

PART I 전력 시장 개론

서울대 전기컴퓨터공학부
박종근

전력 시장 개론의 세부 목차

1, 전력 계통이란? 1.1 전력 계통의 변천사 1.2 전력 및 전력 시스템의 특징 1.3 설비의 종류 1.4 전력 계통의 구성 1.5 다른 네트워크와의 비교 1.6 전력 계통의 기초 1.6.1 계통 계획의 개요 1.6.2 전력 수요 상정 (수요 예측) 1.6.3 전원 개발 계획 1.6.4 유통 설비 계획 1.6.5 전력 수급 계획 1.6.6 경제 급전 (최적화 이론)	2, 전력 시장의 도입 2.1 시장의 도입 이유 및 배경 2.2 에너지 시장의 거래 모형 2.3 전력재의 정의 및 특징 2.4 에너지 시장의 분류 2.5 전력 시장의 분류 2.6 전력 산업의 구조 모형 - 4단계 2.7 전력 자유화 현황
--	--

3

전체 목차

- ❖ Part1. 전력 시장 개론
 - (1) 전력 계통이란?
 - (2) 전력시장의 도입
- ❖ Part2. 각국의 전력 시장
 - (1) 영국의 전력 시장의 진화
 - (2) NordPool
 - (3) PJM의 전력 시장
 - (4) 한국의 전력 시장

2

1.1 전력 계통의 변천사

- ❖ 전력산업의 시작
 - 에디슨이 전구를 발명한 지 약 8년 후인, 1887년(고종 23년)
 - 건청궁에 최초의 전깃불 사용(자가발전 석탄발전기 : 7kw)
 - 1898년(고종 34년) 고종황제 - '한성전기회사'를 설립
 - 1899년 5월 전차산업 시작
 - 1900년 야간 운행을 위해 종로에 가로등 점등(민간 최초)
 - 1966년 이래 이날을 "전기의 날"로 기념
 - 1901년 6월 첫 번째로 경운궁에 전등 6개를 점등(영업용 최초)



경복궁 건청궁의 전기점등식을 시현한 시흥화

4

PSELAB
Korea National Grid

❖ 전력산업의 수난기

- 1909년 : 한성전기회사가 일본에 매각됨
- 일제 강점기의 전력산업
 - 소규모 배전사업체 난립, 전기사업 공영화 운동, 민간기업인의 수력발전 개발
- 1931년 : 전국의 전기보급률 6.7%로 증가
- 1945년 : 수력발전소 총 21개, 160만kw (북한에 90%)
- 1948년 : 정치적 이유로 북한이 단전 조치
 - 전후 전력설비 파괴와 더불어 경제 침체 유발

5

PSELAB
Korea National Grid

❖ 전력산업의 성장기(2)

- 1992: 국내 최초 345kV 지중 송전선로 착공(미금 - 성동)
- 1998: 해남 - 제주간에 직류송전(HVDC)선로에 대한 상업 운전이 시작되었으며, 현재 제주도 전체 전력수요의 약 50%를 담당
- 2000: 765kV 송전선로 완공
- 2001: 발전부문 6개 자회사로 분리
- 2004: 구역 전기 사업자 제도
- 2006: 배전사업부제 도입

7

PSELAB
Korea National Grid

❖ 전력산업의 성장기(1)

- 전후 전력회사 3개사로 재편: 조선전업,경성전기,남선전기
 - 전쟁 중 설비 파괴와 생산성 저하로 만성적자 운영
- 1961: 3개사 합병 "한국전력주식회사"설립
- 1970년대 : 석유 파동 후 에너지원의 다양화와 안전 공급을 위해 원자력 도입
- 1978: 4월 29일 587[MW]의 원자력 1호기 준공
- 1980년대 말: 4차 전원개발 계획 완료
 - 창립시 용량 37만kW에서 939만kW로 확충
 - 외화 자금 2조 투입 및 오일쇼크로 재무구조 악화
- 1982: 1월 주식회사에서 공기업 체제로 전환
- 1989: 정부소유 주식의 21%를 국민주로 매각하여 부분적인 민영화 실시

6

PSELAB
Korea National Grid

❖ 한전의 독립 이후 전력 시장의 점진적 개방 과정

시기	사업구조의 변천과정	주요 내용
한전의 독립 이전	<ul style="list-style-type: none"> 1988년 한성전기회사 설립 1910년 3개사(서울, 부산, 인천)전력회사 설립 1930년대 40여개 전기사업체 난립 소규모(수백kW급), 민간운영 1930년대 소규모 전기사업체 통합 추진 일제말기 발원전부문의 조선전업주식회사와 4개의 지역발전회사로 통합 	<ul style="list-style-type: none"> 전기기술 발전, 전기이용 증가 전력의 공급성 및 경제문제
	<ul style="list-style-type: none"> 발전·송전 권역 회사: 조선전업 배전회사: 경성전기, 남선발전전기 	<ul style="list-style-type: none"> 협소한 권역 시장 및 경영상 문제로 개편
	<ul style="list-style-type: none"> 1961년 권업3사 통합 → 한국전력주식회사 1980년대 후반 민간발전사업자의 발전시장 참여 	<ul style="list-style-type: none"> 급격한 수요 및 정부재원 부담완화
한전의 독립 이후	<ul style="list-style-type: none"> 20년대 초반 정부의 민전인수 원칙에 따라 동해 및 호남전역의 민전인수 수주권 공사의 발전사업 참여 소수개발권자 열병합발전의 적극 개발 민간발전의 제추진 	<ul style="list-style-type: none"> 수요성장문제로 확대된 비 초격 과도한 고정비 발생

8

1.2 전력 및 전력 시스템의 특징

<물리적 특징>

- 전기는 비 저장성
- 전달 속도가 거의 빛의 속도에 가깝음.
- 전기는 매순간마다 수요와 공급이 일치해야 함

대규모 지구상에서 가장 거대한 시스템
전세계에 걸쳐 존재함

다양한 특성 모든 산업의 원동력
계통마다 발전, 수송 설비 등의 구성이 상이하여 서로 다른 운용 특성을 갖게 됨

안정적 공급의 필요성 전력의 중단은 거대한 사회적 손실을 초래
단순한 공급의무에서 벗어나 전압과 주파수가 일정하게 유지되는 품질 좋은 공급이 요구됨

9

1.4 전력 계통의 설비

발전 설비: 전기를 생산하는 설비를 말함

- 원자력 발전소
- 화력 발전소(석탄, 유류, 가스)
- 수력 발전소

수송 설비: 송전 + 배전

운영 설비: 전력 시스템을 운영하기 위한 설비

- 계통 전압 제어 설비 - 발전기 여자기, 조상설비, 변압기 Tap조절 장치
- 계통 주파수 제어를 위한 설비 - 발전 예비력 설비, 자동발전제어 설비(AGC)

11

1.3 전력 계통의 구성

Basic Structure of the Electric System

The diagram illustrates the flow of electricity from **Generators** (Under 25kV) through **Transmission Lines** (765, 345, 154kV) to a **Distribution Transformer** (154/22.9 kV). From there, it branches into **Subtransmission Customer** (22kV and 69kV), **HV Customers** (22.9kV), and **Captive Customers** (220V, 380V). **Eligible Customers** are shown at 345kV and 154kV.

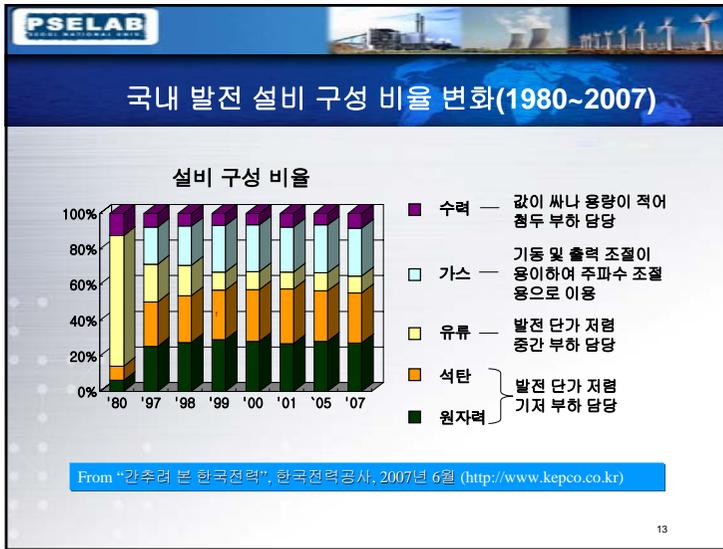
10

1인당 전력소비량 변화 추세

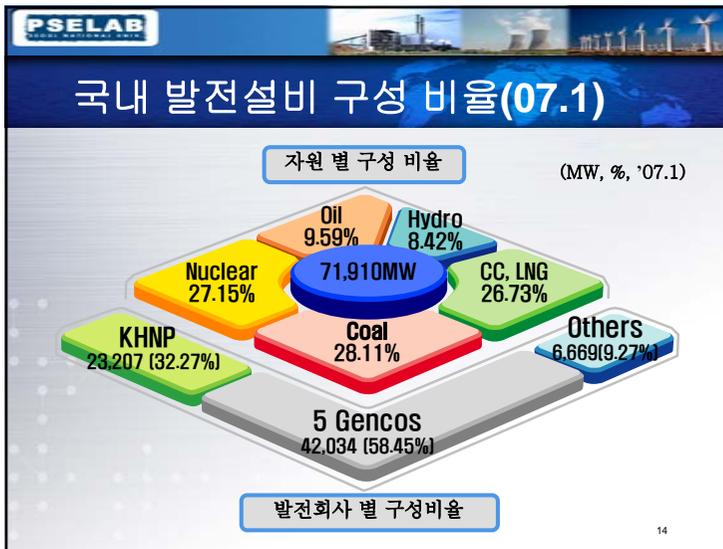
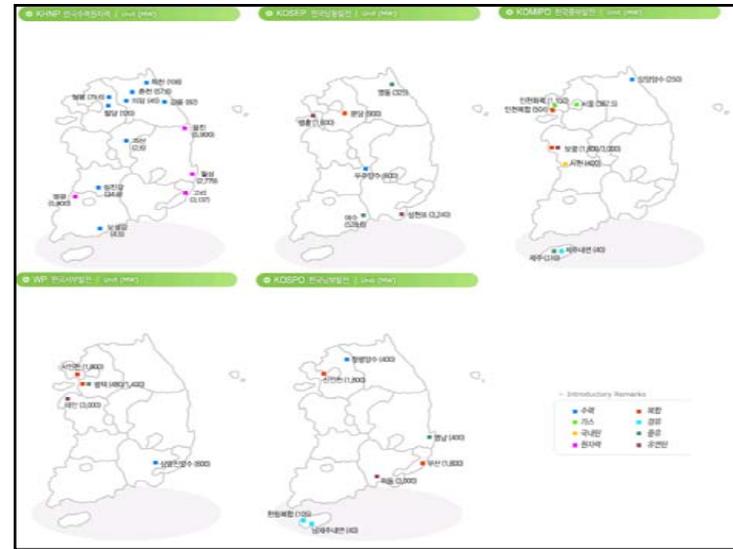
국가별 1인당 전기사용량 (Comparing among countries)
(단위: kWh/인년)

Year	2003	2004	2005	2006
인당 1인당 (Per capita)	6,126	6,491	6,883	7,191
주택 부문 (Residential)	4,688	4,902	4,579	4,795
공공서비스 (Pub. & Ser.)	16,532	23,280	23,296	23,082
생산 부문 (Industrial)	123,411	127,284	130,950	132,603
합계 (Total)	17,202	18,292	19,162	19,786

[2007년 6월 기준 자료] 12

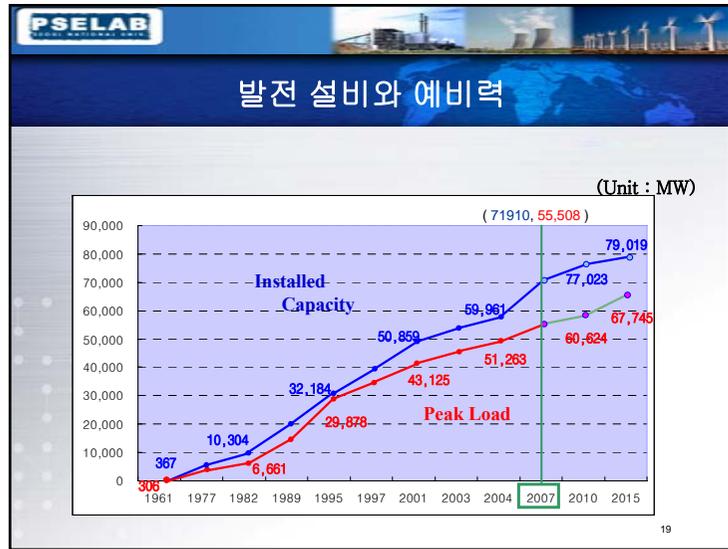
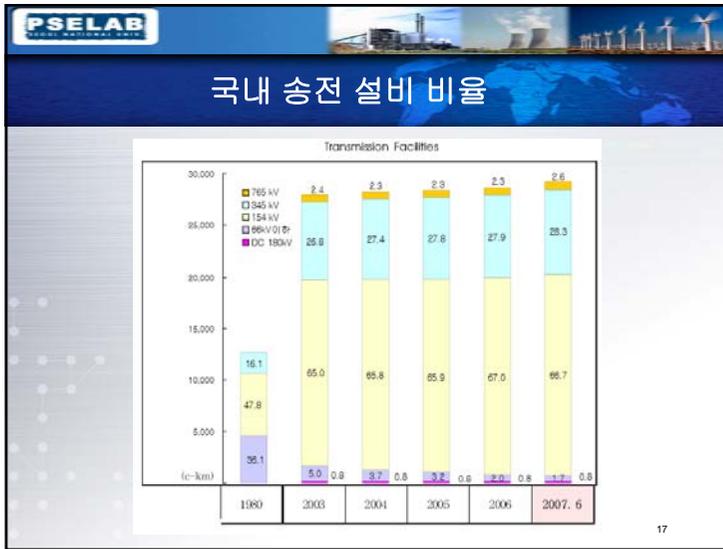


13



14





1.5 다른 네트워크와 비교

네트워크	발전자와 수신자	스위치의 방향성	스위치로 양의 조절	지장	혼잡상황
전화(電話)	○	○	×	×	통화 중
우편(郵便)	○	○	○	○	배달 지연
인터넷	○	○	○	○	저속화
고속도로	○	○	○	○	정체
수도	×	×	○	○	수압의 저하
전기	×	×	×	×	경제성 저하/정전

PSELAB
Korea's National Grid

1.6 전력 계통 기초 계획과 운용(시장 도입 이전)

1. 계통 계획의 개요
2. 전력 수요 상정 - 전력 수요 예측
3. 전원 개발 계획 - 예비력 - 최적전원구성
4. 유통 설비 계획
5. 전력 수급 계획 - 경제급전

21

PSELAB
Korea's National Grid

기간별 전력수급계획 및 운용

장기전원개발계획: 공급신뢰도를 적정 수준으로 유지하는 예비력 확보

단기전력수급대책: G/T, 복합화력 등 건설공기가 짧은 발전소 건설

연간발전계획, 연료계획: 발전소 정비시기 조정을 통해 공급능력 최대 확보, 대규모 수용가의 전력사용 계약 조정, 발전 흥보, 원자력 발전소의 핵연료 교체주기 조정

주간계획: 양수 발전소 운전 계획 및 수력발전소 주간운전계획 조정, 주간기동정지계획 조정

시간: 현재, 1주일, 1년, 2-3년, 5-20년

23

PSELAB
Korea's National Grid

1.6.1 계통 계획의 개요

전력계통계획? 주로 전원개발, 송·변·배전 계획을 포함한 설비 계획을 말함

최근에는 이러한 설비 확충 외에도 계통 신뢰도 유지 향상이라든지 전력 계통이 발전해 나가는 방향성을 고려한 장기적인 안목이 요구됨

수요 상정

최대 전력 상정
판매 전력량 상정

전체 상정
지역별 상정

전원 개발 계획

예비력
최적 전원구성

유통 설비 계획

송전 계통 계획

공급 계통 계획

기간 계통
지역공급계통
배전 계통

[계통 계획의 순서]

22

PSELAB
Korea's National Grid

단계별 전력수급계획 및 운용

의일 계획: 일간운전계획조정, 부하관리

급전 제어: 발전기 단시간 비상출력, 대규모 수용가 전력수급조정 요청

경제급전 (ELD): 매 3분마다 중앙 급전소에서 출력 제어신호 송출

자동발전제어 (AGC): 발전기 출력 및 전압 조정, 부하 차단

시간: 현재, 5초, 3분, 2-3시간, 1일

24

전력 계통의 계획과 운영 현황

- 전력계통의 계획(Planning)
 - 투자계획 (Investment Planning)
 - 운영계획 (Operation Planning)
- 전력계통의 운용(운전 및 제어)
 - 경제급전(Economic Load Dispatch)
 - 주파수제어(Frequency Control)
 - 전압제어(Voltage Control)/무효전력제어
 - 전력조류제어(Power Flow Control)

25

전력계통 운영

발전기 보수 및 송전설비 휴전작업 조정 : 휴일, 심야 경부하, 수요 성수기
 전력수송 체증 해소대책 강구 : 설비 신·증설 등에 따른 계통구성 변경
 취약계통 보강대책 수립 시행 : 수도권, 제주지역

전기품질 유지 목표

	유지범위	목 표
계통전압	154kV±2.5%	99.90
주 파 수	60±0.1Hz	99.57

27

시장 도입 이후 전력계통 운영 역할 분담

구 분	송변전 설비	발전 설비
전력거래소 (KPX)	- 휴전 승인 - 감시 및 제어	- 정비계획 승인 - 자동발전제어
한 전 (KEPCO)	- 건설 및 유지보수 - 개폐기, 조상기 조작	-
발전회사 (Genco)	- 급전지시에 의한 발전기 개폐기 조작	- 건설 및 유지보수 - 발전기 기동정지 및 출력조절

26



1.6.2 전력 수요 상정

장기 수요 상정과 단기 수요 상정으로 나눌 수 있음

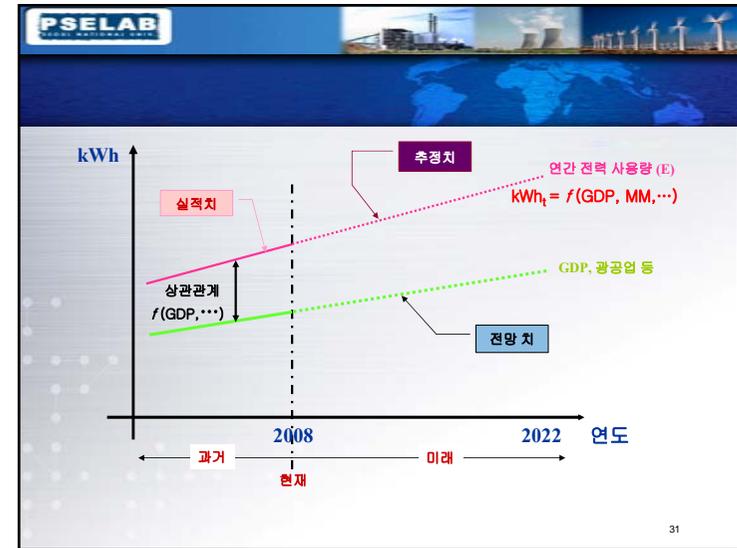
장기 수요 상정

설비 계획, 수지 계획 등 경영 계획에 필요한 장기간에 걸친 수요 상정으로 통상 그 기간은 10년에서 15년 정도임

단기 수요 상정

일단 운용에 필요한 단기간의 수요 상정임

29



전력 수요 예측

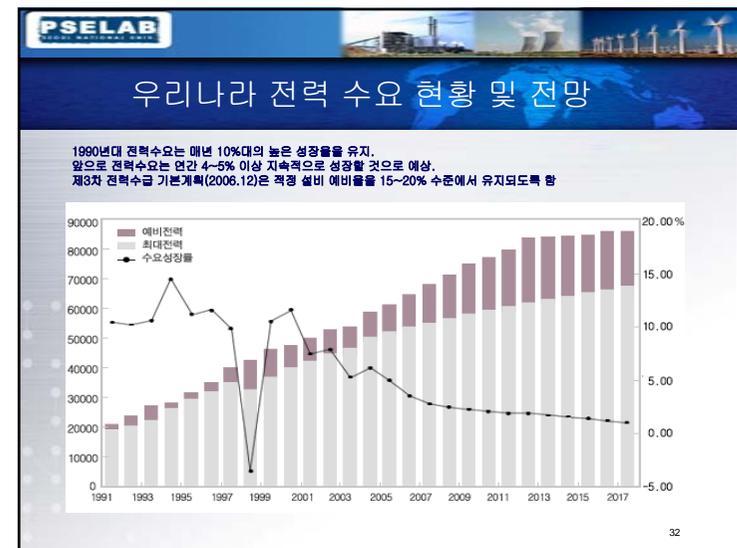
예측 과정

1. 과거 전력 사용량 (kWh/yr)을 GDP, 광공업, 인구 등의 설명변수에 대한 실적자료를 이용하여 회귀 분석을 통한 상관 관계 규명
2. 미래의 GDP, 광공업, 인구 등을 전망하여 미래 전력 사용량 (kWh/yr) 예측 $kWh_t = f(GDP, MM, POP, \dots, etc.)$
3. 예측된 에너지(kWh/yr), 부하율 등을 이용하여 연 최대수요 추정

문제점

1. 미래 설명변수 (GDP, 기상, 경기변동 등)의 불확실성
2. 산업 발달, 기술 진보, 전력 수요 행태의 변화
3. 과거의 상관관계가 미래에도 적용 가능인가에 관한 의문
4. 최소한 10년 이상의 미래를 예측해야 함

30



1.6.3 전원개발계획

전원개발계획의 개요

1. 예측된 미래의 전력수요에 대하여 적정 공급 신뢰도를 유지하기 위한 최적의 비용
목적: 연도별 투자비용과 운전비용의 현재가치의 합을 최소화

$$\min \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^{N_{G_i}} \frac{\{FC_i^t + VC_i^t\}}{(1+r)^t}$$

$$s.t. \sum_{i=1}^{N_{G_i}} C_{i,max} \geq L_{max} + \alpha(\text{예비력})$$

2. 수력, 화력, 원자력 등 각 전원의 적정 조합
전력 수급 운용, 송전 계통 운용, 환경 규제, 입지, 재무/할인을 등을 고려

3. 언제, 어디에, 어떤 형식의 발전소를 건설할 것인지를 결정

33

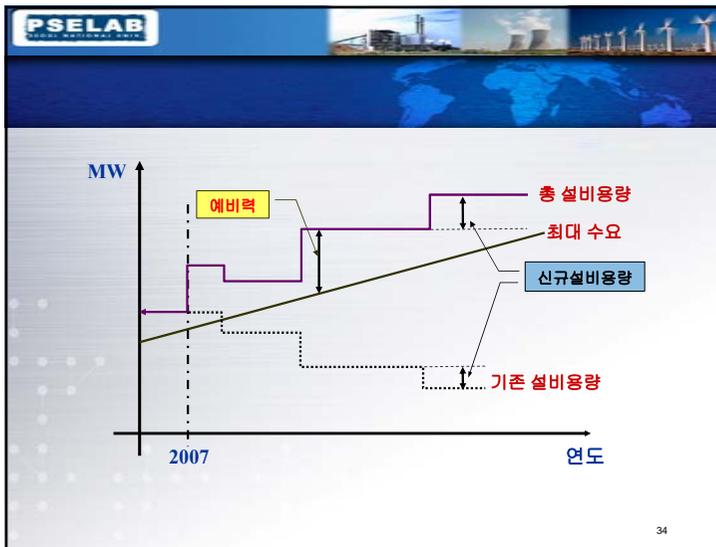
우리나라의 전력 수급 기본 계획

전원 설비 구성 전망 (2006년 현재)

(단위 : 만kW, %)

구 분	원자력	석 탄	LNG	석 유	수력/기타	합 계
2006년 제3차	1,772 (27.0)	1,847 (28.2)	1,744 (26.6)	468 (7.1)	725 (11.1)	6,556 (100)
2010년 제2차	1,872 (23.8)	2,427 (30.9)	2,055 (26.1)	491 (6.2)	1,018 (13.0)	7,863 (100)
2010년 제3차	1,872 (23.9)	2,420 (30.9)	2,039 (26.0)	482 (6.1)	1,028 (13.1)	7,841 (100)
2017년 제2차	2,664 (30.3)	2,224 (25.3)	2,313 (26.3)	333 (3.8)	1,270 (14.4)	8,804 (100)
2017년 제3차	2,732 (29.0)	2,642 (28.0)	2,615 (27.7)	236 (2.5)	1,207 (12.8)	9,432 (100)
2020년 제3차	2,732 (29.0)	2,642 (28.0)	2,615 (27.7)	232 (2.5)	1,207 (12.8)	9,428 (100)

35

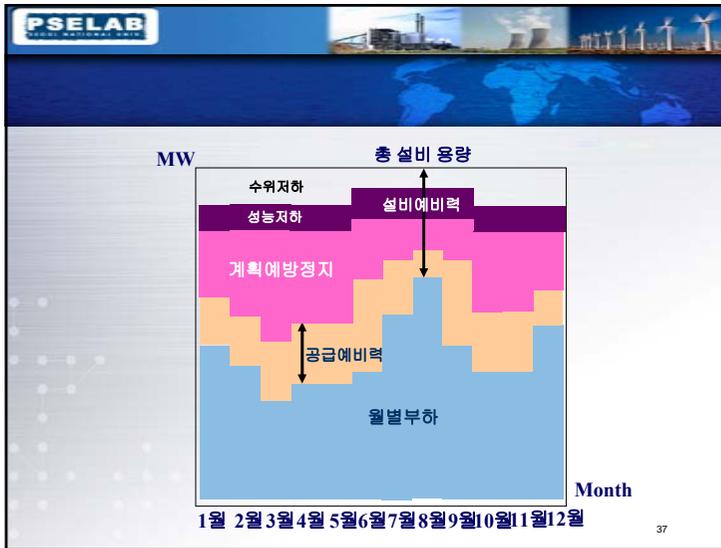


전원개발계획과 예비력의 관계

예비력 구분

- 설비예비력**: 연간 최대 수요를 초과하여 보유하는 여유설비의 크기를 나타내는 지표
전원개발계획 수립시 사용하는 수치
- 공급예비력**: 설비용량에서 발전기 계획예방정지, 수위 저하에 의한 수력의 출력감소분 등을 제외한 공급 능력과 해당 시점의 수요와의 차이
발전소 정비계획 수립시 평가자료로 활용
- 운전예비력**: 전력계통의 고장, 사고, 부하 변동 등에 대비하여 신속히 (보통 5분 ~ 10분) 대응할 수 있는 예비력
- 순동예비력**: 운전예비력 중에서 순간적인 (보통 10초 이내) 출력증가 가능분
계통 고장이나 사고시의 안정도 및 부하차단 등의 평가자료로 활용

36



발전 설비 투자 설정 방법

% 예비력에 의한 방법

- 최대 수요보다 일정 % 이상의 설비용량을 보유하도록 하는 방법
- 계획 입안자의 경험을 바탕으로 한 방법
- 발전기의 용량, 대수, 고장 정지를 등에 따른 필요 예비력의 변화를 반영할 수 없음

LOLP에 의한 방법

← 선진국에서 널리 이용

- 예비력을 결정함에 있어서 향후 1년 동안 발전계통을 운전할 때, 어느 순간에 가장 가능한 발전출력이 수요보다 적게 될 시간 (LOLP)이 주어진 기준시간을 넘지 않도록 설비를 정비하는 방법

공급지장비용에 의한 방법

← 현실적으로 적용이 어려움

- 예비력을 결정함에 있어서 향후 1년 동안 발전계통을 운전할 때, 고장 정지 및 보수로 인하여 공급지장이 발생하면 그때의 지장비용을 설비투자비와 비교하여 투자를 가감하는 방법

예비력의 필요성 및 결정요소

예비력 필요성

1. 발전기의 보수, 고장
2. 수요 성장의 불확실성
3. 건설 공기 지연의 가능성

▶ 예비력 과다 : 투자비 과중에 따른 재무구조의 악화, 전력 요금 상승

▶ 예비력 과소 : 공급부족사태 빈발, 경제활동 지장, 전력회사의 침포

예비력 결정요소

최대 수요, 구성 발전기의 용량 및 대수, 설비 구성, 보수기간, 발전기의 고장 정지를 등

공급지장 확률 (LOLP)

Loss of Load Probability (LOLP)의 정의

주어진 설비로 미래의 어느 년도에 전력을 공급할 때, 1년 중 설비의 고장 및 보수 등으로 인하여 전력 공급에 차질이 생길 시간 (또는 일)의 기대값

공급지장 확률의 계산 방법

1. LOLP의 시간 단위 계산: 시간별 공급지장시간의 기대값을 연간 누적 계산

$$LOLP(\text{시간/년}) = \sum_{j=1}^{365} P_j$$
(단, P_j : j 시간대의 공급지장시간 기대값)
2. LOLP의 일 단위 계산: 일별 공급지장시간의 기대값을 연간 누적 계산

$$LOLP(\text{일/년}) = \sum_{i=1}^{365} P_i$$
(단, P_i : i 일의 공급지장일수 기대값)
3. LOLP의 년 단위 계산: 부하 지속 곡선(Load Duration Curve)과 심사 곡선(Screen Curve)을 이용하여 계산

PSELAB
PSEUDO ENERGY LABORATORY

최적전원구성 개요

최적전원구성 (Optimal Plant Mix) 의 정의

전력수요를 충족시킴에 있어서 계획기간 동안의 투자비 및 운전비의 현재가치가 최소화 되도록 설비구성을 결정하는 것

최적전원구성의 일반적 방법

원두 부하 건설비가 싸고 운전비가 비싼 발전기로 대응
기지 부하 건설비는 비싸고 운전비는 싼 발전기로 대응

전원구성 방법의 종류 및 특징

정태분석법 vs. **동태분석법**

41

PSELAB
PSEUDO ENERGY LABORATORY

부하지속곡선 (Load duration curve)

43

PSELAB
PSEUDO ENERGY LABORATORY

정태분석법

정태분석법의 특징

- 어느 한 해 동안의 최대 부하 및 부하지속곡선을 대상으로 하여 전원별 발전용량을 결정하는 방법
- 각 발전소의 연간 고정비 및 운전비의 합계를 최소화하도록 설비 구성을 결정
- Screening Curve법이 대표적인 예

정태분석법의 한계

- 발전기는 건설되면 20~30년 운전되므로 어느 한 해의 최적구성은 다른 년도의 구성과 관련되어 다 발전기 운전에 영향을 미침
- 연도별 최적구성이 아닌 계획기간 전체를 대상으로 하는 **동태분석법**이 필요함

42

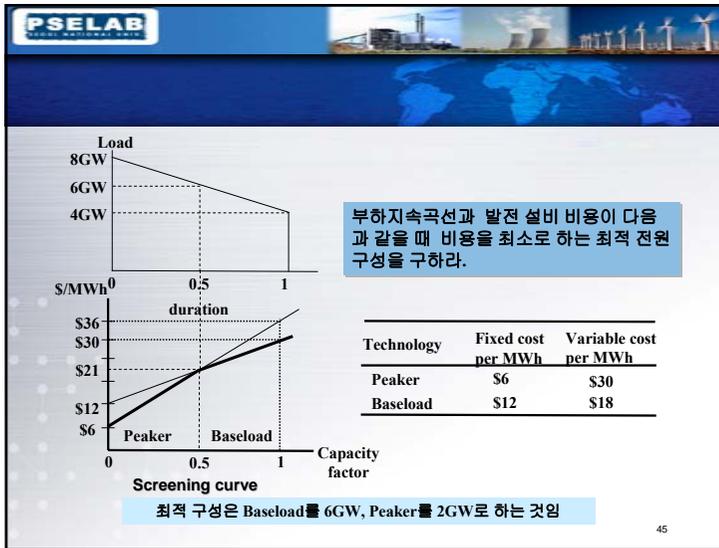
PSELAB
PSEUDO ENERGY LABORATORY

심사곡선(Screening Curve)법

심사곡선법 (Screening Curve법)

- 이용률에 따라 발전원가 (고정비 원가+변동비 원가)가 변화하는 것을 이용하여 발전 형식별로 경제적인 이용률 범위를 계산하여 특정 이용률에서는 어느 발전원이 유리한가를 알아내는 방법
- 예비력을 고려하여 전원구성을 구하지 못한다는 단점이 있음

44



45

1.6.4 유통 설비 계획

전원 개발 계획이 정해지면 이 전력을 부하 지점까지 수송하기 위한 유통 설비 계획이 필요함

유통 설비 계획의 고려 조건

- 지역별 전원 배치의 적정화
- 국지 전원과 계통 전원과의 최적 배분
- 각종 전원의 배치와 계통 구성과의 협조

47

동태분석법

동태분석법의 특징

- 한 연도가 아닌 전원개발계획 대상기간 전체에 대하여 발전계통의 공급신뢰도를 만족하면서 연도별 공급비용의 합계가 최소가 되도록 전원구성을 결정하는 방법
- 전원개발계획 수립시 최적전원구성을 위한 대표적 방법
- WASP, EGEAS와 같은 전산모형의 활용이 필요
- 동태분석법에 영향을 미치는 요소는 예측된 최대 수요, 부하지속곡선, 발전기 용량, 건설 단가, 연료비, 고장 정지율, 할인을 등임

46

1.6.5 전력 수급 계획

전력수급계획의 개요

전력계통 계획 • 운용과의 관계

```

    graph LR
      subgraph "계통 계획"
        A[장기수요예측] --> C[전력 계통]
        B[장기공급계획] --> C
        D[전원개발 • 구성] --> C
      end
      subgraph "계통 운용"
        E[단기수요예측] --> C
        F[운영계획] --> C
        G[운영제어] --> C
      end
      C --- H[수급계획]
      C --- I[계통운영계획]
  
```

[운영계획의 구성]

1. 수급계획 : 수급 balance 유지, 수요예측 오차 및 발전기 고장 등을 고려해 예비력을 포함한 발전기의 발전 출력을 책정
2. 계통운영계획 : 공급신뢰도의 확보나 전력품질유지의 방안을 입안하는 계획

1.6.6 Unit commitment(1)

- ❖ 발전기(unit)의 투입, 분리 순서를 결정
 - 발전 가능한 발전기 Set을 결정하는 과정
 - 사람의 생활패턴에 따라 부하가 시간에 따라 변화
 - 발전기의 종류 및 특성을 고려(제약 조건)
 - 발전단가가 저렴한 발전기부터 투입
- ❖ 제약 조건(Constraints)
 - Unit constraints
 - 최대 출력, 최소 출력, start-up 비용
 - 최소 기동시간, 최소 정지시간
 - Ramp-up time and ramp-down time
 - System constraints
 - 수급 균형, 운전 예비력
 - 송전제약, CO₂ 배출 제약

49

1.6.7 경제 급전(최적화 이론)

Economic Load Dispatch

- A. 최적화 이론 (Optimization Theory)
- B. 경제급전(Economic Load Dispatch; ELD)의 개념
- C. 경제 급전의 정식화
- D. 경제 급전의 해

51

Unit commitment(2)

- ❖ Unit Commitment의 구분
 - NUC (Unit commitment with Normal economic dispatch)
 - 사고를 고려하지 않은 Unit commitment
 - 비용이 적게 드는 반면 사고 발생시 안전도 붕괴위험
 - PUC (Security-constrained Unit commitment)
 - N-1기준을 만족하는 Unit commitment
 - 안전도는 높으나 많은 비용이 필요
 - CUC (Unit commitment with post-contingency corrective rescheduling)
 - 사고 발생 후 correction time(15-30분)동안 rescheduling
 - 안전도는 PUC보다 낮으나 사고에 대응할 수 있고, 비용도 PUC보다 저렴해서 경쟁환경하에서 선호되는 타입
 - RBUC
 - CUC의 경제성 및 사고발생후의 대응 능력과 PUC의 높은 안전도, 두 장점을 살린 Unit commitment

50

A. 최적화 이론

- 1.1 구배 (Gradient)
- 1.2 라그랑지 승수 (Lagrange Multiplier)
- 1.3 라그랑지 함수 (Lagrange Function)

52

PSELAB

1.1 Gradient

함수가 최대로 증가하는 방향을 의미
 함수 $f(x)$ 의 그래디언트 $= \nabla f(x)$

$$\nabla f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)$$

53

PSELAB

1.2 라그랑지 승수

다음과 같은 최적화 문제를 생각해 보자

$$\text{Min } f(x_1, x_2) = 0.25x_1^2 + 0.25x_2^2$$

$$\text{s.t. } w(x_1, x_2) = 2 - x_1 - x_2 = 0$$

55

PSELAB

예제

함수 $f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2$ 의 (1, 1)에서의 그래디언트를 구하라.

Sol.) 아래 그림에 그래디언트(a)가 표시되어 있다.
 같은 크기의 다른 방향(b, c)에 비해 f 가 많이 증가함

$$\nabla f = (2x_1, 2x_2) \Big|_{x_1=x_2=1} = (2, 2)$$

54

PSELAB

최적점 (1, 1)에서는 ∇f 와 ∇w 가 같은 직선 상에 존재함

(x_1', x_2') 에서는 b의 반대 방향으로 제약 조건 상에서 이동하면 함수의 크기가 감소함

(x_1'', x_2'') 에서는 c의 반대 방향으로 제약 조건 상에서 이동하면 함수의 크기가 감소함

56

PSELAB

• 앞의 그림은 최적점에서는 제약 조건과 목적 함수의 그래디언트가 같은 직선상에 존재해야함을 보여줌

• 최적점에서는 다음 식이 성립하는 상수(라그랑지 승수) λ 가 존재

$$\nabla f + \lambda \nabla w = 0$$

$Min f(\mathbf{x}) \quad s.t. \quad w_1(\mathbf{x})=0, \dots, w_m(\mathbf{x})=0$

↓ 최적점에서는 아래 식이 성립

$$\nabla f(\mathbf{x}) + \lambda_1 \nabla w_1(\mathbf{x}) + \dots + \lambda_m \nabla w_m(\mathbf{x}) = 0$$

57

PSELAB

B. 경제 급전의 개념

경제 급전이란? 발전소에 부하를 적절히 배분하여 연료 비용을 최소화하는 것

경제 급전시 만족해야 하는 제약 조건

- 1) 각 발전기 출력의 합 = 총부하
- 2) 각 발전기의 출력 제약

경제 급전 문제에서는 송전 계통이 정확하게 고려되지는 않음

59

PSELAB

1.3 라그랑지 함수

$L(\mathbf{x}, \lambda) = f(\mathbf{x}) + \lambda \mathbf{w}(\mathbf{x})$

↓ x 와 λ 에 대한 1계 미분 조건

$\frac{\partial L(\mathbf{x}, \lambda)}{\partial \mathbf{x}} = \nabla f(\mathbf{x}) + \lambda \nabla \mathbf{w}(\mathbf{x}) = 0$
 $\frac{\partial L(\mathbf{x}, \lambda)}{\partial \lambda} = \mathbf{w}(\mathbf{x}) = 0$

$L(\mathbf{x}, \lambda)$ 의 1계 미분 조건을 만족하는 점이 아래 최적화 문제의 해가 됨

$Min f(\mathbf{x})$
 $s.t. w_1(\mathbf{x}) = 0, \dots, w_m(\mathbf{x}) = 0$

58

PSELAB

C. 경제 급전의 정식화

- 3.1 목적 함수
- 3.2 제약 조건
- 3.3 정식화

60

PSELAB
POWER SYSTEM ENGINEERING LABORATORY

3.1 목적 함수

계통에 n 대의 발전기가 있다고 가정할 경우,
목적 함수 : n 대 발전기의 연료 비용의 합을 최소화

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n C_i(P_i)$$

C_i : 발전기 i 의 연료 비용(P_i 에 대한 2차 함수)
 P_i : 발전기 i 의 출력
 n : 발전기의 수

61

PSELAB
POWER SYSTEM ENGINEERING LABORATORY

3.2 제약 조건

2) 발전기 출력 제약:

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$$

P_i^{\min} : 발전기 최소 출력
 P_i^{\max} : 발전기 최대 출력

발전기 출력이 최소값과 최대값 사이에 존재

63

PSELAB
POWER SYSTEM ENGINEERING LABORATORY

3.2 제약 조건

1) 부하 조건: 부하의 합을 D 라 가정할 경우

$$\sum_{i=1}^n P_i = D$$

발전기 출력의 합이 총부하량과 같아야 함
손실을 포함시키기도 함

$$\sum_{i=1}^n P_i = D + \text{Loss}$$

62

PSELAB
POWER SYSTEM ENGINEERING LABORATORY

3.3 정식화

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n C_i(P_i)$$

s.t. $\sum_{i=1}^n P_i = D$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

두 종류의 제약 조건(방정식, 부등식)을 만족시키며
발전 비용을 최소로 하는 것임

64

PSELAB

D. 경제 급전의 해

- 4.1 라그랑지 함수
- 4.2 해의 유도
- 4.3 순서도

65

PSELAB

4.2 해의 유도

라그랑지 함수에 대해 다음 조건을 만족하는 해를 구하면 기존 문제의 비용을 최소화 하는 발전기 출력이 구해짐

$$\frac{\partial L}{\partial P_1} = 0, \frac{\partial L}{\partial P_2} = 0, \dots, \frac{\partial L}{\partial P_n} = 0, \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$$

↓ 편미분을 하면 다음의 식이 구해짐

$$\frac{\partial L}{\partial P_1} = \frac{dC_1}{dP_1} - \lambda = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial P_2} = \frac{dC_2}{dP_2} - \lambda = 0, \dots$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_n} = \frac{dC_n}{dP_n} - \lambda = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} = -\left(\sum_{i=1}^n P_i - D\right) = 0$$

67

PSELAB

4.1 라그랑지 함수

경제 급전 문제의 해를 구하기 위해 목적 함수와 제약 조건을 포함하는 라그랑지 함수를 도입

기존 문제

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n C_i(P_i)$$

s.t. $\sum_{i=1}^n P_i = D$

→

라그랑지 함수

$$L = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) - \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_i - D \right)$$

66

PSELAB

↓ 앞 식을 정리하면 다음과 같음

$$\frac{dC_1}{dP_1} = \frac{dC_2}{dP_2} = \dots = \frac{dC_n}{dP_n} = \lambda \quad \left(\sum_{i=1}^n P_i - D \right) = 0$$

위 식의 의미를 해석하면

- 각 발전기의 증분 비용(incremental cost)은 λ 로 동일함
- 각 발전기의 출력의 합은 부하와 같음
- 발전기의 비용함수는 다음과 같은 2차 함수로 가정

$$C_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$$

68

PSELAB
POWER SYSTEM LABORATORY

↓ $\frac{dC_i}{dP_i} = 2a_i P_i + b_i$ 임을 이용하여 계산하면 다음과 같음

$$2a_i P_i + b_i = \lambda \rightarrow P_i = \frac{\lambda - b_i}{2a_i}$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda - b_i}{2a_i} = D \rightarrow \lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} + 2D}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i}}$$

$$P_i = \frac{1}{2a_i} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} + 2D}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i}} \right) - \frac{b_i}{2a_i}$$

69

PSELAB
POWER SYSTEM LABORATORY

4.3 순서도

```

    graph TD
      A[기존 경제 급전 문제] --> B["Min ∑_{i=1}^n C_i(P_i) s.t. ∑_{i=1}^n P_i = D"]
      B --> C[새로운 평가 함수 L의 도입]
      C --> D["L = C_1(P_1) + C_2(P_2) + ... + C_n(P_n) - λ(P_1 + P_2 + ... + P_n - D)"]
      D --> E["L에 대해 일정한 조건을 만족하는 출력 P를 구함"]
      E --> F["∂L/∂P_1 = 0, ∂L/∂P_2 = 0, ..., ∂L/∂P_n = 0, ∂L/∂λ = 0"]
      F --> G["발전기 출력 상·하한 제약 확인"]
      G -- No --> C
      G -- Yes --> H[급전 Dispatch]
  
```

$$P_i = \frac{1}{2a_i} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} + 2D}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i}} \right) - \frac{b_i}{2a_i}$$

71

PSELAB
POWER SYSTEM LABORATORY

각 발전기의 증분 비용이 같으며 출력의 합이 부하가 되는 점에서 발전기 출력이 결정됨

증분 비용 λ

발전기 5, 발전기 2, 발전기 3, 발전기 1, 발전기 4

출력 $P_5^{\min}, P_1, P_2, P_4^{\max}, P_3$

각 발전기의 출력 분담 $\sum_{i=1}^n P_i = D$

70

PSELAB
POWER SYSTEM LABORATORY

ELD 예제

1. 다음과 같이 주어진 각 발전기의 비용함수와 출력 제약을 이용해서 각 발전기의 최적 경제 운전점을 구하라.

발전기 비용함수

$$C_1(P_1) = 561 + 7.92P_1 + 0.001562P_1^2 \text{ [원/h]}$$

$$C_2(P_2) = 310 + 7.85P_2 + 0.00194P_2^2 \text{ [원/h]}$$

$$C_3(P_3) = 78 + 7.97P_3 + 0.00482P_3^2 \text{ [원/h]}$$

발전기 출력제약

$$150\text{MW} \leq P_1 \leq 600\text{MW}, 100\text{MW} \leq P_2 \leq 400\text{MW}$$

$$30\text{MW} \leq P_3 \leq 200\text{MW}$$

72

PSELAB
POWER SYSTEM ENGINEERING LABORATORY

Sol.)
$$\text{Min} \sum_{i=1}^3 C_i(P_i)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^3 P_i = 850 \text{ MW}$$
 라그랑지 함수로 표현
$$L(P_1, P_2, P_3, \lambda) = \sum_i C_i(P_i) + \lambda(850 - P_1 - P_2 - P_3)$$

73

PSELAB
POWER SYSTEM ENGINEERING LABORATORY

$\lambda = 9.148 \text{ 원/MWh}$
 $P_1 = 393.2 \text{ MW}$
 $P_2 = 334.6 \text{ MW}$
 $P_3 = 122.2 \text{ MW}$

- 1) 각 발전기의 출력은 제약에 걸리지 않는다.
- 2) 모든 발전기의 증분비용은 동일하다.

75

PSELAB
POWER SYSTEM ENGINEERING LABORATORY

$L(P_1, P_2, P_3, \lambda)$ 의 1계 미분 조건은

$$\frac{dC_1(P_1)}{dP_1} = 7.92 + 0.003124 P_1 = \lambda = \frac{\partial L}{\partial P_1}$$

$$\frac{dC_2(P_2)}{dP_2} = 7.85 + 0.00388 P_2 = \lambda = \frac{\partial L}{\partial P_2}$$

$$\frac{dC_3(P_3)}{dP_3} = 7.97 + 0.00964 P_3 = \lambda = \frac{\partial L}{\partial P_3}$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = 850 \text{ MW} = \frac{\partial L}{\partial \lambda}$$

74

PSELAB
POWER SYSTEM ENGINEERING LABORATORY

2. 발전기 1의 비용함수가 다음과 같이 변할 경우

$$C_1(P_1) = 459 + 6.48 P_1 + 0.00128 P_1^2 [\text{원/h}]$$

$$\lambda = 8.284 \text{ 원/MWh}$$

$$P_1 = 704.6 \text{ MW}$$

$$P_2 = 111.8 \text{ MW}$$

$$P_3 = 32.6 \text{ MW}$$

- 1) 발전기 1의 출력은 출력제약에 걸린다. $150 \text{ MW} \leq P_1 \leq 600 \text{ MW}$
- 2) 발전기 1의 출력은 상한치로 고정 된다.
발전기 2와 3은 출력 제약에 걸리지 않는다.

76



$$P_1 = 600MW \quad \lambda'' = 8.016\text{원/MWh}$$

$$\frac{dC_2(P_2)}{dP_2} = 7.85 + 0.00388P_2 = \lambda$$

$$\frac{dC_3(P_3)}{dP_3} = 7.97 + 0.00964P_3 = \lambda$$

$$P_2 + P_3 = 850 - P_1 = 250MW$$

$$P_2 = 187.1MW \quad \lambda = 8.576\text{원/MWh}$$

$$P_3 = 62.9MW$$