체계화하는 것으로 다음과 같이 정리할 수 있다. 핵증기공급계통 특성에 맞는 운전 모드에 근거하여 성능관련 설계기준사건 및 이 사건들에서 공정 변수의 허용범위를 도출한다. 각 운전 모드의 특성에 적절한 제어 논리를 개발한 다음, 계통의 열수력 거동을 분석할 수 있는 전산코드를 이용하여 선정된 성능관련 설계기준사건들에 대해 계통 분석을 수행한다. 특히 SMART의 경우 기존 상용로와는 다른 계통 특성으로 인해 SMART에 맞는 운전 모드, 성능관련 설계기준사건, 제어 논리 그리고 분석 코드 체계를 갖추어야 한다.</p> <p>본 보고서는 각 운전모드 혹은 운전모드간의 천이 등으로부터 도출된 성능관련 설계기준사건의 목록 및 이 사건들에서 만족되어야 할 허용기준을 체계화하였다. 또한 각 운전모드에서의 제어논리 개념 및 각 성능관련 설계기준사건들에 대해 상세한 분석 방법 및 절차도 제시하고 있다. 따라서 본 보고서는 현재까지 진행된 SMART 설계를 바탕으로 SMART 성능분석을 위한 전반적인 체계를 정립한 것으로, 상세 성능분석을 위한 지침서로서 활용될 것이다.</p>		
주제명키워드 (10단어내외)	SMART, 성능 분석, 해석 방법론, 성능관련 설계기준사건, 제어 논리, 운전 모드, TASS/SMR		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-1798/2001			
Title / Subtitle	SMART Performance Analysis Methodology		
Project Manager and Department (or Main Author)	H. S. Lim (Reactor Technology Development Team)		
Researcher and Department	H. C. Kim (Reactor Technology Development Team) D. J. Lee (Reactor Technology Development Team)		
Publication Place	Taejon	Publisher	Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)
			Publication Date
			2001. 4.
Page	57 p.	Ill. & Tab.	Yes(<input type="radio"/>), No (<input type="radio"/>)
			Size
			26 Cm.
Note			
Classified	Open(<input type="radio"/>), Restricted(<input type="checkbox"/>), ___ Class Document	Report Type	Technical Report
Sponsoring Org.		Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)	<p>To ensure the required and desired operation over the plant lifetime, the performance analysis for the SMART NSSS design is done by means of the specified analysis methodologies for the performance related design basis events(PRDBE). The PRDBE is an occurrence(event) that shall be accommodated in the design of the plant and whose consequence would be no more severe than normal service effects of the plant equipment. The performance analysis methodology which systematizes the methods and procedures to analyze the PRDBEs is as follows. Based on the operation mode suitable to the characteristics of the SMART NSSS, the corresponding PRDBEs and allowable range of process parameters for these events are deduced. With the developed control logic for each operation mode, the system thermalhydraulics are analyzed for the chosen PRDBEs using the system analysis code. Particularly, because of different system characteristics of SMART from the existing commercial nuclear power plants, the operation mode, PRDBEs, control logic, and analysis code should be consistent with the SMART design.</p> <p>This report presents the categories of the PRDBEs chosen based on each operation mode and the transition among these and the acceptance criteria for each PRDBE. It also includes the analysis methods and procedures for each PRDBE and the concept of the control logic for each operation mode. Therefore this report in which the overall details for SMART performance analysis are specified based on the current SMART design, would be utilized as a guide for the detailed performance analysis.</p>		
Subject Keywords (About 10 words)	SMART, Performance Analysis, Analysis Methodology, PRDBE, control logic, operation mode, TASS/SMR		