

APR1400 탄력운전

2026년 5월 6일

민지홍

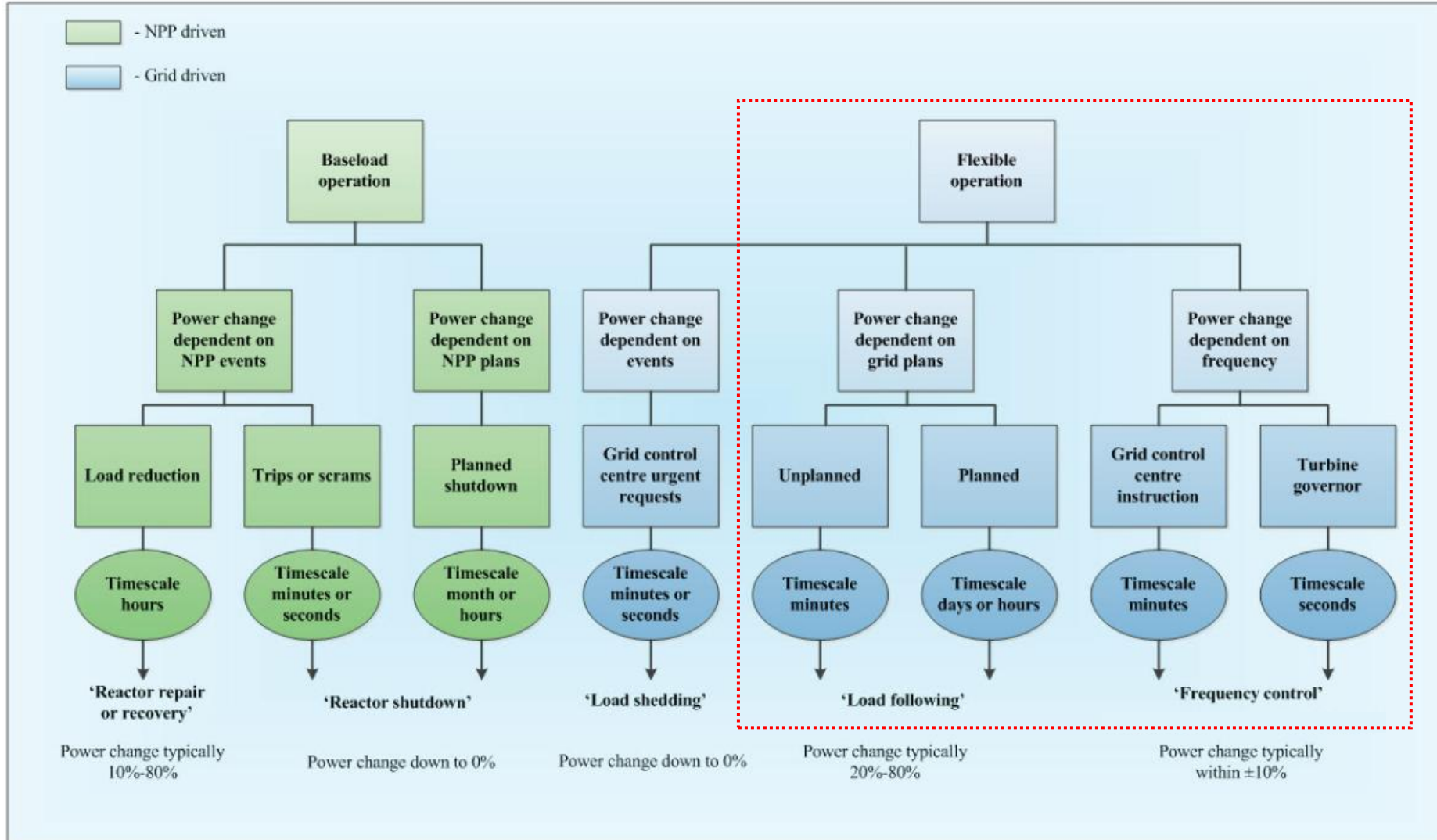
Contents

- 1. 탄력운전의 정의, 종류 및 특징**
- 2. 탄력운전의 제어**
 - 터빈
 - NSSS
 - 노심
- 3. APR1400 탄력운전 적용**



1. 탄력운전의 정의, 종류 및 특징

출력 조절 방식에 따른 운전 형태 분류



운전 형태별 특징

기저부하운전 (Baseload Operation)

장점

- 경제성 높음
- 효율 안정
- 설비 수명 유리
- 계통 안정성 높음
- 운전 단순

단점

- 유연성 부족
- 수요 대응 어려움
- 재생에너지와 충돌
- 잉여전력 발생
- 정지 시 영향 큼

탄력운전 (Flexible Operation)

장점

- 유연성 높음
- 수요 대응 용이
- 재생에너지 친화적
- 전력시장 대응력 높음
- 전력망 운영 최적화

단점

- 경제성 저하
- 효율 감소
- 설비 피로 증가
- 유지보수 비용 증가
- 운전 복잡성 증가

탄력운전의 종류 및 예시

부하추종운전

전력 수요의 변동에 맞추어 발전소의 출력을 능동적으로 증감시키는 운전 방식
100-50-100(%), 14-2-6-2(hr) 등 사전에 정의된 계획에 따른 시간 단위 출력 조절

국부주파수제어운전

계통 주파수의 변동에 즉각 대응하여 발전기가 자체적으로 출력을 자동 조정하는 운전 방식
2~3%p 내의 초 단위 출력 조절

원격주파수제어운전

전력거래소의 지시에 따라 발전소 출력이 조정되어 계통 주파수를 제어하는 운전 방식
5~10%p 내의 분 단위 출력 조절

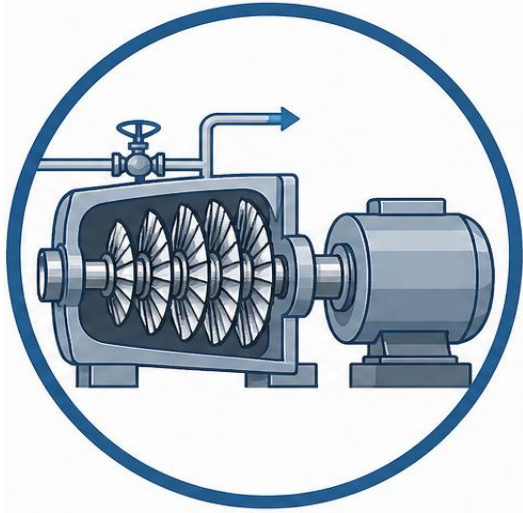
탄력운전의 예시

시간	상황	발전소 출력 조절 방식
오전 5시	전력거래소는 오전 8시부터 공장, 사무실 등의 가동으로 전력 수요 증가 예측	출력을 서서히 증가 (부하추종운전)
오전 8시	예측한 수요보다 실제 수요가 커서 전력망 내 주파수가 소폭 감소	외부 지시 없이 즉시 자동으로 출력을 올려 주파수 하락 억제 (국부주파수제어운전)
오전 9시	전력거래소가 전체 전력망 운전 상태 확인 후 안정화 착수	전력거래소가 직접 또는 발전소에 요구하여 발전소별 출력 재배치 (원격주파수제어운전)

2. 탄력운전의 제어

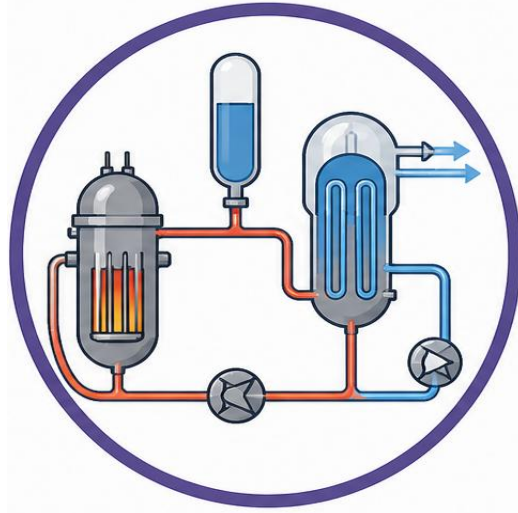
- 터빈
- NSSS
- 노심

탄력운전의 제어



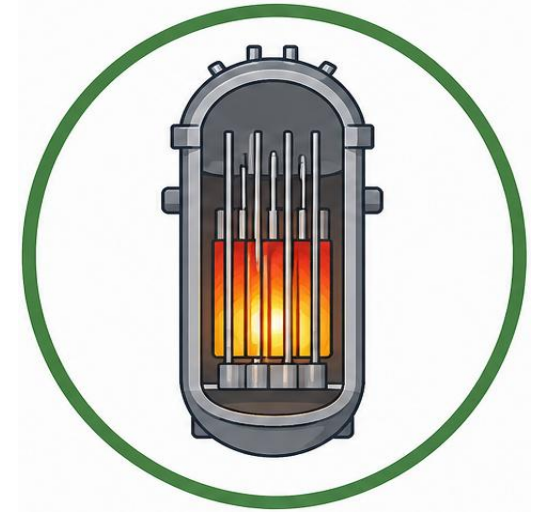
전력계통 연계 및 터빈 제어

- 탄력운전 형태에 따른 터빈 Governor Valve 제어



NSSS 주요 변수 제어

- 원자로 냉각재 온도 제어
- 가압기 압력 및 수위 제어
- 증기발생기 수위 제어



노심 반응도 및 출력분포 제어

- 제논 생성 및 소멸 예측
- 제어봉 운전 전략
- 붕소 농도 조절 전략

탄력운전의 제어 (터빈)

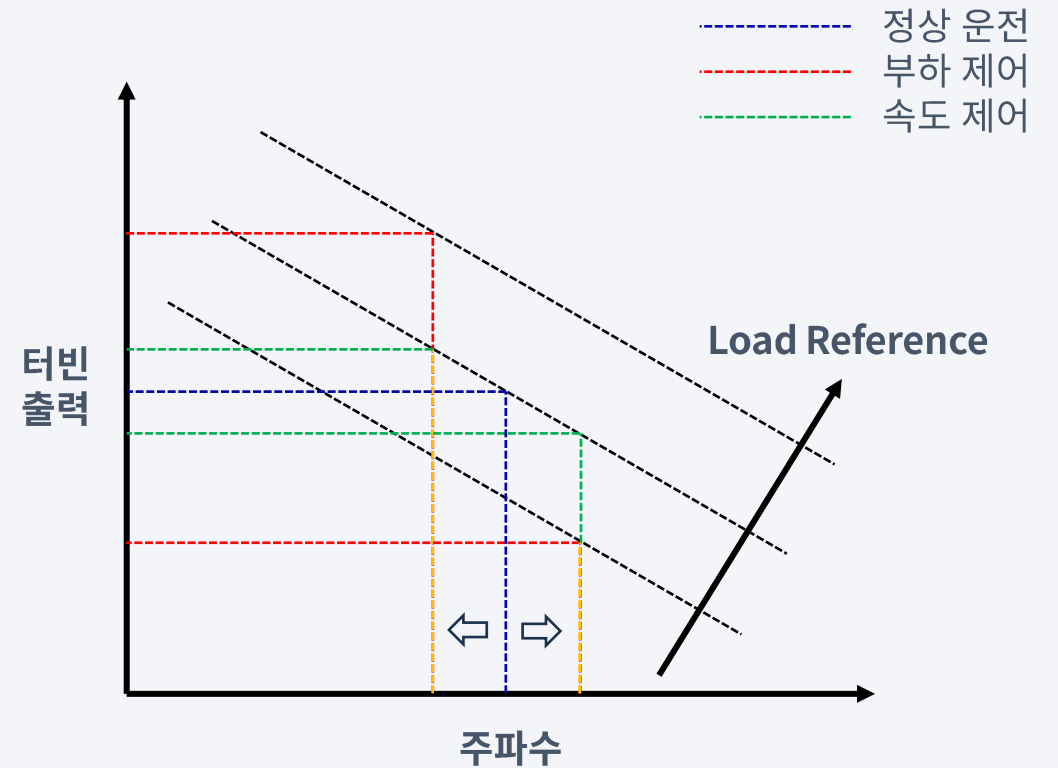
제어 방식에 따른 분류

부하 제어

- 터빈 부하의 기준 설정값(Load Reference) 변화에 의한 터빈 출력 조절
- 터빈 속도 변화는 거의 없음.
- 일반적인 출력 조절, 부하추종운전, 원격주파수제어운전

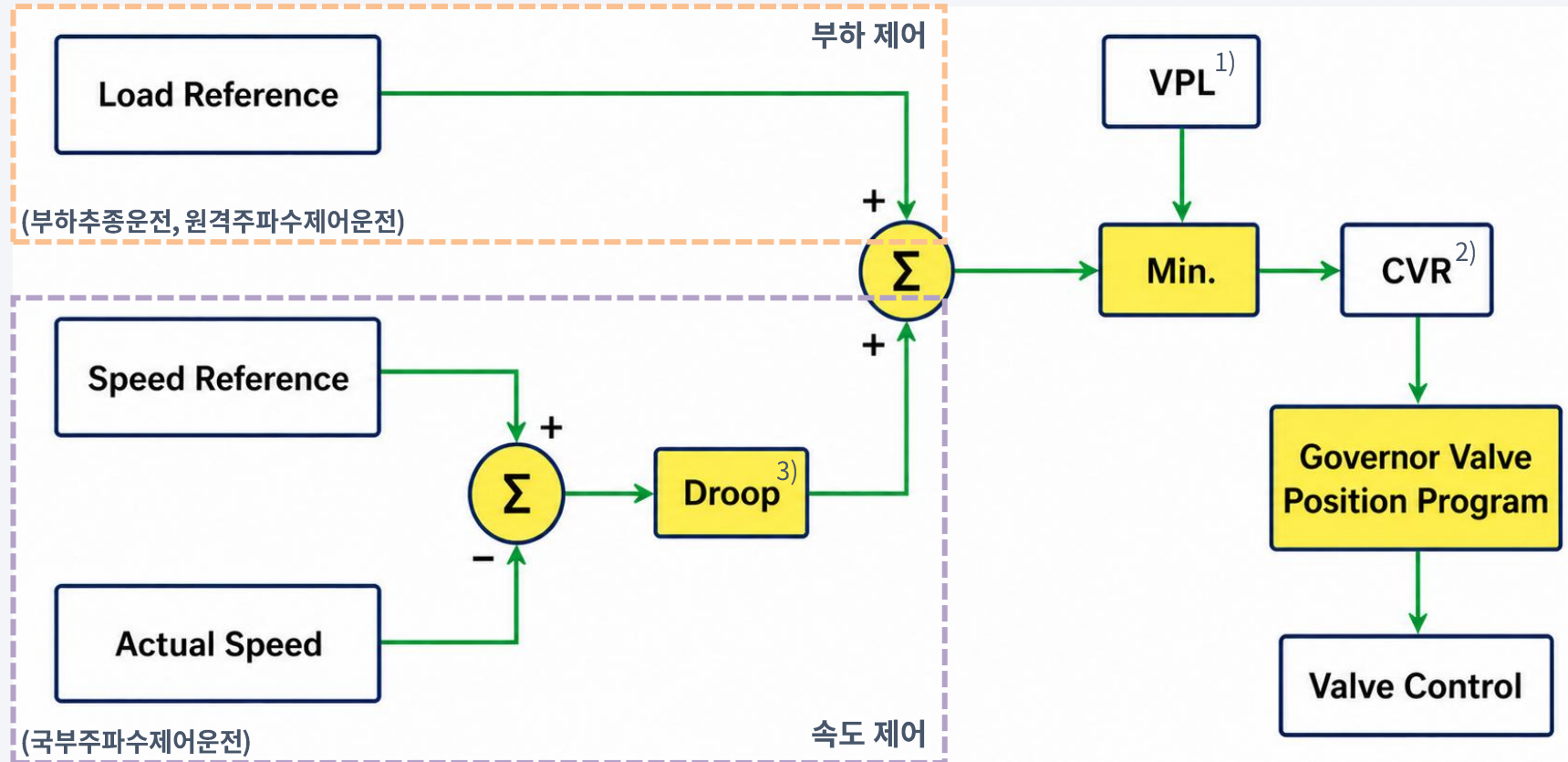
속도 제어

- 터빈 속도의 설정값과의 편차의 크기와 droop 설정에 의한 터빈 출력 조절
- Load Reference 변화 없음.
- 국부주파수제어운전



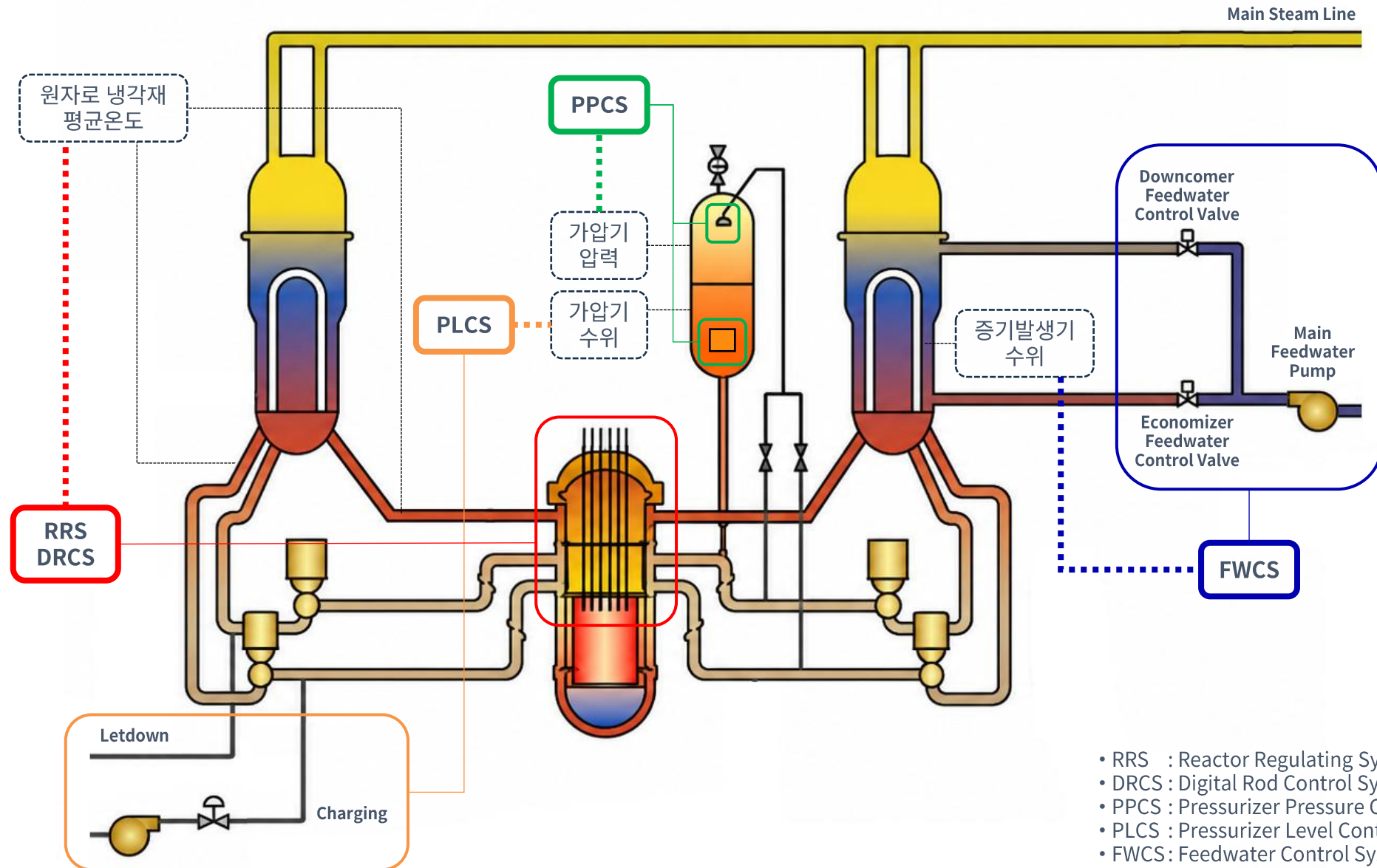
탄력운전의 제어 (터빈)

터빈 Governor Valve 제어 논리



- 1) VPL : Valve Position Limit, 일반적으로 현재의 Load Reference에 +1%p로 설정
- 2) CVR : Control Valve Reference, Governor Valve의 특성곡선을 반영하여 유량 보정
- 3) Droop : $\Delta\text{frequency}/\Delta\text{load}$

탄력운전의 제어 (NSSS)



- RRS : Reactor Regulating System
- DRCS : Digital Rod Control System
- PPCS : Pressurizer Pressure Control System
- PLCS : Pressurizer Level Control System
- FWCS : Feedwater Control System

탄력운전의 제어 (NSSS)

터빈 부하 감소 시 NSSS 제어계통에 의한 주요 변수 자동제어



※ 상기의 NSSS 주요 변수 거동 및 제어 흐름은 터빈 부하 감소의 크기와 속도에 따라 달라질 수 있음.

탄력운전의 제어 (노심)

반응도 제어

제어 방법	장점	단점
냉각재 온도변화에 따른 반응도 제한 효과 (MTC ¹⁾ 효과) 활용	<ul style="list-style-type: none">• 매우 빠른 반응도 제어• 별도 조작 없이 자연적으로 작동	<ul style="list-style-type: none">• 수용 가능한 터빈 부하 변화량이 적음. (원자로 냉각재 온도 변화 제한)• 핵연료 주기에 따라 제어능 차이가 큼.
제어봉 사용	<ul style="list-style-type: none">• 빠른 반응도 제어	<ul style="list-style-type: none">• 출력분포에 큰 영향을 미침.• 제어봉 삽입한계에 따라 활용도가 제한됨.
봉소 농도 조절	<ul style="list-style-type: none">• 출력분포에 미치는 영향 거의 없음.	<ul style="list-style-type: none">• 반응도 제어 속도가 매우 느림. 이에 따라 자동운전이 어려움.• 주기말 봉소 희석 능력 제한됨.• 방사성 폐기물량이 증대됨.

1) MTC : Moderator Temperature Coefficient

탄력운전의 제어 (노심)

출력분포 제어: 제어봉이 유일한 제어 수단

문제점

- 출력변화 대비 지연되어 나타나는 제논에 의한 출력분포 비선형 왜곡
- 유일한 제어수단은 제어봉이나, 제어봉 삽입한계 등에 의해 한계 존재
- 무봉산에 가까워지는 주기말로 갈수록 심화됨.

제논의 생성 및 소멸이 반응도 제어에 미치는 영향

- 출력 증가 시: 제어봉을 모두 인출해도 출력 증발량 부족 → 원자로 냉각재 온도 감소 → 원자로 냉각재 온도 운전제한조건 위반
- 출력 감소 시: 제어봉 삽입 → 제어봉 삽입한계 운전제한조건 위반
- 결과적으로 반응도 제어 실패

탄력운전의 제어 (노심)

탄력운전을 위한 이상적인 제어봉 설계

설계기준

- 반응도와 출력분포의 동시 제어를 위한 제어봉 구성 필요

반응도 제어

- 작은 제어봉가를 갖는 제어봉 여러 개를 구성하여 삽입/인출에 의한 출력분포에 대한 영향을 최소화

출력분포 제어

- 제어봉가가 큰 제어봉을 노심 최상부에서만 움직여 출력분포의 상부편향 문제를 해결함과 동시에 출력에 대한 영향 최소화

탄력운전의 제어 (종합)

탄력운전 종류에 따른 제어 전략

	국부주파수제어운전	원격주파수제어운전	부하추종운전
터빈	<ul style="list-style-type: none"> • 속도 제어 운전 	<ul style="list-style-type: none"> • 부하 제어 운전 	
NSSS	<ul style="list-style-type: none"> • 가압기 압력/수위 제어 : PPCS/PLCS • 증기발생기 수위 제어 : FWCS • 원자로 냉각재 온도 제어 : 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 가압기 압력/수위 제어 : PPCS/PLCS • 증기발생기 수위 제어 : FWCS • 원자로 냉각재 온도 제어 : RRS/DRCS 	
노심 (반응도)	<ul style="list-style-type: none"> • MTC 효과 활용 	<ul style="list-style-type: none"> • 제어봉 사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 붕소 농도 조절
노심 (출력분포)	<ul style="list-style-type: none"> • 제어 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 제어봉 사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 제어봉 사용



3. APR1400 탄력운전 적용

APR1400 탄력운전 적용

성능 목표

우선 적용 대상 원전 : 새울 1,2호기

부하추종운전

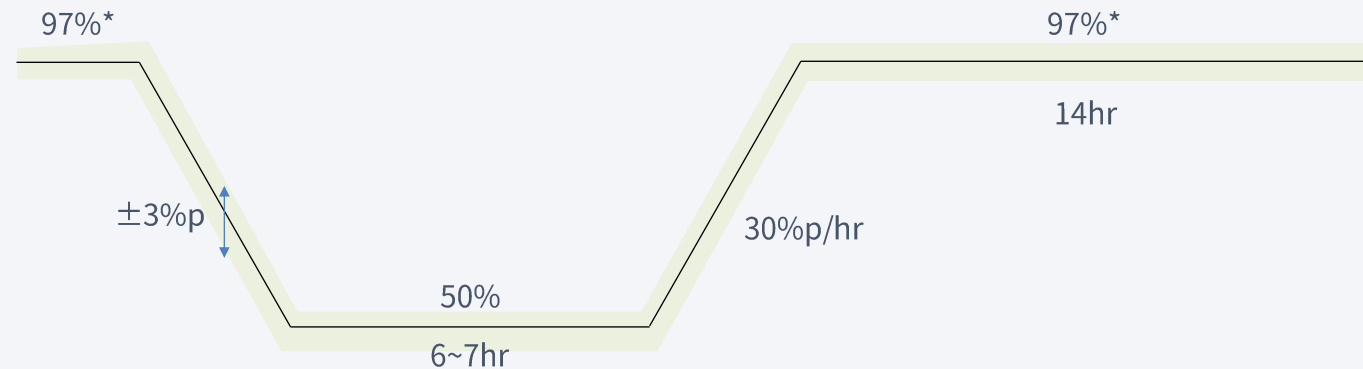
- 최소 부하 : 50%
- 최대 출력 변동률 : 시간당 30%
- 연간 200회

국부주파수제어운전

- $\pm 3\%p$ 부하 변동 내 주파수 제어

원격주파수제어운전

- 미적용



* 국부주파수제어운전을 고려한 임의의 정격 출력운전 값이며, 사업자의 결정에 따라 달라질 수 있음.

APR1400 탄력운전 적용

원격주파수제어운전의 적용이 현실적으로 어려운 이유

원자력 안전법과 충돌

(단, 관련법 개정을 통해, 또는 전력거래소의 제한적 개입(출력 변경 지령)으로 해결 가능)

- 원자로 운전은 허가 받은 사업자만 수행 (제20조)
- 실제 조작은 면허 운전원만 가능 (제27조)
- 운전은 승인된 절차 내에서만 가능 (제23조)
- 안전책임은 사업자에게 있음 (제26조)

기술적 문제

- 국부주파수제어운전 대비 큰 터빈 부하 변화로 반응도 제어에 제어봉 사용 필수적 → 제어봉 구동장치 교체 주기 단축
- 출력 복구가 지연될 경우 제논에 의한 영향을 피할 수 없고, 이에 따른 반응도 및 출력분포 제어가 매우 어려움.
 - 제어봉 사용 시, 출력 복구 과정에서 조절제어봉의 제어능 부족 문제
 - 붕소 농도 조절 시, 출력분포 제어 불가

APR1400 탄력운전 적용

APR1400 부하추종운전 사례

간헐적 부하 변동 운전을 제외하면, 출력상승시험 시 1회성 수행이 유일함.

- 터빈 : 터빈제어계통에 Load Target, Load Rate 입력하여 부하 제어
- NSSS : DRCS는 수동 제어 모드, PPCS/PLCS/FWCS는 자동 제어 모드
- 노심 반응도 제어 : 붕소농도 조절로 수행
- 노심 출력분포 제어 : 조절제어봉 또는 부분강제어봉 수동 삽입/인출

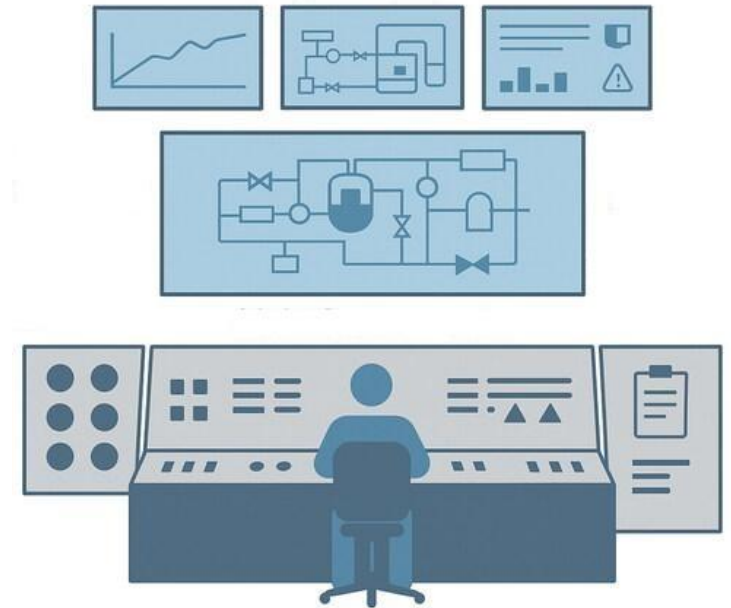
출력상승시험 시의 부하추종운전 전략을 실제 적용하기 어려운 이유

- 부하추종운전을 수행하는 동안 DRCS를 수동 제어 모드로 설정함에 따라 조절제어봉 자동 삽입/인출 불가
- 이에 따라 부하추종운전 도중 과도조건 발생 시 원자로 정지 가능성 증가
→ 연간 200회 수행을 고려할 때, 가동률/성능의 상당한 저하 초래

APR1400 탄력운전 적용

현실적인 부하추종운전 전략

터빈	<ul style="list-style-type: none"> 부하 제어 목표 값 입력 : 수동 터빈 Governor Valve 제어 : 자동
NSSS	<ul style="list-style-type: none"> 가압기 압력/수위 제어 : 자동(PPCS/PLCS) 증기발생기 수위 제어 : 자동(FWCS) 원자로 냉각재 온도 제어 : 자동(RRS/DRCS)
노심 (반응도)	<ul style="list-style-type: none"> 봉소 농도 조절 : 수동(제어봉 삽입/인출 최소화 전략 사전 수립 필요) 제어봉 삽입/인출 : 자동(RRS/DRCS)
노심 (출력분포)	<ul style="list-style-type: none"> 봉소 농도 조절 : 수동(원자로 냉각재 온도 변화 유도) 제어봉 삽입/인출 : 자동(RRS/DRCS) 또는 필요시 수동 제어



**가장 중요한 것은 철저한 사전준비와
운전원의 경험, 상황판단 능력**

APR1400 탄력운전 적용을 위해 필요한 설계 변경

부하추종운전

부분강제어봉 자동제어 논리 개발 및 최적화

- 운전원의 부담 경감 및 조절제어봉 사용 저감 목적
- 출력분포 제어에 미치는 영향을 최소화하는 수준에서 보조적인 반응도 제어 수단으로 활용
- 부하추종운전 시에만 기능 활성화(수동)하여, 원자로 출력 변화에 따라 사전에 정의해둔 위치로 부분강제어봉 삽입/인출
- RRS에 부분강제어봉 자동제어 논리 추가

부분강제어봉 재질 변경

- 기존의 부분강제어봉 또는 조절제어봉으로는 주기말 출력 감소 시 상부편향되는 출력분포의 제어 불가능
- 부분강제어봉의 재질 변경(Inconel → AIC*) 을 통해 제어봉가를 상향하여 출력분포 제어 성능 확보

* AIC : Ag-In-Cd, 은-인듐-카드뮴 합금

APR1400 탄력운전 적용을 위해 필요한 설계 변경

국부주파수제어운전

조절제어봉이 반응도 제어에 개입하지 않도록 RRS 설계 변경

- 제어봉 구동장치 수명 확보 목적
- 터빈 부하 입력에 대해 Lag Filter 추가
- 원자로 출력과 터빈 부하간 Error 입력에 대한 Lead Filter의 Lead Time Constant 감소
- 원자로 냉각재 온도 Error 입력에 대한 Lead/Lag Filter의 Lead Time Constant 감소
- 제어봉 제어 불감영역 확장

원자로 냉각재 온도 운전제한치 변경

- 원자로 냉각재 온도 운전제한치에 의해 RRS 제어봉 제어 불감영역 확장이 제한적임.
- 성능요건($\pm 3\%p$) 만족을 위해 RRS에 의한 제어봉 제어 불감영역을 충분히 확장할 수 있도록 원자로 냉각재 온도 운전제한치 최적화 필요함.
(90% 출력 이상 조건에서도 저출력과 동일한 제한치를 갖도록 변경하는 등)
- 관련 안전해석 재수행 등이 요구됨.

APR1400 탄력운전 적용을 위해 필요한 설계 변경

제어봉 사용 빈도 증가에 따른 변경 필요사항

제어봉 삽입 감시 프로그램 개발

- 부하추종운전으로 조절제어봉 노심 내 삽입 운전 빈도 증가에 따라 장기 안정상태 삽입한계 위반 감시를 위한 알고리즘 개발 및 프로그램 개발 필요

제어봉 구동장치 교체방안 수립

- 제어봉 구동장치 수명 한계 도달 시 교체를 위한 절차 개발
- 제어봉 이동거리 평준화를 위한 제어봉 그룹 인가 변경 검토

APR1400 탄력운전 적용을 위해 필요한 설계 변경

주요 기기의 건전성 및 계통 성능 영향 평가

1) CVCS : Chemical and Volume Control System
2) BAC : Boric Acid Concentrator

주기기 기기 건전성 영향 평가

- 국부주파수제어운전에 의한 반복 하중 추가 고려에 따른 기기 건전성 평가 필요
- 탄력운전 적용에 의해 전출력이 아닌 부분 출력을 초기조건으로 고려 시 열수력 영향(운전 온도 변화 등) 평가 필요

CVCS 및 2차 계통 기기 성능 평가

- 잦은 붕소농도 변화가 리튬 농도에 미치는 영향(pH 유지) 및 기존 CVCS¹⁾ 설비(충전계통, 이온교환기 등)의 수용 가능성 평가 필요
- 2차 계통 기기들의 진동 또는 마모 등 성능 유지 측면에서의 검토 필요

노심 내 핵종 재고량 및 방사선원항 유효성 평가

- 출력 변화, 출력분포 변화, 제어봉 사용 증가 및 붕소 농도 변화 증가에 의한 선원항 계산방법론 유효성 평가

CVCS 폐기물 평가

- 붕소농도의 지속적 변화에 의해 증가하는 CVCS 폐기물 발생량 및 붕산수/보충수 요구량 평가 및 폐기물 처리 설비(BAC²⁾ 등의 수용 가능성 평가 필요

감사합니다.

jhmin@kepco-enc.com