

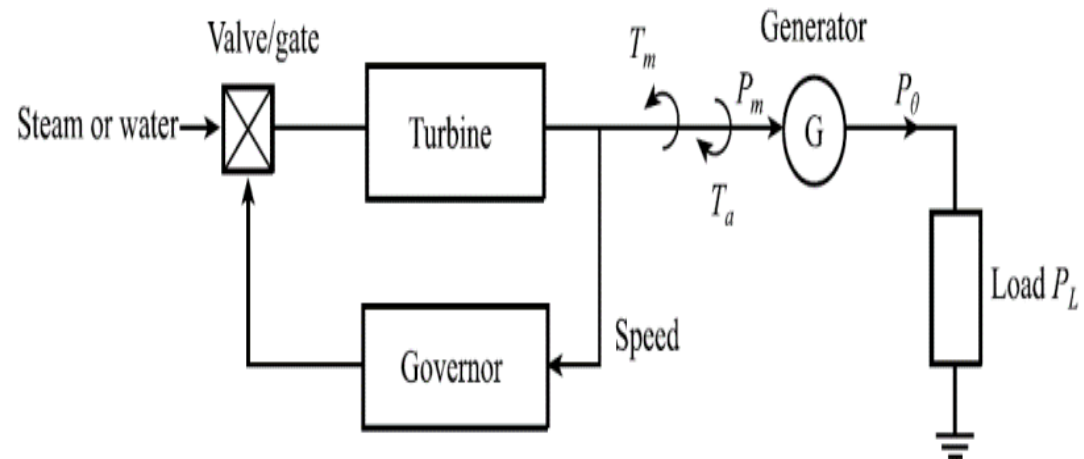
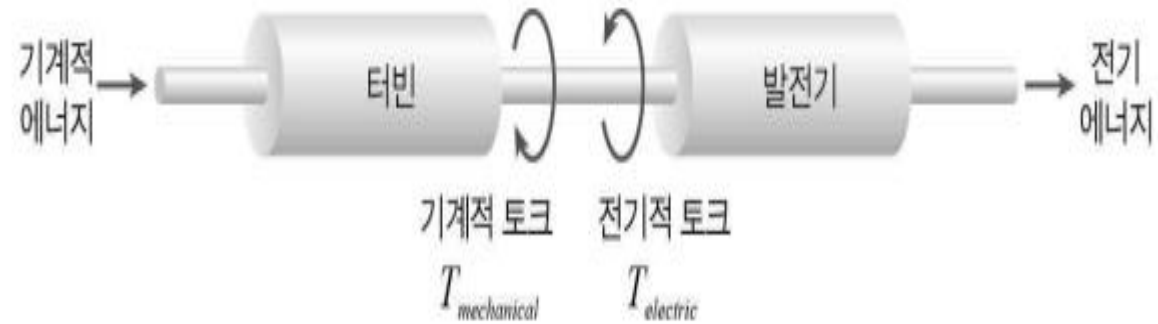
전력계통 운영 원리

2022. 10.

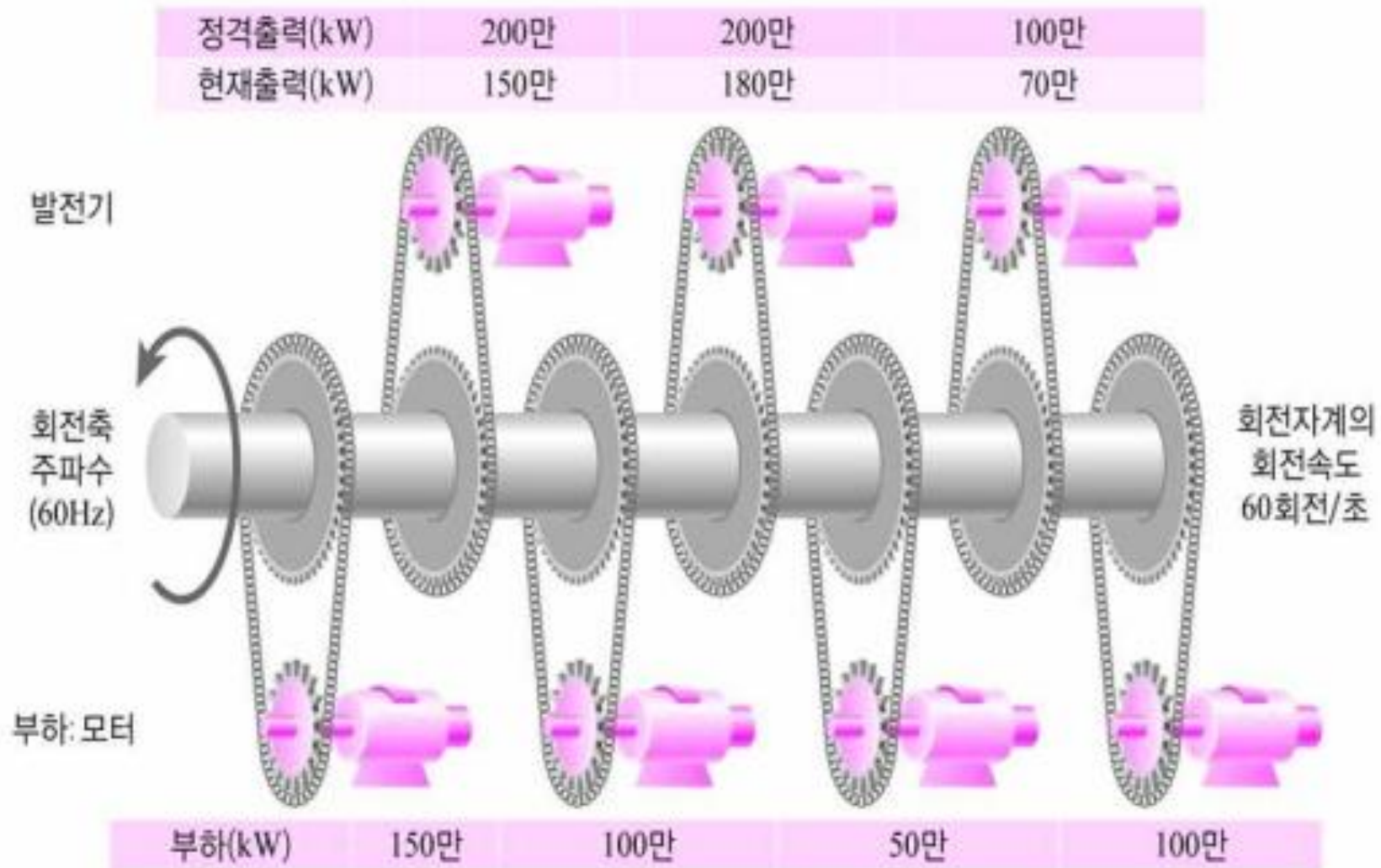
박상덕

서울대학교 원자력정책센터

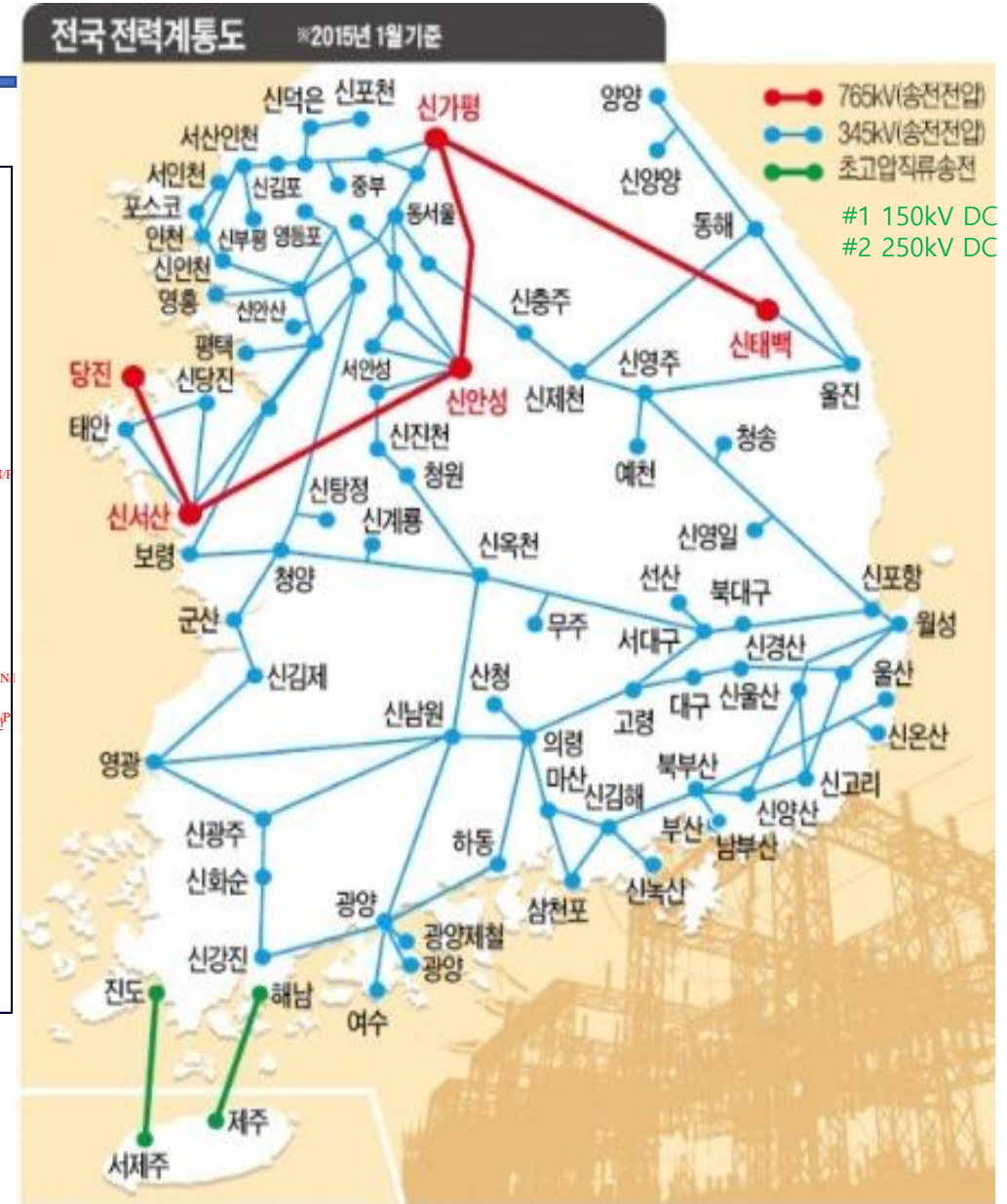
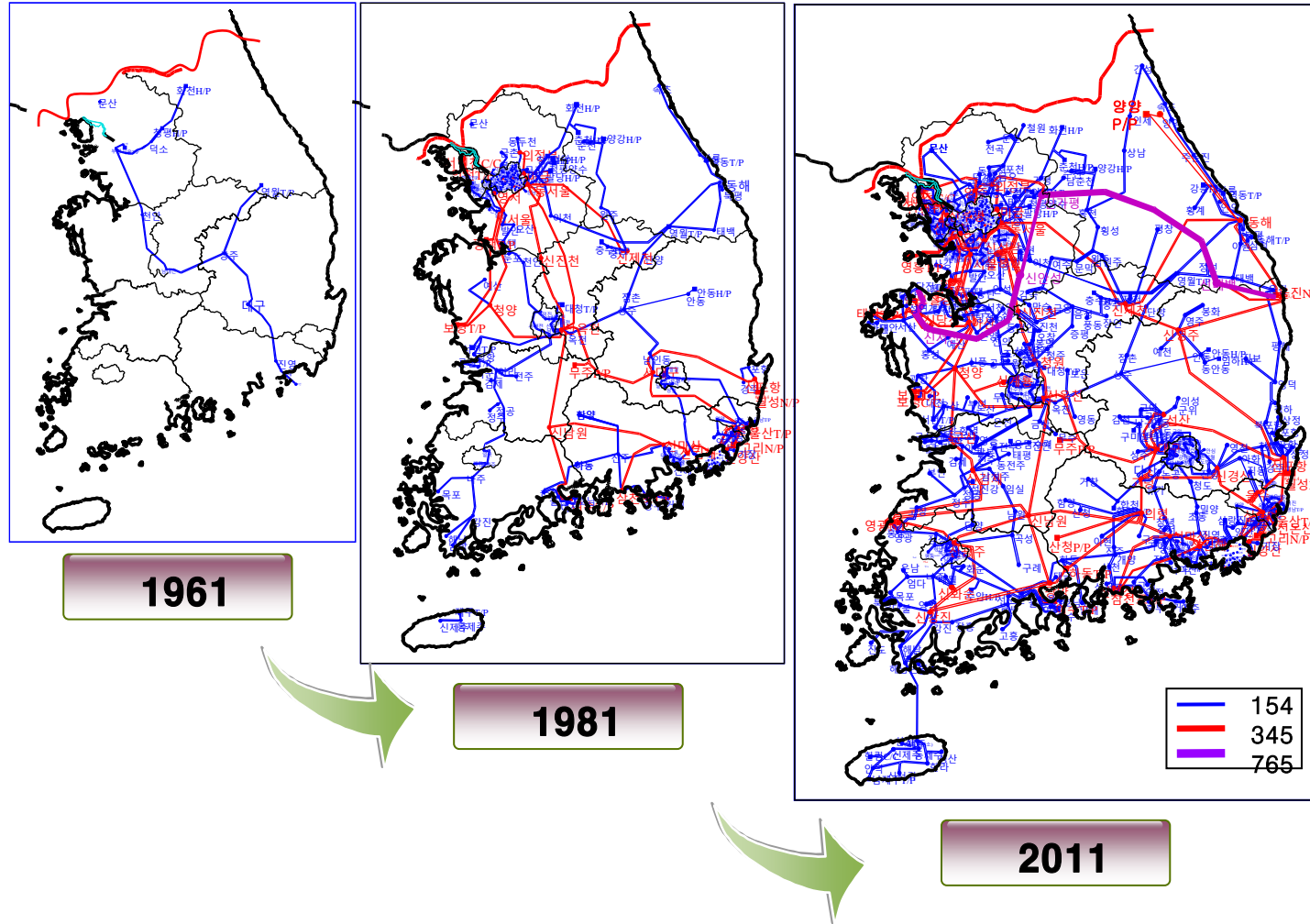
물리적 이해 : 기계적 토크와 전기적 토크



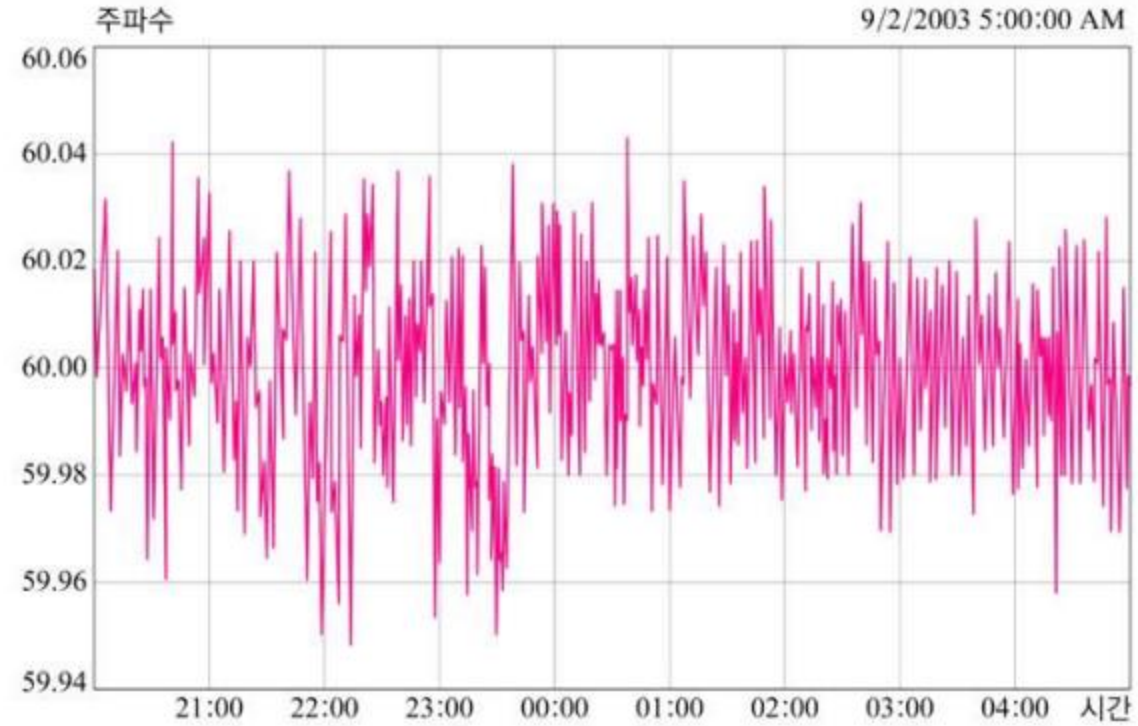
물리적 이해 : 동기 운전(Synchronous Operation)



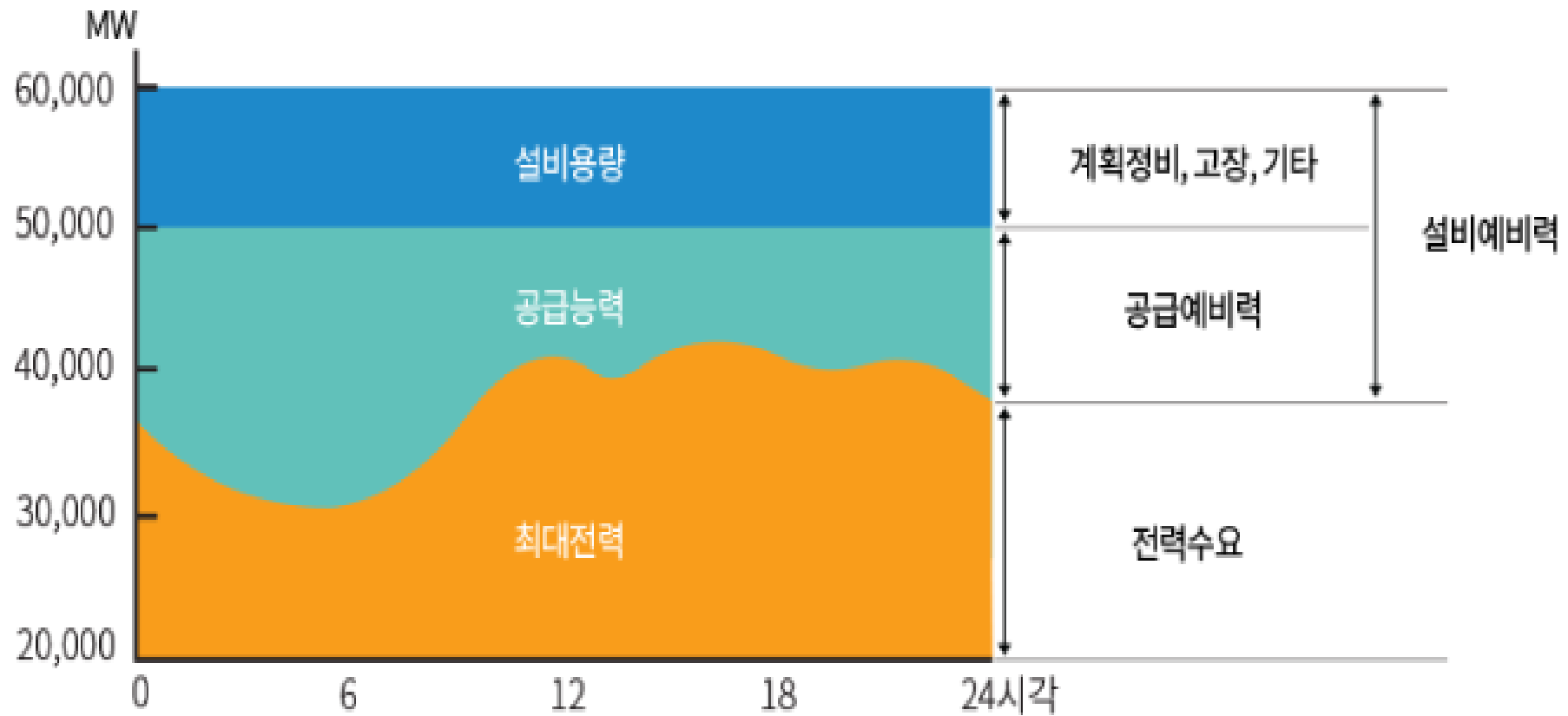
전력망



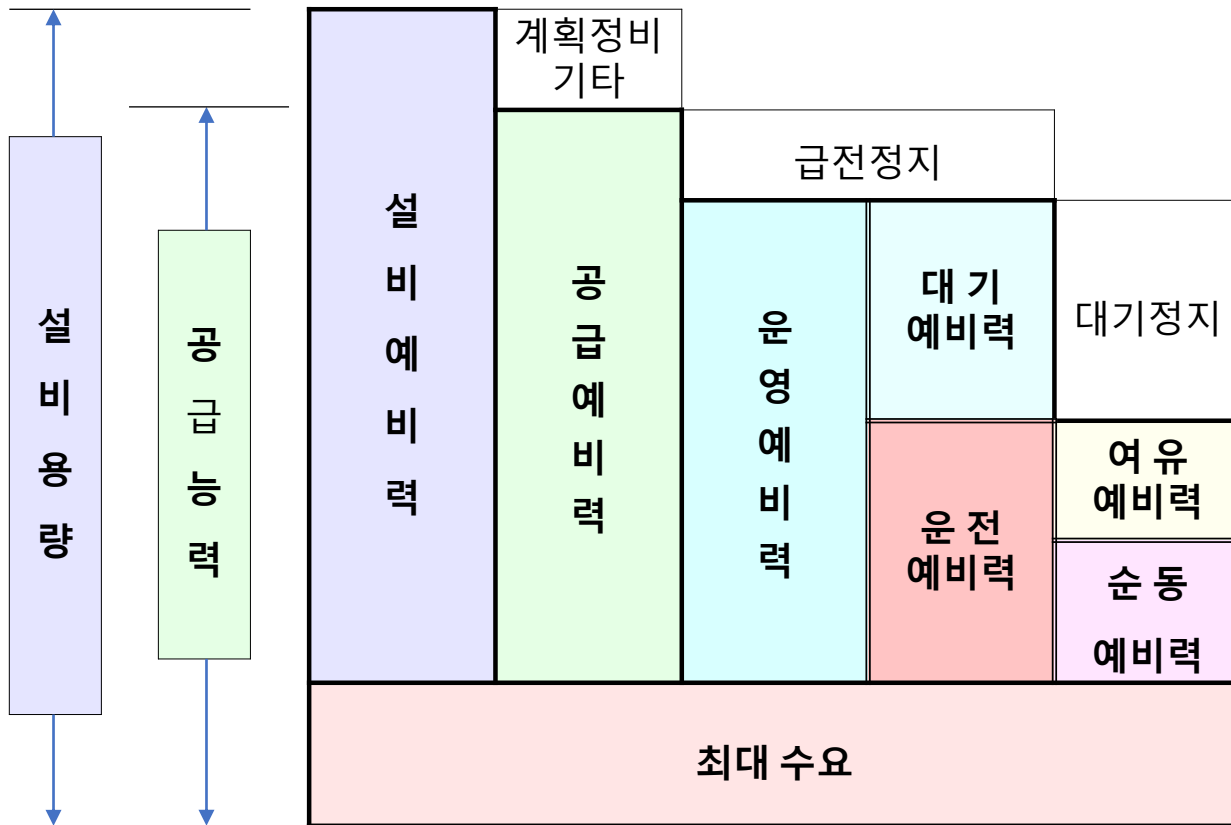
주파수 변동



기초 용어



용어



운영예비력 (Operating Reserve)

= 운전예비력 + 대기예비력

1) 운전예비력 (Spinning Reserve)

○ 운전중인 발전기의 출력 여유분으로 10분 이내에 응답할 수 있는 예비전력

● 순동예비력 (Regulating Reserve)

자동발전제어(AGC ; Automatic Generation Control)
또는 조속기(Governor Free) 운전에 따라 자동으로
응답할 수 있는 예비력

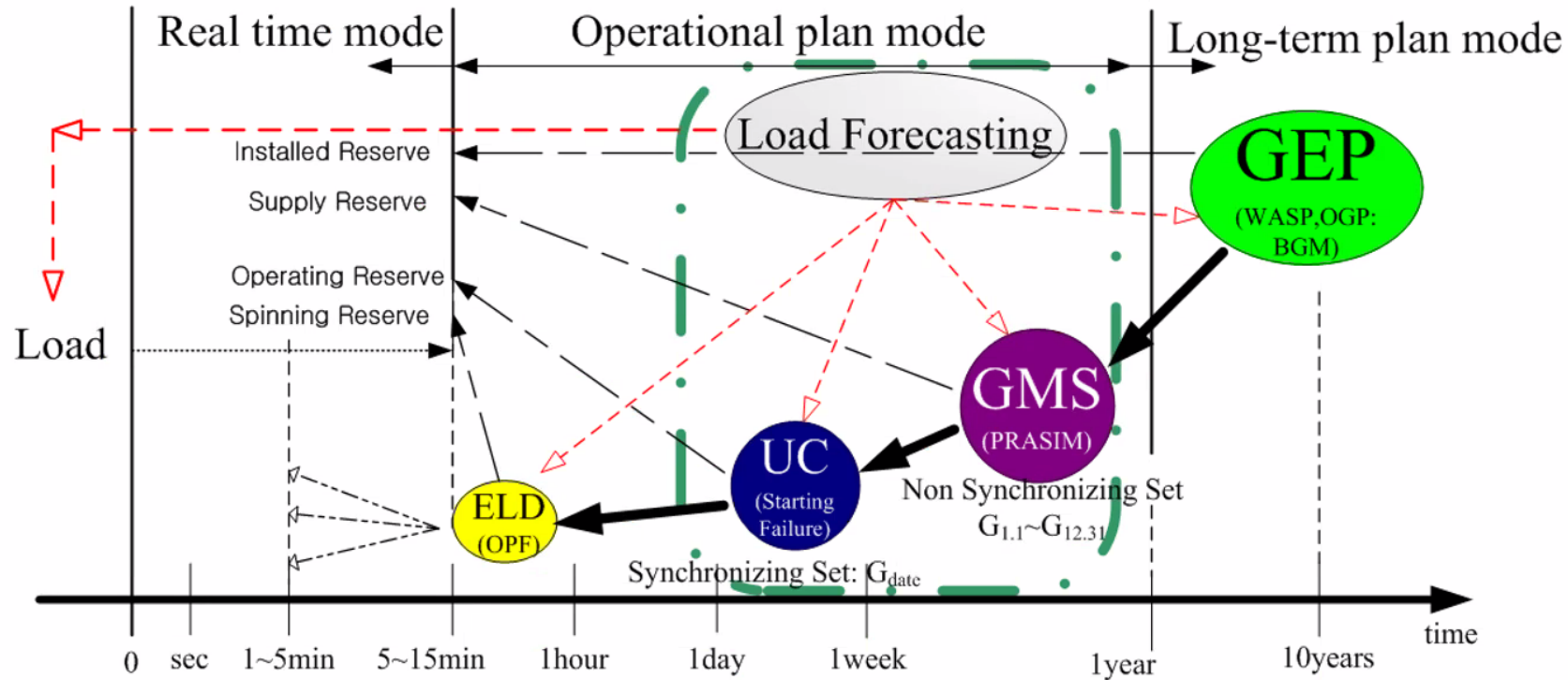
● 여유예비력 (Contingency Reserve)

운전중인 발전기가 보유하는 예비전력으로 고장정지에
대비하여 자동 또는 수동으로 응답할 수 있는 예비력

2) 대기예비력 (Non-Spinning Reserve)

○ 계통에 병입되지 않았지만 특정시간 (30분 내외) 내에
대응할 수 있는 예비전력

용어



GEP : Generation Expansion Planning: 전원개발계획

GMS : Generator Maintenance Scheduling: 발전기 유지보수계획

UC : Unit Commitment : 발전기 기동정지계획

ELD : Economic Load Dispatch : 경제급전

자료: 최재석 교수

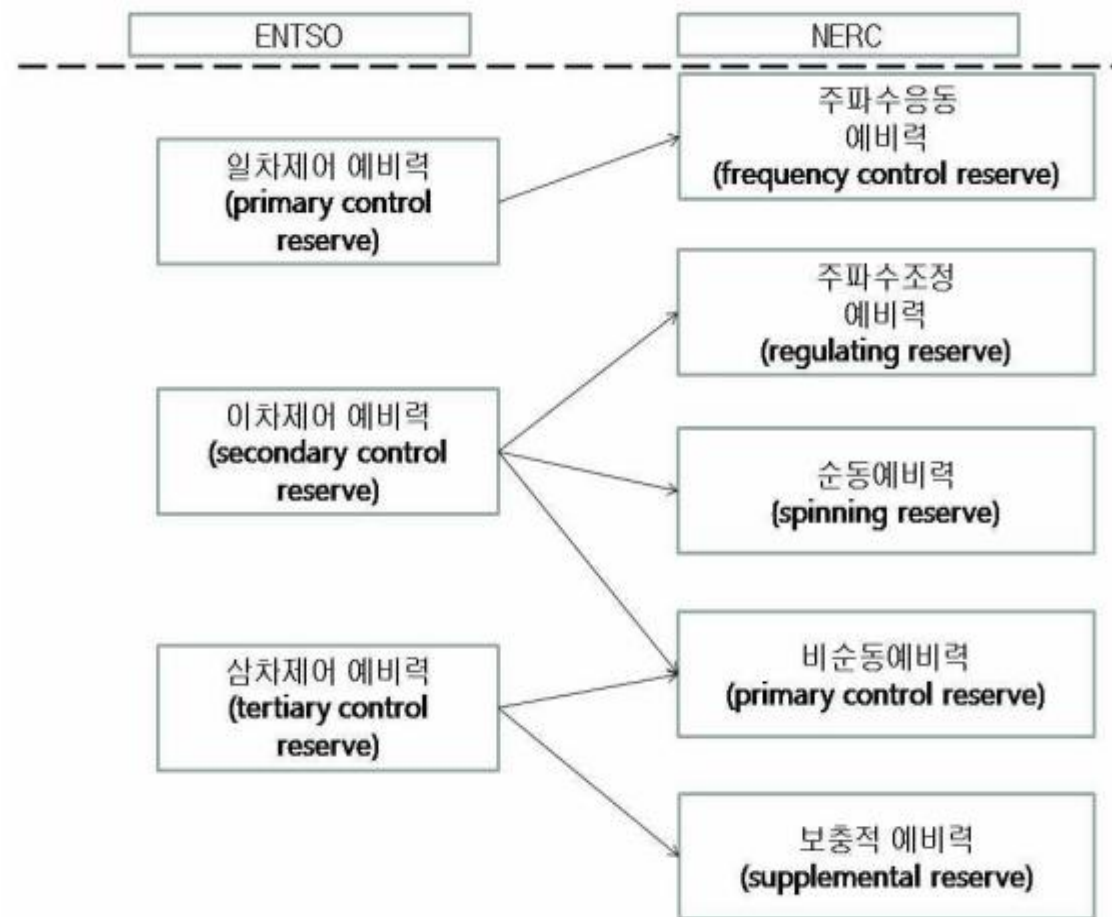
참고

미국 NERC의 예비력 분류

운용예비력 Operating Reserves		설비예비력 Planned Reserves	
On-Line	AGC 예비력 (a)		
	순동예비력 Spinning Reserve (b)		
Off-Line	비순동예비력 Non-Spinning Reserve (c) 예: · Interruptible load · 신속기동발전기	운용스케줄/ 기동정지스케줄 (f)	수급계획/ 발전기건설 (g)
	기타의 Off-Line Reserve (e) 예: · Curtailable Load · Off-Line 발전기		
	10분 이하	한 시간~며칠	1년 ~ 10년

North American Electric Reliability Corporation

미국과 유럽비교



European Network of Transmission System Operators

참고 : 예비력, 경보수준 및 필요 조치 사항

예비력 (MW)	경보 수준	필요 조치사항	구분
4,500이상 5,500미만	준비 (경보수준 아님)	<ul style="list-style-type: none"> ○수요관리사업자에게 전력수요 의무감축요청 발령 전력수요감축 시행 ○계획중인 발전기 정지일정 조정, 시운전발전기 시험일정 조정으로 공급능력 확보 ○발전기별 공급가능용량 재검토 및 기동시 장시간 소요발전기 상태 파악 ○운전상태 유지를 위한 기동가능한 모든 발전기 가동(중앙급전발전기) ○모든 중앙급전 구역전기 발전기 입찰 공급가능용량 전량 급전지시 ○비중앙급전발전기 및 비중앙급전 구역전기사업자 등 가동 준비·지시 	공급 예비 력
3,500이상 4,500미만	관심 (Blue)	<ul style="list-style-type: none"> ○전기품질 유지범위 내 배전용변압기 TAP 수동운전 전환 및 조정(1단계 2.5%, 2단계 5.0%) ○<삭제 2021.9.18.> ○전력수급대책 기구 구성·운영 ○수급경보 “관심” 발령 	운영 예비 력
2,500이상 3,500미만	주의 (Yellow)	<ul style="list-style-type: none"> ○수급경보 “주의” 또는 “경계” 발령 ○휴전·활선작업 시행중지 및 계통복구 지시 ○수요조정지원제도(긴급절전) 시행 	“
1,500이상 2,500미만	경계 (Orange)		“
1,500미만	심각 (Red)	<ul style="list-style-type: none"> ○수급경보 “심각” 발령 ○긴급 부하조정(부하차단) 	“

전력계통 운영



전기사업법 43조
신재생에너지법 12조9



전기시장운영 규칙

전력시장 운영 규칙

전기사업법 43조
신재생에너지법 12조9



전기시장운영 규칙

전력시장운영규칙

2021. 12.



목 차

제1장 총칙	2
제1절 통칙	2
제2절 전력거래자 및 발전기 등록	15
제2장 발전입찰 및 가격결정	21
제1절 발전비용 평가절차	21
제2절 비용평가위원회	29
제3절 발전입찰과 전력수요예측	36
제4절 가격결정 발전계획 및 가격결정	42
제5절 송전손실계수의 산정 및 적용	56
제3장 전력의 거래	58
제1절 판매사업자의 전력구매	58
제2절 직접구매자의 전력구매	59
제3절 구역전기사업자의 전력거래	63
제4장 계량과 정산 및 결제	72
제1절 계량	72
제2절 정산	75
제3절 결제 및 전력거래전담 금융기관	84
제5장 전력계통 운영	87
제1절 운영발전계획	87
제2절 실시간급전계획	91
제3절 급전지시	93
제4절 송전손실 및 송전혼잡 관리	96
제5절 발전기 자기제약	96

전력시장 운영 규칙

제6절 보조서비스	96
제7절 양수발전기의 양수운영	98
제8절 전력계통 안정운영 및 자료제공	98
제9절 발전기 및 전기저장장치의 정지 및 휴전계획 조정	103
제10절 계통평가위원회	106
제11절 신재생발전에 관한 계통운영	110

제6장 전력시장 감시	112
제1절 통칙	112
제2절 전력시장감시위원회	113
제3절 전력시장 감시절차 및 제제	115
제4절 감시결과 보고 및 자율시정조치	118
제5절 전기위원회의 사실조사 및 직권시정조치	121

제7장 분쟁조정	122
제1절 통칙	122
제2절 분쟁조정위원회	122
제3절 분쟁조정 및 불복 절차	125

제8장 정보공개	136
제1절 통칙	136
제2절 정보공개위원회	137
제3절 정보보호	142

제9장 규칙개정	144
제1절 통칙	144
제2절 규칙개정위원회	144
제3절 규칙개정 절차	148

제10장 전력거래시스템	151
제1절 전력거래소의 설비	151

제2절 발전사업자 및 송전사업자의 설비	151
제3절 정보보안정책의 수립	153

제11장 공급인증서 거래	154
제1절 공급인증서 거래시장의 운영	154
제2절 의무이행비용 정산	156

제12장 수요반응자원의 거래	158
제1절 통칙	158
제2절 전력거래자, 수요반응자원, 수요반응참여고객 등록	161
제3절 등록시험 및 감축시험	166
제4절 수요반응자원의 전력부하감축량 거래	169
제5절 사용전력량 데이터 관리 및 전력부하감축(증대)량 평가	179
제6절 정산	184
제7절 수요반응자원의 전력부하증대량 거래	189

제13장 정부승인차액계약	192
제1절 정부승인차액계약의 운영	192
제2절 정부승인차액계약운영위원회	192

제14장 재생에너지 발전량 예측제도	197
제1절 통칙	197
제2절 참여자원 조건 및 구성	199
제3절 시험 및 등록	200
제4절 예측발전량 제출 및 예측오차율 산정	202
제5절 정산	203

제15장 보칙	206
----------------------	------------

부 칙	211
------------------	------------

주파수 제어 : 전력시장 운영 규칙 [별표3] 전력계통 운영 기준

1.0 운영예비력 운영 기준 <개정 2011.12.2>

1.2.1 주파수제어예비력

- 1) 사용목적 : 평상시 계통주파수를 안정적으로 유지하기 위하여 사용되는 예비력을 말한다.
- 2) 기술요건 : 발전기의 자동발전제어(AGC) 운전 또는 전기저장장치의 원격출력제어 운전을 통하여 전력거래소로부터 급전지시 받은 출력을 5분 이내 생산하여 30분 이상 출력을 유지할 수 있어야한다. <개정 2015.5.7., 2019.12.13.>

1.2.2 주파수회복예비력 : 고장 발생 시 계통주파수 회복을 위하여 확보하는 예비력으로 1차예비력, 2차예비력, 3차예비력으로 구분한다.

1) 1차예비력

- ① 사용목적 : 주파수 변동 초기에 응동하여 주파수의 1차 회복을 위한 예비력을 말한다. 여기서, 1차 회복이란 주파수 저하 또는 상승을 억제하고 새로운 균형점인 과도안정주파수로의 회복을 말한다.
- ② 기술요건 : 발전기의 조속기(Governor Free) 및 전기저장장치의 주파수추종운전을 통해 주파수 변동 10초 이내에 응동하여 5분 이상 출력을 유지할 수 있어야한다.

2) 2차예비력

- ① 사용목적 : 1차 회복된 과도안정주파수를 목표주파수로 회복하고, 소실된 1차예비력을 복구하기 위한 예비력을 말한다. 여기서, 목표주파수란 60Hz를 말한다.
- ② 기술요건 : 발전기의 자동발전제어(AGC) 운전을 통하여 전력거래소로부터 급전지시 받은 출력을 10분 이내 생산하여 30분 이상 출력을 유지할 수 있어야한다.

3) 3차예비력 :

- ① 사용목적 : 고장발생으로 소실된 2차예비력을 복구하기 위한 예비력을 말한다.
- ② 기술요건 : 중앙급전발전기를 통하여 전력거래소로부터 급전지시 받은 출력을 30분 이내 생산하여 유지할 수 있어야한다.

<개정 2011.12.2, 2019.12.13.>

주파수 제어 : 전력시장 운영 규칙 [별표3] 전력계통 운영 기준

10.0 계통주파수 조정 및 유지범위

10.1 전력거래소는 전기사업자에게 발전력 및 전기저장장치의 유효전력 조정 등의 급전지시를 하여 다음 각 호의 계통주파수를 유지하여야 한다. <개정 2015.5.7., 2019.12.13.>

10.1.1 평상시 계통주파수를 $60 \pm 0.2\text{Hz}$ 의 범위 이내로 유지하여야 한다. [신설 2019.12.13.]

10.1.2 최대 용량의 발전기 1기 고장 시 계통주파수를 최저 59.7Hz 이상으로 유지하여야 하고, 1분 이내에 59.8Hz 로 회복시켜야 한다. [신설 2019.12.13.]

10.1.3 발전기 2기 고장이 발생하거나 고장파급방지장치에 의하여 발전기가 탈락 시 계통주파수를 최저 59.2Hz 이상 유지하여야 하고, 1분 이내에 59.5Hz 로, 10분 이내에 59.8Hz 로 회복시켜야 한다. [신설 2019.12.13.]

10.2 비상상황의 경우에는 계통주파수를 $62\text{Hz} \sim 57.5\text{Hz}$ 범위 내에서 유지할 수 있다. <개정 2019.12.13.>

10.3 전력계통의 주파수 조정을 위한 세부사항은 별표 11에 따른다.

주파수 제어 : 전력시장 운영 규칙 [별표3] 전력계통 운영 기준

11.0 발전기 주파수 운전 기준

전력거래에 참여하는 모든 발전기는 다음 각호와 같은 주파수 변동 범위에서 운전이 가능하여야 한다.

11.1 $60 \pm 1.5\text{Hz}$ 연속 운전

11.2 주파수 강하로 인하여 계통주파수가 $58.5 \sim 57.5\text{Hz}$ 범위에서 최소한 20초 이상 운전상태 유지

13.0 조속기 및 전기저장장치의 속도조정률 정정

전력거래에 참여하는 발전기의 조속기 및 전기저장장치의 속도조정률은 다음과 같이 정함을 원칙으로 한다. 다만, 원자력 발전기는 그 특성을 고려하여 예외로 할 수 있으며, 기력발전기의 속도조정율은 원자재 수급불안 등으로 인하여 부득이 발전기 제작시에 정해진 연료설계범위를 초과 또는 미달하는 연료를 사용하는 경우에는 예외로 할 수 있다.<개정 2006.9.14., 2015.5.7.>

주파수 제어 : 전력시장 운영 규칙 [별표3] 전력계통 운영 기준

15.0 발전기의 주파수조정량 확보

15.1 중앙급전발전기는 최소발전용량부터 공급가능용량 이내 범위에서 자동발전제어(AGC) 및 주파수추종운전(G/F)을 하여야 한다. **다만, 다음 각호에 해당하는 발전기는 예외로 할 수 있다.**<개정 2010.6.30>

15.1.1 설비 폐지가 확정된 노후발전기[신설 2010.6.30]

15.1.2 농업용수 확보 등으로 항상 일정출력을 내야 하는 발전기[신설 2010.6.30.] <개정 2021.12.28.>

15.1.3 원자력발전기[신설 2010.6.30]

15.1.4 산업통상자원부 심의를 거쳐 예외가 인정된 발전기[신설 2010.6.30.]

15.1.5 중앙급전 구역전기발전기 [신설 2019.1.2.]

15.1.6 열공급으로 일정출력 운전을 하는 발전기 (단, 하한제약 또는 열공급 미시행시는 계통평가위원회에서 의결받은 발전기별 특성과 열공급 상황을 고려하여 참여)[신설 2021.12.28.]

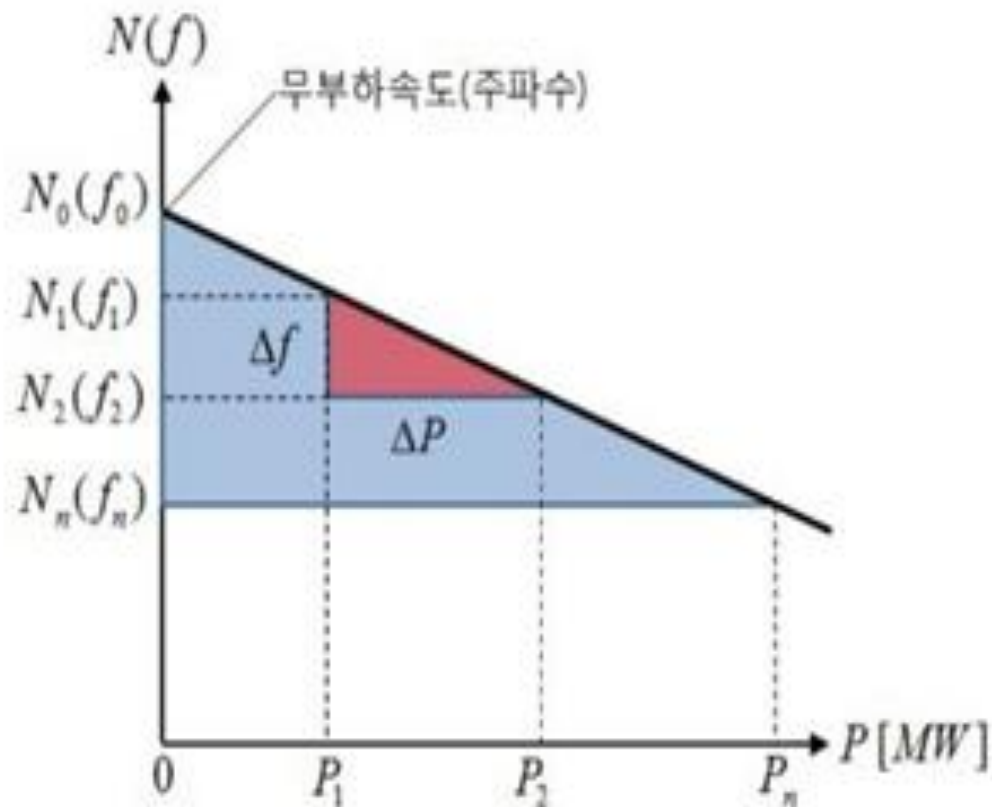
15.2 발전원별 주파수조정 출력변동 범위는 다음 각호와 같다.

15.2.1 기력발전기 : 정격용량의 5% 이상

15.2.2 기타발전기 : 주파수조정이 가능한 최대운전가능 출력<개정 2010.6.30.>

15.3 발전사업자는 전기저장장치를 이용하여 원격출력제어 및 주파수추종 운전 서비스를 제공 할 수 있다. [신설 2016.5.12.]

주파수 제어 : 발전기



(3) 주파수 추종 운전(G.F)

① 정해진 속도조정률에 따라 증기량을 조절하여 발전기 출력 조정 운전

② 속도 조정률

$$\delta = \frac{f_0 - f_n}{f_n} \times 100[\%]$$

단, f_0 : 무부하 시 주파수

f_n : 정격 출력 시 주파수

- ESS : 2%
- 수력 및 내연력 발전기 : 3 ~ 4%
- 가스터빈 발전기 : 4 ~ 5%
- 기력 발전기 : 5 ~ 6%

주파수 제어

주파수 조정 및 유지범위

- 평상시 계통주파수 : $60 \pm 0.2\text{Hz}$
- 발전기 주파수 : $60 \pm 1.5\text{Hz}$ 연속운전
- $58.5 \sim 57.5\text{Hz}$ 범위 : 최소 20초 이상 운전상태 유지

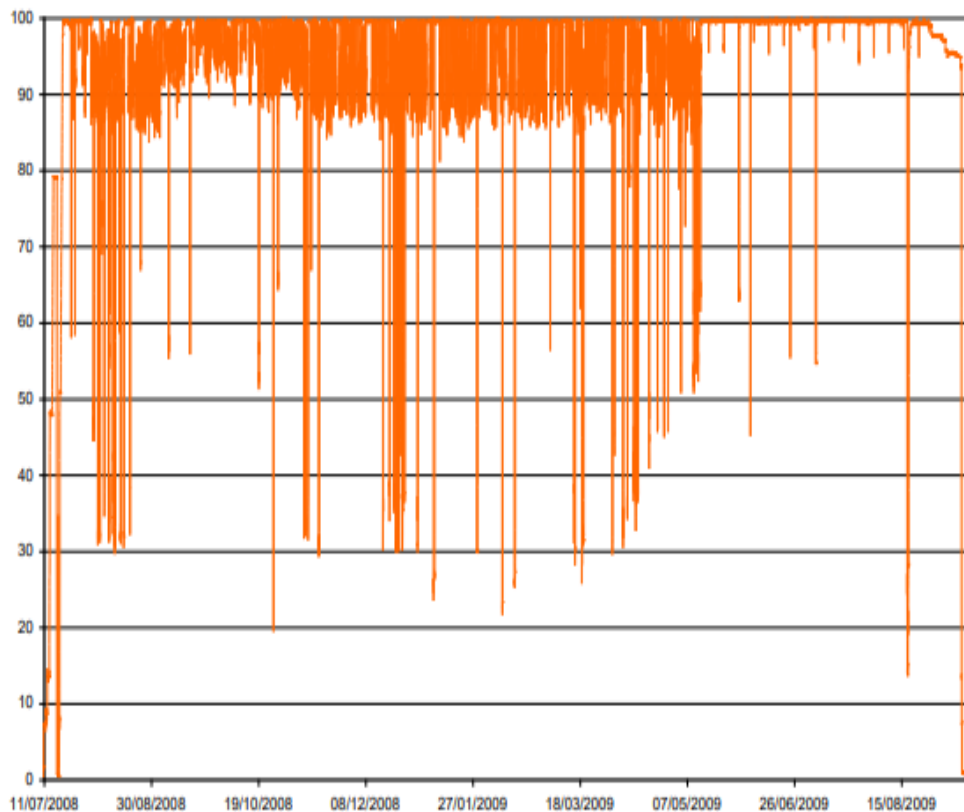
주파수 조정 및 출력변동 범위

- 자동발전제어 또는 주파수 추종운전
- 입찰공급 가능용량의 최저운전~최대운전가능출력
- 기력발전기 : 정격용량의 5% 이상
- 수력, 양수, 가스발전기 : 주파수조정 가능 최대운전 출력

시간	현상	주파수	작용지점
0	발전기탈락		발전기 측
0~1/10,000 초	전기자반작용이 회전자 회전을 방해함	주파수하락 시작함	모든 발전기
1/1,000 초 이후	관성에너지 작용	주파수하락을 저지하기 시작함	모든 발전기
1/1,000초 이후	부하응동	주파수 하락을 저지함	소비자의 회전부하
1/10초 이후	조속기가 주파수하락 검출	발전기 출력증가 시작함	각 발전기의 조속기
1/10 초 이후	조속기 작용	발전기출력 증가 지속	각 발전기의 조속기
1/20 초 이후	위의 요인의 종합적 작용	더 이상의 하락을 멈춤	
1/10 초 이후	조속기작용	주파수 회복 시작	각 발전기의 조속기
1/2 초 이후	AGC 작용 시작함	주파수 회복	EMS가 지정한 속응 발전기에 신호를 보냄

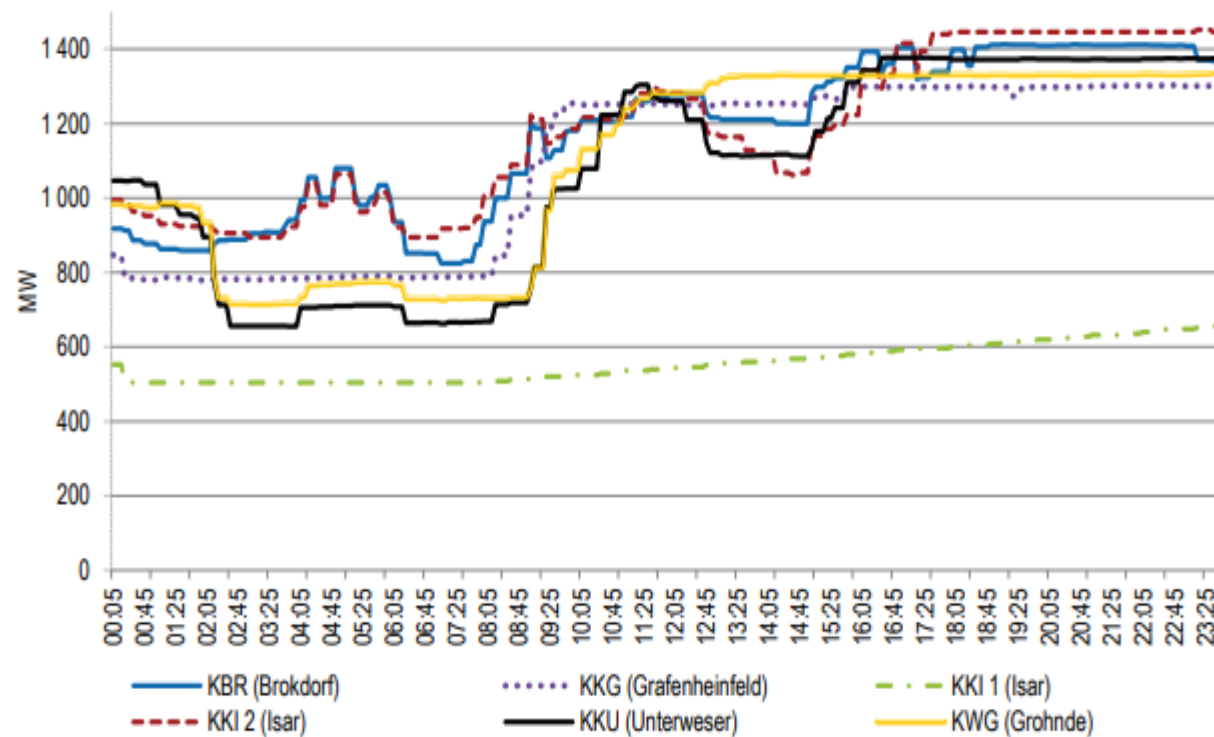
유연 운전 예

Figure E.1: Example of a typical power history during a cycle in a EDF reactor (in % of the rated power)



Courtesy of Électricité de France (EDF)

Figure E.2: Example of the electricity generation with some German nuclear power plants.



Courtesy of E.ON Kernkraft

프랑스 유연 운전 능력

France				
Type of reactor	PWR-900		PWR-1300	N4
Deployment	> 1971		> 1977	> 1984
Operating mode	Mode A	Mode A (flexible)	Mode G	Mode X
Primary frequency control range	$\pm 2\% P_r$	$\pm 2\% P_r$	$\pm 2\% P_r$	$\pm 3\% P_r$
Secondary frequency control range	$\pm 3\% P_r$	$\pm 5\% P_r$	$\pm 5\% P_r$	$\geq 5\% P_r$
Load following ramps	2% P_d /min till 80% of the fuel cycle 0.2% P_r /min after 80% of the fuel cycle		5% P_d /min till 80% of the fuel cycle 2% P_d /min after 80% of the fuel cycle	5% P_r /min
Example of the load following	12-3-6-3 during 85% of the whole fuel cycle	Same as mode A	12-3-6-3 (during 85% of the whole fuel cycle) 18↑6↓ (during 80% of the whole fuel cycle) 16↑8↓ (during 80% of the whole fuel cycle)	12-3-6-3 (during 95% of the whole fuel cycle) 18↑6↓ (during 90% of the whole fuel cycle) 16↑8↓ (during 95% of the whole fuel cycle)

프랑스 유연 운전 능력

Limits to the load-following in different operating modes			
Operating mode	Mode A	Mode G	Mode X
Low-power continuous operation	Possible up to 85% of the fuel cycle	Possible up to 85% of the fuel cycle	Always possible
Capability for instant return to 100% P_r	Particle capability, limited in the amplitude (15-20% P_r) by the of speed the boron dilution	Full capability, no limits in the amplitude up to 85% of the fuel cycle	Full capability, no limits in the amplitude up to 85% of the fuel cycle
Return to programmed load pattern	Limited in the amplitude and in the speed	No limits in speed up to 90% of the fuel cycle	Always possible up to P_r and at any speed up to 95% of P_r

프랑스 유연 운전 능력

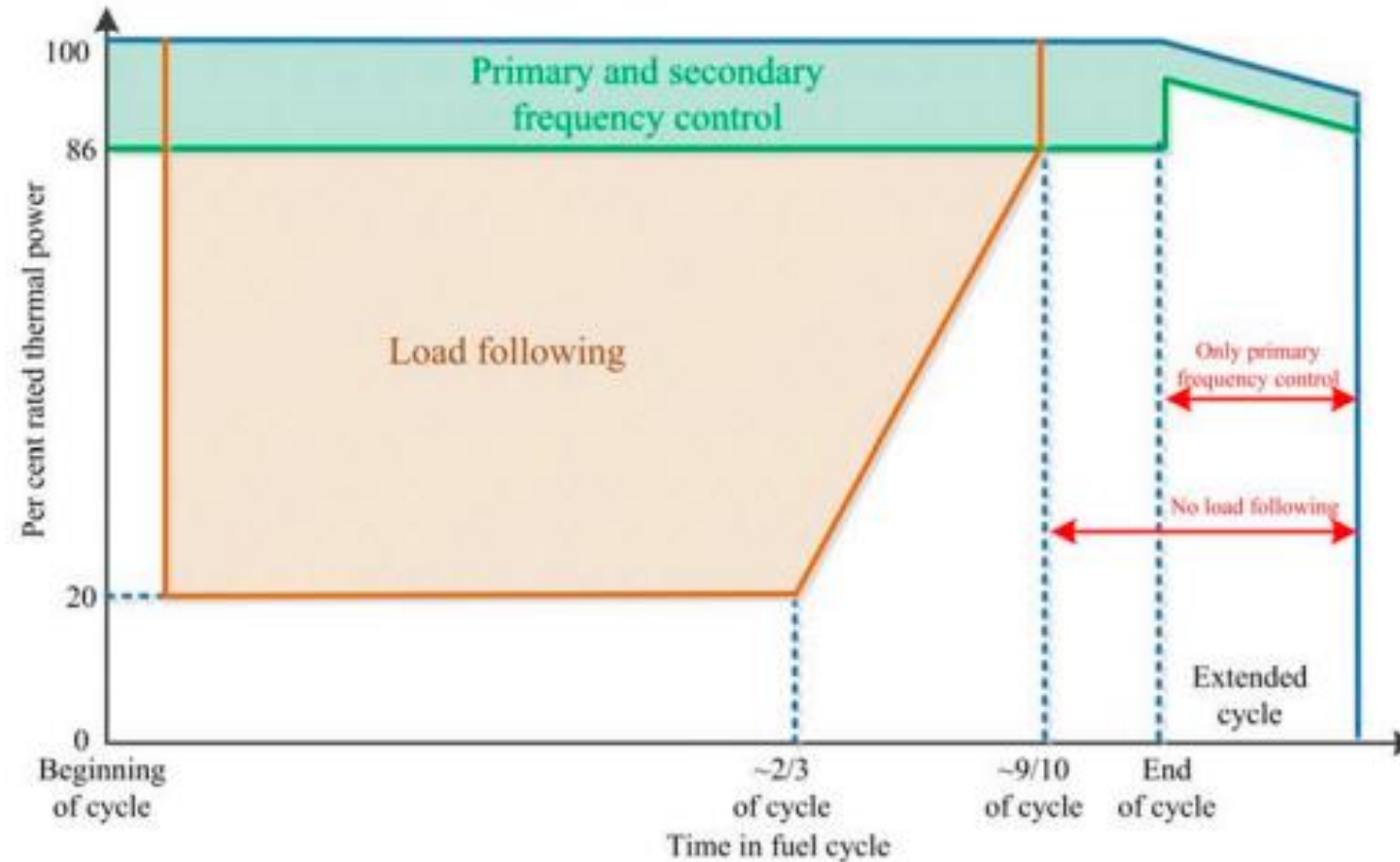


FIG. 23. Flexible operation limits during a fuel cycle in a French pressurized water reactor (courtesy of S. Feutry, Électricité de France, reproduced from Ref. [28]).

유연 운전은
안전 문제가 아니고
경제적 문제 !

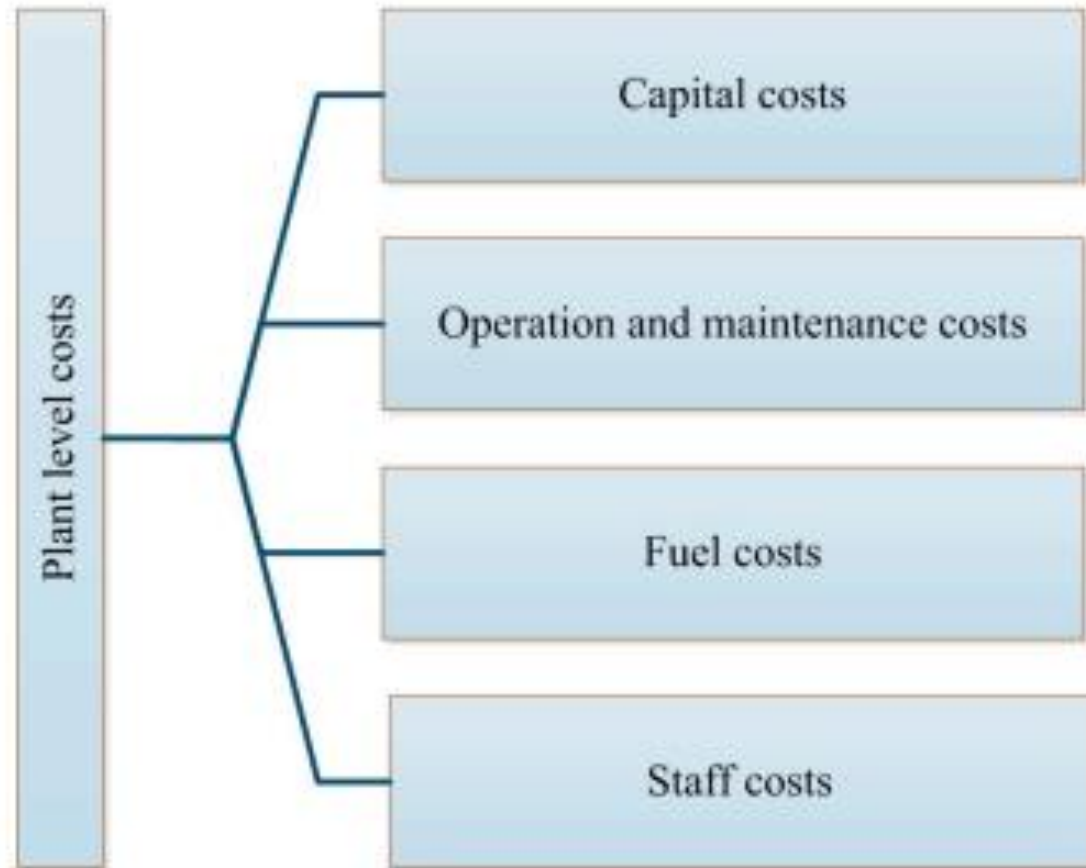


FIG. 33. Plant cost categories affected by using the load following mode.

감사합니다.

spark3388@snu.ac.kr