

# 원자력발전과 신-재생발전의 공생전략

A Study on the Win-Win Strategy Scheme for the Energy Transition In Korea

– With a Special Attention on Nuclear Power and  
NRSE (New and Renewable Source of Energy) –







## 위 원 장

최 기 련(한국과학기술한림원 정회원, 아주대학교 명예교수)



## 위 원

김 승 조(한국과학기술한림원 정회원, 서울대학교 명예교수)

김 영 창(아주대학교 초빙교수)

엄 환 섭(한국과학기술한림원 종신회원, 아주대학교 연구교수)



## 자문위원

윤 용 범(한국전력 전력연구원 차세대송변전연구소 소장)



# 요약문

연구과제명	국 문	원자력발전과 신-재생발전의 공생전략		
	영 문	A Study on the Win-Win Strategy Scheme for the Energy Transition In Korea - With a Special Attention on Nuclear Power and NRSE(New and Renewable Source of Energy) -		
연구책임자	성 명	최기련	한림원 소속부	정책학부

○ 한국과학기술한림원이 수행하는 본 연구의 기본 의도는 2030년 신재생 전력 20% 달성을 목표로 하는 정부의 3020계획에 따른 에너지부문, 특히 전력부문에서의 파급효과를 살펴보고, 효율적인 에너지전환(Transition)정책 추진에 필요한 과학기술적 분석과 성찰의 계기를 마련함에 있음

○ 그 세부목표와 주요내용은:

- 탈원전, 신재생발전 확대에 따른 국가전력시스템 변화여건 분석
  - \* 2030년 신재생전력 20% 달성을 목표로 하는 에너지전환정책 시행에 대응한과학기술적 논리 개발
- WASP(Wien Automatic System Planning Package)모형을 활용한 신재생 전력설비 확장방법론 검증: WASP\_V 모형개발<sup>1)</sup> 가능성 사전 검증
- 장기 전력수급계획에서의 활용 방법론을 제시 및 건의
  - \* 정부의 효율적 에너지전환정책 추진을 위한 과학적 논리제시 및 건의사항 제시

1) WASP모형 개발주체인 국제원자력기구(IAEA)가 이런 목적을 가진 모형 개량작업을 국제공동연구형식으로 추진 중임. 이 작업에 본 연구팀 참여자(김영창 교수)가 참여 중임

- 2030년까지 정부의 신재생전력 20% 달성을 목표 달성이 가능하다는 전제 아래서의 발전기 건설계획의 변동가능성과 파급효과를 검토함. 그 결과 송·변전 및 배전설비 보완비용 및 가스터빈 등 백업 발전시스템 비용 등을 제외하고도 약 144 조 원의 추가부담이 발생할 가능성이 WASP모형 실행 결과로 도출되었음<sup>2)</sup>
- 이는 신재생전력의 간헐성을 보완과 출력 변화에 따른 송·변전 관련 비용임<sup>3)</sup>
  - 이러한 비용추가는 불확실한 기술혁신 가능성과 소비자 선택의 변화를 고려하지 않은 정태적 분석결과임
  - 따라서 장기 전력수급계획, 에너지전환 전략 뿐 아니라 국가에너지계획, 지속가능성장계획 등 각종 경제사회전략 변화를 통해 가능할 것으로 추정됨.<sup>4)</sup> 이를 위해서는 강력한 사회적 합의기반 구축이 필요할 것임
- 지금까지 전력 관련 기술혁신은 ICT 등 여타 부문에 비해 지연되어 왔음. 그러나 최근 디지털화, 스마트화 등 제4차 산업혁명의 견인 역할을 수행하기 시작하였음
  - 이에 전력산업구조의 근본적 변혁이 예상되어 충분한 기술혁신효과를 반영할 수준의 장기 전력수급계획의 목표연도를 최소 30년 정도 확대가 필요함. 이에 따라 에너지전환계획의 목표연도 연장이 필요함

---

2) 실제 계산에 있어서는 7차 전력수급계획 대상연도인 2035년까지를 계산대상기간으로 함. 이는 비용의 변동규모를 파악하기 위한 충분한 대상기간 설정을 위한 것임. 2030년까지 약 7,000만 kW의 신재생전원이 투자될 수 있는가 또는 7,000만 kW의 백업발전기가 건설될 수 있는가에 대하여는 별도의 검토가 필요함

3) 본 과제의 검토는 WASP 모형을 이용한 비용변화의 검토이며 전력시스템운용에서 7,000만 kW의 신재생 발전용량 추가건설 수용성 여부는 검토하지 않음

4) 전력부문 정책/전략/계획은 제외한 여타 경제사회정책에 대해서는 제한된 연구범위와 기간을 가진 본 연구에서는 언급을 자제함

- 이런 차원에서 원전과 신재생의 환경저해 등 외부효과, 발전단가, 부지 소요 등은 가변적 요소가 많기 때문에 엄격한 기술평가와 정례적인 보완이 필요함
  - 특히, 모든 요소기술들이 발전부문 혁신에 소요될 가능성을 감안하여 국가차원 대규모 미래전력기술 기술평가와 기술기획 사업을 조속 추진 할 것을 건의함. 이런 사업은 국내외 최고 전문가조직과의 공동연구가 바람직할 것임
- 우리 한국과학기술한림원은 가변적인 전력기술혁신추세에 부응하여 정부는 2개의 장기기술개발과제와 기존 신재생기술개발계획과 별도로 신재생전력 계통연계 효율화에 필요한 9개 중기 기술개발과제를 시행할 것을 건의함
- 장기기술개발과제: 우주태양광발전, 소형모듈형 원전
  - 중기 기술개발과제: 신재생자원에 대한 국내잠재량 및 계통수용성 제고 기술개발 등 9개 과제
- 송-배전망 보강은 신재생발전원의 증가에 따른 필수요소이며 막대한 투자를 유발하는 것이므로 추후 상세분석 필요하며, 전력산업 구조개편의 주요 과제로 취급하여야 함
- 현재 원전과 신재생전력에 관련된 많은 기술적 경제적 불확실성이 노출되고 있음. 이에 정부는 내년부터 제9차 전력수급계획 작성에 필요한 기술혁신 효과와 시장적응도 변화, 그리고 사회적 합의 도출가능성을 고려하여 차선 (次善, Second-Best)의 에너지전환정책의 추진을 검토할 필요가 있음
- 이를 위해 2030년 신재생 20% 달성을 목표의 실질적 내용을 발전량 기준에서 설비용량 기준으로 바꾸어 최선의 기술조합 구성을 검토할 필요가 있으며,

- 또한 에너지절약 + 순환형 재생에너지(VRE: Variable Renewable Energy)로만 20% 목표달성을 프로그램을 구성하는 대안검토도 가능할 것임

○ 이상에서 언급한 내용을 종합한 건의사항으로는:

- 현재 적용한 제7차 장기 전력수급계획과 일부 알려진 2020에너지전환 계획 관련 자료에 근거한 신재생-원전 상생계획 구도의 설정 방법론은 한계가 있음을 인지바람
  - 현존 장기 전력수급계획 수립 방법론의 기반인 WASP모형의 활용을 위해서는 적어도 30년의 계획기간을 설정하는 장기정책 기조 아래서 에너지전환경책을 추진해야 하며 단-중기계획에는 경제적 효율성을 고려한 차선(次善)의 선택을 수용해야 함
  - 성공적인 에너지전환경책 추진을 위해 에너지시장과 산업 구조 전환, 그리고 소비자 대응태세 변화를 촉진할 다양한 경제사회전략을 사회적 합의를 기반으로 추진할 것을 건의함. 특별히 에너지관련 정책은 자연 과학-사회과학-인문과학이 통합된 복합과학적 논리를 가져야 장기 효율성이 입증된다는 점을 강조함
  - 신재생 전력 위주 에너지전환경책 추진을 위해서는 현재 신재생전력이 가지는 규모의 불경제, 생산의 편협성, 기술성숙도 미비 등 경제적-기술적 한계를 극복하는 동태적 기술혁신성과 평가 작업이 필요함
  - 따라서 정부는 2030년 신재생전력 20% 수준 달성을 위한 에너지전환경책의 기반이자 선행조건으로 대규모 신재생 포함 전력기술전반에 걸친 기술기획-평가 작업을 수행해야 할 것임
- \* 이를 통해 신재생 전력의 그리드 패리티(Grid Parity: 기존 전력 대비 경제성 확보) 시기와 형식에 대한 세계 최고수준의 기술정보 확보가 효율적 에너지전환경책 추진의 요체라는 점을 건의함

- 에너지전환정책은 에너지가격, 적정 공익규제 등 경제사회정책과 기술 혁신을 통한 에너지기술체계 혁신정책으로 구분이 구분됨
- 한국과학기술한림원에서 주관하는 본 연구는 에너지기술체계 혁신에 연구의 중점을 둠
- 특히 현재 우리나라 에너지전환정책 수립 초기 과정에서 에너지기술체계 혁신이 경제사회정책의 효율적 수립과 집행의 기반이 된다는 점을 강조하고자 함

○ 본 연구과정에서 도출한 가장 중요한 우리나라 에너지전환정책의 미래 시사점은:

- 원전과 신재생 전력이 상생할 수 있는 국가에너지전환정책의 성공기반은 충실한 신재생-전력기술 기술기획-평가임
- 따라서 본 연구팀은 우리나라가 활용 가능한 최고의 전문가 집단을 활용한 기술기획 및 평가 사업단을 구성하고,
- 최단 시일 내 세계 최고수준 연구결과 도출이 가능하도록 정부가 지원하는 것이 효율적 에너지전환정책 추진의 요체라는 점을 견의함





## 목 차

I. 서론 및 연구개요 .....	1
1. 연구의 목적 .....	1
2. 연구개발의 필요성 .....	1
3. 에너지전환정책 수립을 위한 장기 전력수급계획 기법의 보완 …	4
II. 우리나라 신재생발전 잠재량 및 특성 .....	7
1. 신재생발전 잠재량 .....	7
2. 신재생발전 특성 .....	9
III. 신재생 발전특성을 반영한 장기전원 개발계획 방법론 .....	12
1. 시스템 부하모형 .....	12
2. 부하(Net load)모형 .....	13
3. 전원개발계획에서의 급전대상발전기 처리 .....	19
4. 실시간 시스템운용과 신재생발전기 취급 .....	22
IV. WASP모형에 의한 장기전원개발 계획실행 .....	24
1. WASP(전원계획 모형) 개요 .....	24
V. WASP 모형운용결과 및 해결과제 .....	28
VI. 신재생 확대를 위한 기술개발 과제 .....	36
1. 신재생 전원확대에 따른 전력계통 영향 .....	36
2. 신재생발전확대에 대비한 기술적 해결과제 .....	42



## 목 차

VII. 요약, 결론 및 정책건의 .....	57
1. 연구내용의 요약 .....	57
2. 연구의 결론 .....	64
3. 건의 .....	66
VIII. 부록: 미래 전력기술 .....	67
부록 1. 소형 모듈형 신형 원자로(SMR: Small Modular Reactor) – 지속가능 미래 원자력 옵션 – .....	67
부록 2. 우주 기반 태양광 발전 .....	76
부록 3. IEA의 재생에너지 보급정책 .....	92
IX. WASP모형의 설명 .....	98
1. 기존발전설비모형(FIXSYS) .....	98
2. 후보발전기모형(VARSYS) .....	99
3. 후보발전기 조합 모형 .....	100
(CONGEN: Expansion Configuration Generator Program)	
4. 운용비 및 신뢰도 평가모형 프로그램(MERSIM) .....	104
5. 최적화 프로그램(DYNPRO) .....	105
■ 참고문헌 .....	107



## 표목차

〈표 2.1〉 우리나라 신재생 총 잠재량(신재생에너지백서, 2016) .....	7
〈표 2.2〉 우리나라 태양 및 풍력발전 총 잠재량(신재생에너지백서, 2016) ..	8
〈표 2.3〉 재생에너지의 장단점 .....	9
〈표 4.1〉 프로그램별 입력데이터의 특성 요약 .....	26
〈표 5.1〉 시뮬레이션 입력자료 .....	29
〈표 5.2〉 시뮬레이션 후보 발전기 .....	30
〈표 5.3〉 기준 시나리오에서의 연도별 전원설비계획(MW) .....	31
〈표 5.4〉 신재생에너지원을 고려한 경우의 연도별 설비계획(MW) .....	32
〈표 5.5〉 신재생전력 20% 달성을 고려한 연도 별 발전량 .....	33
〈표 5.6〉 신재생에너지원을 고려한 경우의 비용추정 .....	35
〈표 6.1〉 신재생에너지 증가에 따른 계통영향 .....	42
〈표 6.2〉 2016년 대비 2029년 최대부하 및 발전량 .....	46
〈표 6.3〉 각 기관별 태양광 설치면적 .....	47
〈표 6.4〉 태양광 및 풍력발전 설비건설에 필요한 면적(예시) .....	47
〈표 6.5〉 신재생에너지 증가에 따른 제약 및 해결방안 .....	53
〈표 8.2.1〉 세계 1차 에너지 수요량 .....	76
〈표 8.2.2〉 각 에너지원 별 에너지 밀도 .....	78
〈표 8.2.3〉 연료별 세계 전력 생산량 .....	79
〈표 8.3.1〉 후보발전기조합의 예 .....	101
〈표 8.3.2〉 유형 별 누적대수 제한 시의 후보발전기조합 .....	103
〈표 8.3.3〉 CONGEN 입력자료의 예시 .....	103



## 그림목차

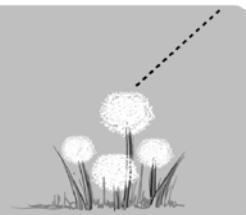
〈그림 2.1〉 유럽주요국가의 태양광 발전기 출력패턴 .....	10
〈그림 2.2〉 유럽주요국가의 풍력발전기 출력패턴 .....	10
〈그림 2.3〉 독일의 태양광 발전과 연도별 실시간 시장가격 추이 .....	11
〈그림 3.1〉 시간대별 부하곡선과 부하지속곡선의 예 .....	13
〈그림 3.2〉 신재생에너지 확대에 따른 부하모형 변화 .....	14
〈그림 3.3〉 신재생에너지 확대에 따른 순부하 지속곡선 .....	14
〈그림 3.4〉 신재생전원을 반영한 설비계획 방법진화 .....	17
〈그림 3.5〉 신재생전원비중에 따른 최적전원 구성변화 .....	18
〈그림 3.6〉 풍력발전 비중에 따른 국가별 소요예비력 변화 .....	18
〈그림 3.7〉 스페인에서의 기상변화 및 전원구성에 따른 조류변동 개념도 ·	20
〈그림 3.8〉 독일에서의 기후변동에 따른 신재생출력변동 .....	21
〈그림 4.1〉 WASP 모형 구성 .....	27
〈그림 6.1〉 불확실성 증가에 따른 요소 기술변화 개념 .....	36
〈그림 6.2〉 풍력 및 태양광발전증가에 따른 부하변화(미, 캘리포니아) ..	37
〈그림 6.3〉 기존발전기의 역할변화 개념도 .....	38
〈그림 6.4〉 신재생전원 증가에 따른 계통영향 개념도 .....	39
〈그림 6.5〉 풍력발전기가 전력계통에 미치는 영향 .....	39
〈그림 6.6〉 태양광전원 연계전후의 전압응동 .....	40
〈그림 6.7〉 유럽 주요국의 복합가스 화력(CCGT) 설비 이용률의 추이 ..	41
〈그림 6.8〉 캘리포니아 duck chart .....	43
〈그림 6.9〉 신재생에너지 확대에 필요한 기술체계도 .....	45

〈그림 6.10〉 풍력발전예측 개념도	48
〈그림 6.11〉 태양광 예측 개념도	49
〈그림 6.12〉 태양광 발전의 모델개발 개념도	50
〈그림 6.13〉 신재생전원과 유연성 자원과의 협조개념도	51
〈그림 6.14〉 신재생전원과 수요관리 협조개념도	52
〈그림 6.15〉 신재생출력에 따른 변전소에서의 전력조류변화	52
〈그림 6.16〉 태양광 및 풍력발전비용 추세	54
〈그림 6.17〉 최근의 태양광 및 풍력발전의 저비용 사례	55
 〈그림 8.1.1〉 에너지저장시스템기술의 종류 및 용량(2008년)	70
〈그림 8.1.2〉 NuScale SMR 발전소의 정전사고 후 장기냉각 능력	73
〈그림 8.2.1〉 기존 에너지자원의 한계	77
〈그림 8.2.2〉 우주태양광발전의 장점	81
〈그림 8.2.3〉 태양광발전시스템 : 발전위성, 무선전송시스템, 수신용 레테나	82
〈그림 8.2.4〉 우주기반 태양광 발전 개념도	83
〈그림 8.2.5〉 에너지 공급을 위한 전 세계 투자액	85
〈그림 8.2.6〉 우주항공기술만 아니라 전 분야의 필요기술들	90
〈그림 8.2.7〉 우주태양광 발전위성 구상도	91
〈그림 8.3.1〉 국가별 20212년 발전량 점유율 비	93
〈그림 8.3.2〉 재생에너지 확대를 위한 인프라 개선요소	94



# I

## 서론 및 연구개요



### 1. 연구의 목적

- 탈원전, 신재생발전 확대에 따른 국가전력시스템 변화여건 분석
  - 2030년 신재생전력 20% 달성을 목표로 하는 에너지전환정책 시행에 대응한 과학기술적 논리 개발
- WASP(Wien Automatic System Planning Package)모형을 활용한 신재생 전력설비 확장방법론 검증
  - WASP\_V 모형개발<sup>1)</sup> 가능성 사전 검증
- 장기 전력수급계획에서의 활용 방법론을 제시 및 건의
  - 정부의 효율적 에너지전환정책 추진을 위한 과학적 논리제시 및 건의사항 제시

### 2. 연구개발의 필요성

#### □ 현행 에너지 전환정책 기조의 배경

- 2015년 우리나라는 세계적인 기후변화 대응 노력에 동참하기 위해 2030년까지 BAU(기준 전망) 대비 37%의 온실가스를 감축하는 국가 온실가스 자발적 감축목표를 발표함

1) WASP모형 개발주체인 국제원자력기구(IAEA)가 이런 목적을 가진 모형 개량작업을 국제공동연구형식으로 추진 중임. 이 작업에 본 연구팀 참여자(김영창 교수)가 참여 중임

- 
- 문재인 대통령 “탈원전”정책 선포: 2017년 6월 고리1호기 연구정지 선포식에서 신고리 5·6호 원자로 건설 중단을 검토하고 향후 2030년까지 신재생에너지를 전체 전력의 20%까지 높이겠다는 탈원전 정책 발표
  - 공론화위원회 구성: 2017년 7월 정부는 국무회의 의결을 통해 신고리 원자력발전소 5·6호기 공사를 잠정 중단하고 이와 관련한 사회적 합의를 도출하기 위해 공론화위원회를 구성하고 일정 규모의 시민배심원단에 의한 ‘공론조사’ 방식을 추진을 의결. 국민적 신뢰가 높고 중립적인 인사를 중심으로 열 명 이내의 공론화위원회를 구성하고, 3개월 동안 한시 운영됨
    - 신고리 원전 5·6호기 건설 중단은 문 대통령의 대선공약 중 하나였지만 사회적 논란과 갈등이 심각해지자 정부는 국민의 판단에 맡기기로 하고, 숙의(熟議)형 공론조사(deliberative poll)라는 새로운 방식으로 여론을 수렴키로 하고 “공론화위원회”를 출범
  - 공론화위원회의 종료 및 건의
    - 2017년 10월 20일 활동종료의 결론으로 “신고리 5, 6호기 건설 재개와 장기적 원전 축소”를 정부에 건의함. 이는 영구 중단 시 이미 투입된 1조 6000억 원의 공사비를 포함, 총 2조 6000억 원의 매몰비용 고려. 그러나 전체 전력 생산에서 원전이 차지하는 비중은 줄이는 에너지전환정책 추구를 건의함
      - \* 정부는 국무회의 의결을 통해 공론화위원회 건의를 전폭 수용함
    - 또한 정부는 탈(脫)원전 중장기 계획을 확정함
      - \* 그 요지는 신고리 원전 5·6호기는 당초 계획대로 건설하되 신규 원자력발전소 6기 건설을 백지화하고, 2038년까지 설계수명이 끝나는 원전 14기 가동을 연장하지 않기로 함

## □ 우리나라 전력부문의 수급여건

### ○ 국가 에너지수급구조에서의 전력의 위치

- 최고급에너지로서 위치 강화, 특히 4차 산업혁명시대의 기반 에너지로서 위치 강화

\* 우리나라 최종 에너지소비 중 전력비중: 1990년 10.8% → 2000년 13.7% → 2010년 19.1% 이후 20% 전후 수준 지속유지

- 8차 수급계획 수요전망(안: 2017. 11월 중순 기준, 전력거래소): 국내 수요는 2030년까지 최대전력 기준 연평균 1.3%, 전력소비량 기준으로 1.0%씩 증가해 2031년 최대수요는 101.1GW에 이를 전망
- 에너지전환 정책 이행을 전제로 한 2030년 전원별 용량 비중(전력거래소 피크기여도 기준): LNG(가스발전) 37%, 석탄 31%, 원전 17%, 신재생 8%, 기타 7%일 것으로 잠정 전망

\* 참고: 2016년 기준 전원별 용량 비중: LNG 32%, 석탄 32%, 원전 23%, 기타 9%, 신재생 3%

- 2030년 재생에너지 발전량 비중 20% 달성을 위해 확충요구 설비(전력거래소): 태양광 33.0GW, 풍력 15.7GW, 기타 13.9GW 등 약 63GW<sup>2)</sup>

### ○ 에너지전환정책에 부응한 우리나라 전력부문 해결과제

- 기저발전 비중조정: 전력생산량 기저발전(원자력과 석탄화력 발전)의 비중이 2016년 기준 용량기준 55%, 발전량 기준 70%에 달함. 이에 원전, 석탄화력 발전의 축소조정은 전력수급의 불균형을 초래하지 않는 범위에서 완급조절이 필수임
- 원자력발전의 온실가스 감축기여도 대체방안 강구: 온실가스 배출량 감축 국가목표 달성을 계획과 연계한 원전 감축계획 추진

---

2) 63GW의 출력이 피크발생 시에 8%의 출력비중을 차지하는 것인지에 대하여도 “피크기여도”로서 설명이 가능하여야 함

- 
- 천연가스발전: 천연가스공급 안정성 확보가 관건. 시장가격 불확실성에 대응하고 지정학적 위험 등 에너지 안보차원의 검토가 필요함. 특히 러시아 가스 확보 등에 대한 장기적인 심층검토가 추가 요구됨
  - 재생에너지 발전 부문 비중 확대: 토지 소요확대, 전기요금 인상 가능성 등 기존 발전방식과는 차별적인 추가 연구와 관련 기술혁신추세에 대한 심층 분석이 요구됨. 특히 신재생전력의 확대기조가 확대됨에 따라 세계 각국에서는 자체 전력시스템 규모 및 특성, 신재생자원 잠재량 등을 기반으로 중장기적으로 신재생 확대시의 예상 문제점을 사전도출 및 대응전략 수립을 추진하고 있음에 유의

### 3. 에너지전환정책 수립을 위한 장기 전력수급계획 기법의 보완

- 국가 장기 전력수급계획 작성의 기반이 되는 WASP(Wien Automatic System Planning Package) 모형 운용과정에서 신재생전력 발전을 외생변수로 취급하는 기존 연구방법론의 개선 시도
- 이번 연구에서는 신재생발전의 증가를 고려하여 시스템부하곡선을 변경 하였으며 신재생발전의 발전량을 고려하기 위하여 시스템부하율을 변경하는 것으로 하였음
- 발전량의 20%를 신재생발전이 담당한다면 부하율이 약 20~24% 감소하게 됨
- 현재 IAEA가 추진 중인 WASP\_V 모형은 후보발전기로서 신재생발전을 추가하고 후보발전기 종류별 개수를 지정하여 신재생발전출력의 변화를 자동적으로 처리함(2018년 완성 예정)
- 이 방법은 신재생에너지 단지별 식산대별 출력변동을 표현하여 발전기 대수별로 부하지속곡선을 조정하는 것임
- WASP\_V 모형논리에 입각한 새로운 기법 활용시도

- 설비용량 구성비 변화에 따른 비용변화 및 백업발전기의 필요용량을 산출
- 이는 비용측면에서의 검토이며 시스템운용 상 실행가능성은 별도의 검토대상

#### □ 연구방법론 개선

- 본 연구를 추진함에 있어 국가전력정책의 검토를 위한 기본활용모형인 WASP의 운용과정에서 분석알고리즘의 한계 등으로 신재생전력을 외생 변수로 취급하여 왔음. 따라서 에너지전환정책의 시행에 따라 기존 방법론의 개선 필요성이 강력하게 제기됨
- 이에 본 연구에서는 새롭게 시도한 검증 방법은 신재생발전의 영향을 부하지속곡선의 변동으로 나타내는 기법이며 신재생에너지발전과 중앙 급전가능발전기의 취급방법을 달리 하여야 하기 때문임
- 이를 위해 제7차 장기 전력수급계획에 활용한 기본 입력자료 및 기술변수들에 대한 심층 기술평가작업을 수행하였음
- 이에 반해 금년 말까지 정부가 확정 예정인 제8차 전력수급계획과 2020신재생 계획에서 확정할 전력시장, 전력산업 구조, 가격 등에 대한 고려는 현재 시점에서 정확한 자료입수가 불가능하여 고려하지 않았음
- 단지 이미 발표되고 알려진 정부의 에너지전환정책과 제7차 전력수급계획의 내용과 관련 자료를 활용하였음

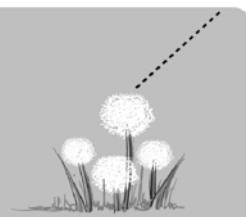
#### □ 국내외 발전기술별 사업여건 변화 및 외부비용 조사

- 우리나라 발전원별 기술평가와 외부효과 분석
- 특히 신재생전력발전의 기술 분석 및 외부비용 평가, 그리고 국가 에너지 시스템에의 파급효과 검증

- 
- 한국 고유의 에너지 환경, 에너지 관련 국내외 여건변화, 에너지 안보 등을 감안한 기술-경제성 평가기법 검토
  - 신재생전력을 고려한 국가전력시스템의 효율적 확장기법 모색  
: WASP 운용방법론의 개선
  - WASP(Wien Automatic System Planning Package) 개요
    - 1974년 미국의 TVA 전력회사의 R. Taber Jenkins와 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)에서 개발된 발전설비확장계획 수립용 전산모형
    - 국제원자력기구(IAEA)가 이것을 수정하여 WASP-II로 발표하였고, 현재 세계 각국의 전력회사가 활용
      - 우리나라는 1977년에 IAEA를 통하여 도입하여 장기 전력수급계획 수립에 활용
  - WASP 운용방법론의 개편
    - 종래 외생변수로 단순 고려하던 신재생발전 관련 자료를 전력수요의 변환으로 대체하는 방법 사용
    - 현실: 신재생전원은 기본적으로 기상변수에 따라 달라지며 중장기 전원계획에서 이와 같은 기상변수를 정확히 예측한다는 것은 현실적으로 불가능하며 신재생에너지원을 급전가능발전기와 분리하여 처리하는 방법을 채택
    - 개선방향: 신재생에너지발전원이 증가함에 따른 시간대별 전력수요곡선의 변형을 정량화하는 방안 강구
- \* 비용최소화, 변동성 대응자원, 설비예비력 및 시스템운용의 순동예비력 확보 등 관련 변수처리방안 모색

## II

### 우리나라 신재생발전 잠재량 및 특성



#### 1. 신재생발전 잠재량

##### □ 국내 신재생 부존량 현황(에너지공단(2016))

- 산업통상자원부와 한국에너지공단에서는 신재생에너지 백서(2016)를 통하여 우리나라의 신재생에너지 잠재량을 다음과 같이 3가지로 구분하여 발표
  - 이론적 잠재량: 우리나라 전체에 부존하는 에너지 총량
  - 지리적 잠재량: 설비가 입지할 수 있는 지리적 요건을 고려한 잠재량
  - 기술적 잠재량: 현재 기술수준으로 산출될 수 있는 에너지 생산량
- 신재생에너지 백서에 의하면 대상 신재생에너지 및 구분 잠재량 총 설비용량 및 연간발전량은 다음과 같음
  - 대상 신재생에너지: 태양, 풍력(육상, 해상), 수력, 바이오, 지열(심부, 천부), 폐기물, 해양(조류, 조력, 파력(연산중, 미포함), 해수온도차발전
  - 우리나라 신재생 총 잠재량 중 현재 기술수준을 반영한 기술적 잠재량은 8,965GW, 이에 상응하는 연간발전량은 12,167TWh로 추정(〈표 2.1〉 참조)

〈표 2.1〉 우리나라 신재생 총 잠재량(신재생에너지백서, 2016)

설비(GW)			연간발전량(TWh/year)		
이론적	지리적	기술적	이론적	지리적	기술적
137,949	39,099	8,965	246,702	49,563	12,167

- 
- 신재생에너지 중 태양광 발전의 기술적 잠재량은 74억kW<sup>3)</sup>, 이에 상응하는 연간 발전량은 10,123TWh로 추정
  - 그리고, 풍력발전(육상 및 해상)의 기술적 잠재량은 96.7GW, 이에 상응하는 연간 발전량은 194TWh로 추정하고 있으며 세부내용은 <표 2.2>와 같음

**<표 2.2> 우리나라 태양 및 풍력발전 총 잠재량(신재생에너지백서, 2016)**

구 분	설 비(GW)			연간발전량(TWh/year)		
	이론적	지리적	기술적	이론적	지리적	기술적
태 양	97,459	24,178	7,451	132,362	32,839	10,123
풍 력	육상	487.4	118.0	63.5	726	207
	해상	423.0	215.9	33.2	1,241	668

- 풍력발전의 경우 설비용량 기준으로 기술적 잠재량은 육상이 해상보다 약 2배 정도인 63.5GW로 전체 영토의 약 13%를 가용하는 것이며 해상은 33.2GW로 전체 영해의 약 8%를 가용하는 것으로 분석(한전전력연구원(2017))
- 태양광은 설비용량으로 보면 기술적 잠재량은 풍력발전에 비해 약 77배 정도일 것으로 추정

---

3) 현재 1억 1천만 kW 수준의 급전가능발전 설비를 갖고 있는 상황에서 기술적 잠재량으로서 74억 5,100만 kW의 태양광발전, 9억 6,700만 kW의 풍력발전용량을 가정하였지만 그 수치의 의미를 파악할 필요 있음  
 - 과학자들이 장기간에 걸쳐 자연력 기반 전력생산능력을 충분히 활용하지 못 하였던 이유를 재검토하여 개발가능용량 그리고 시스템운용에서 감당할 수 있는 용량을 평가하는 연구를 거쳐야 함

## 2. 신재생발전 특성

### □ 신재생전원 일반적 특성

- 신재생발전 중 태양광과 풍력발전은 지구의 무궁한 자연에너지원을 이용하는 방식
- 에너지 자급률을 높일 수 있고 유해물질을 배출을 최소할 수 있다는 장점
- 반면, 낮은 에너지밀도와 높은 출력변동 등으로 인하여 부지확보 및 안정적 전력공급 및 시스템운용을 위한 기술적/경제적 대책마련, 건설비감소가 향후의 선결과제

**〈표 2.3〉 재생에너지의 장단점**

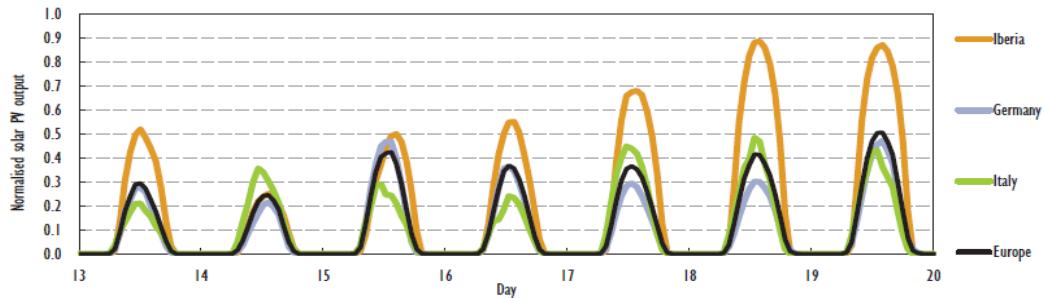
장 점	단 점
고갈될 염려가 없음	낮은 에너지 밀도
에너지 자급율 향상	낮은 설비이용율
유해물질 배출 거의 없음	높은 출력변동
보수용이, 장수명	소음, 진동
소규모, 분산형 발전 가능	높은 발전비용(태양광)

### □ 신재생전원의 변동성과 불확실성

- 신재생전원을 대표하는 태양광과 풍력발전의 출력특성은 에너지원인 햇빛과 바람과 같은 기상요인과 밀접한 관계를 가짐
- 태양광은 계절별로는 다소 패턴이 있기는 하지만 하루 중에는 일반적으로 주간 시간대에 발전(다만, 안개나 눈, 먼지와 같은 기상요인에 의하여 출력이 변동)

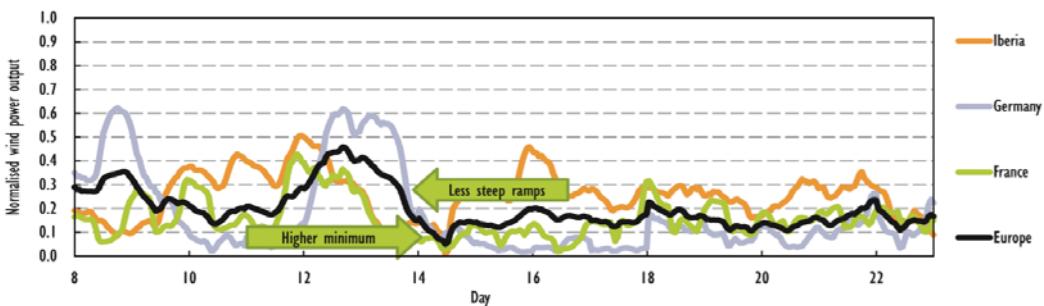
- 일반적으로, 어느 정도 넓은 지역에 분포된 태양광의 합성 발전출력은 <그림 2.1>에 나타낸 바와 같이 종(bell)모양을 보임

<그림 2.1> 유럽주요국가의 태양광 발전기 출력패턴(OECD/IEA(2014))



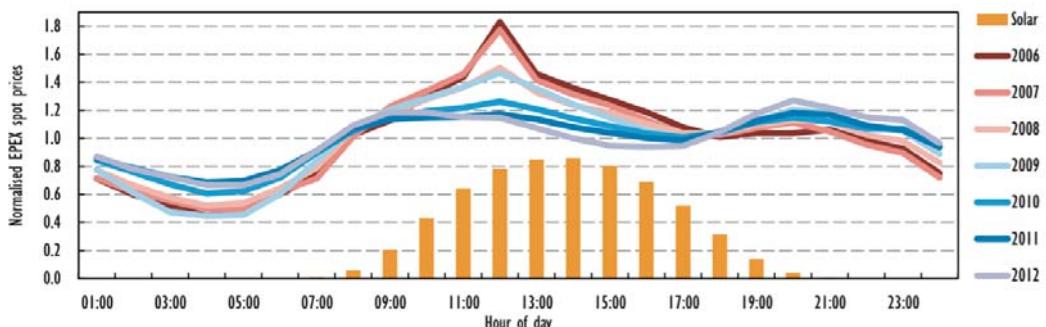
- 풍력발전은 계절별 또는 위치별로 상이하며 하루 중에도 불규칙한 변동을 보임
  - 일반적으로 지역마다 년중 바람이 많은 부는 특정 계절이 존재
  - 풍력발전은 넓은 지역에 분포할수록 합성출력의 변동성은 감소(smoothing effect)
  - 시스템 전체적으로는 출력이 평활하게 되지만 풍력출력의 지역별 변동에 따른 지역 간의 전력수송을 위한 송전망이 건설되어야만 합성출력이 의미를 가짐

<그림 2.2> 유럽주요국가의 풍력발전기 출력패턴(OECD/IEA(2014))



- 태양광 발전출력과 전력수요 패턴의 상관성은 사람의 활동과 연관성이 있으며 전력수요변동과도 연관성이 높 반면, 풍력발전과의 상관성은 낮음
  - 지역에 따라서 전력수요가 증가할 때 풍력발전이 감소(음의 상관성)하거나 증가하는 경우도 발생 가능
    - 다수지역에서 육상풍력은 야간에 최대출력, 해상풍력은 주간에 최대출력이 출현함
  - 기상조건의 변화로 인한 태양광발전 출력의 지역별 변동이 생기면 지역 간의 전력수송을 위한 송전망이 존재하여야 함(송전망 건설 투자가 필수적임)
  - 태양광 발전과 전력수요 패턴과의 높은 상관성은 전력시장에서의 주간시간대 전력가격 하락으로 이어지게 되며 태양광 발전량이 증가함에 따라 이와 같은 현상은 더욱 심화
    - 예) 독일에서의 주간시간대 태양광 발전에 따른 현물시장 가격변화

〈그림 2.3〉 독일의 태양광 발전과 연도별 실시간 시장가격 추이(OECD/IEA(2014))



### III

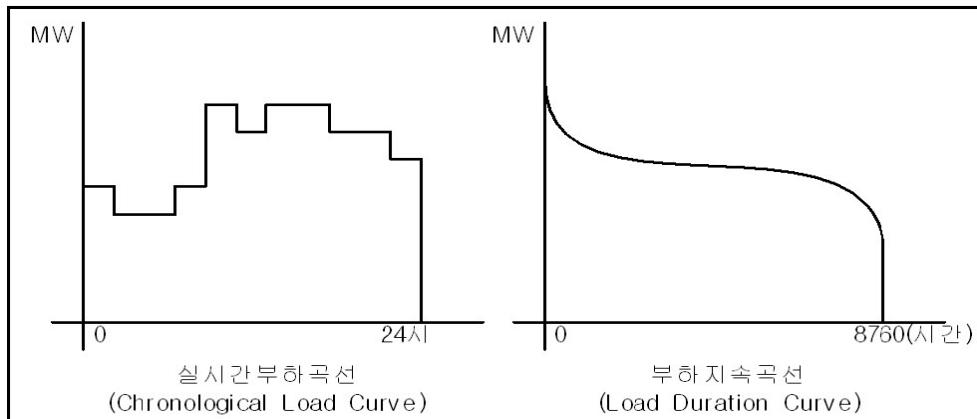
## 신재생 발전특성을 반영한 장기전원 개발계획 방법론



### 1. 시스템 부하모형

- 시간대별 부하곡선(Chronological System Load Curve)
  - 일정기간동안의 시간대별 총 전력수요를 나타낸 것(<그림 3.1>의 왼쪽)으로 경제급전 및 발전기 기동정지, 예비력 관리와 같이 주로 전력계통 운용계획 수립시에 사용
  - 일반적으로 최고부하(피크)는 년간 부하곡선의 경우 하계 또는 동계에, 일부부하 곡선의 주간시간대에 나타남
  - 신재생발전의 시간대별 출력도 시간대별 부하곡선으로 표현함
    - 물론 한 시간 내에도 시스템부하 및 신재생발전출력도 분 단위로 변화함
    - 시뮬레이션을 위하여 한 시간 마다의 발전량을 출력으로 나타냄
  - WASP모형의 시스템운용비 시뮬레이션에서는 시스템부하의 시간대별 곡선에서 재생에너지발전의 시간대별 변화를 감하는 pre-dispatch 기법 사용
- 부하지속곡선(System Load Duration Curve)
  - 시간대별 부하곡선의 시간대별 부하를 내림차순으로 재배치한 곡선(<그림 3.1>의 오른쪽)으로서 시간정보를 포함하지 않고 있으며 계통비용 최소화 측면에서의 시스템운용비를 계산하는데 사용함

〈그림 3.1〉 시간대별 부하곡선과 부하지속곡선의 예

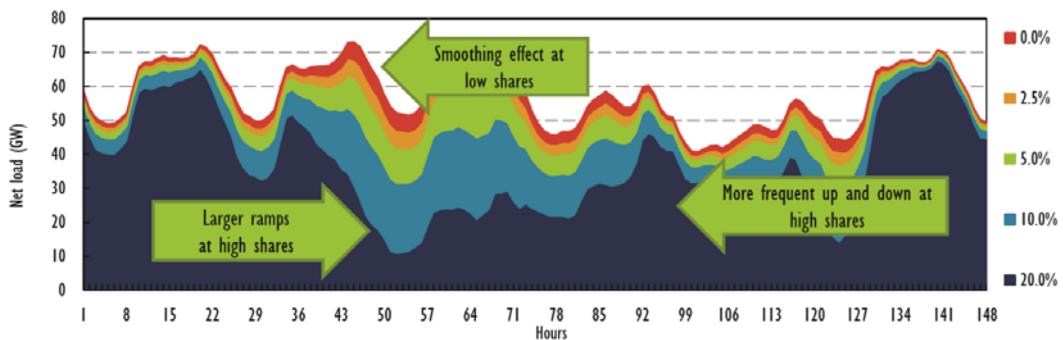


## 2. 부하(Net load)모형

### □ 시간대별 순부하곡선(Chronological Net Load Curve)

- 시스템 부하에서 신재생전원에 의한 발전출력을 제외한 부하로서 중앙급전 발전기가 공급하는 부하를 나타냄
- 신재생발전원이 증가함에 따라 최고부하(피크)의 발생시점은 햇빛이나 바람과 같은 자연력의 변화의 영향을 많이 받을 것으로 예상됨
  - 〈그림 3.2〉는 독일 전력계통을 기준으로 풍력발전 비중증대에 따른 1주일간의 시스템부하와 순부하 패턴을 예시한 것으로 피크발생시점이 풍력발전 비중에 따라 이동하는 경향을 나타냄
  - 또한, 변동성측면에서도 신재생에너지원이 증가할수록 변동폭 뿐만 아니라 횟수도 증가

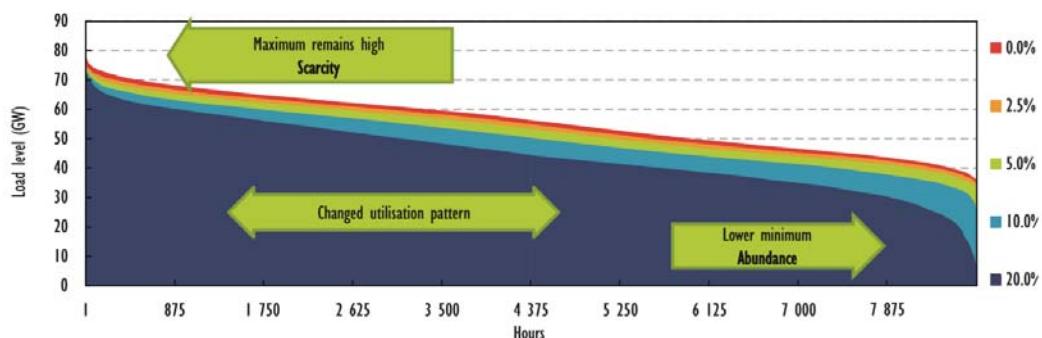
〈그림 3.2〉 신재생에너지 확대에 따른 부하모형 변화(OECD/IEA(2014))



#### □ 순부하지속곡선(Net Load Duration Curve)

- 〈그림 3.3〉은 독일에서의 2010년 전력수요를 기준으로 신재생에너지 증가를 가정한 경우의 순부하지속곡선을 나타낸 것으로 최대부하 감소폭은 작은 반면, 경부하 시간대는 증가하는 경향을 보이고 있음
- 이로 인하여 기존의 기저전원(주로 원자력 및 석탄) 및 첨두전원(주로 가스발전기)들의 이용률이 변동함
  - 순부하의 부하지속곡선이 평평(flat)해진다면 기저전원의 이용률은 증가
  - 역으로 부하지속곡선이 〈그림 3.3〉에 나타낸 바와 같이 더욱 경사지게 된다면 기저전원의 이용률은 대체적으로 감소

〈그림 3.3〉 신재생에너지 확대에 따른 순부하지속곡선(OECD/IEA(2014))



## □ WASP에서의 부하모형 처리프로그램(LOADSY) 소개

- 발전설비화장계획 수립기간 동안의 최대수요, 발전량 및 부하지속곡선의 형태를 정의하는 프로그램임
- 1년을 4분기 또는 12개월로 나누어서 각 기간 별로 부하지속곡선을 5차 다항식 형태 또는 x-y 좌표로 입력함
- 계획기간은 몇 개의 stage(동적계획법의 하나의 스테이지, 주로 1년을 뜻함)로 나누어지며 각 스테이지는 1년에 해당됨
- 사용자는 다시 하나의 스테이지를 계산의 편의 상 12 개의 기간 또는 분기로 나눌 수 있음
- 이것은 운용비 시뮬레이션을 위한 계산시간의 단위임
- 또 기간 수는 부하의 형태, 수력발전기 특성, 각 발전기의 예방정비계획이 적절하게 고려될 수 있도록 선택되어야 함
- 부하지속곡선은 대상 년도의 부하가 어떤 지정된 값과 같거나 그 값을 초과하게 되는 시간수로 표현됨
- 이 곡선은 어느 기간 동안에 발생한 시간대 별 수요를 발생시각을 무시하고 크기 순서로 배열한 것을 의미하며 아래 <그림 3.1>에 그 예를 나타내었음
- 5차 다항식 또는 x-y 좌표로 표시된 부하지속곡선은 LOADSY 모형에서 MERSIM의 시뮬레이션 실행을 위하여 y-x 좌표로 변환됨
- 부하의 확률적 출현과 발전기의 확률적 고장정지 용량을 컨볼류션하거나 발전량의 기대치를 계산하기 위한 적분과정에는 부하지속곡선을 <그림 3.1>과 같은 형태로 하는 것보다 전도시켜서 사용하는 것이 편리하기 때문임

- 
- 신재생발전의 출력을 시간대별로 나타낸 후 시스템부하곡선에서 신재생발전 출력을 시간대별로 차감하여 부하지속곡선에 입력함

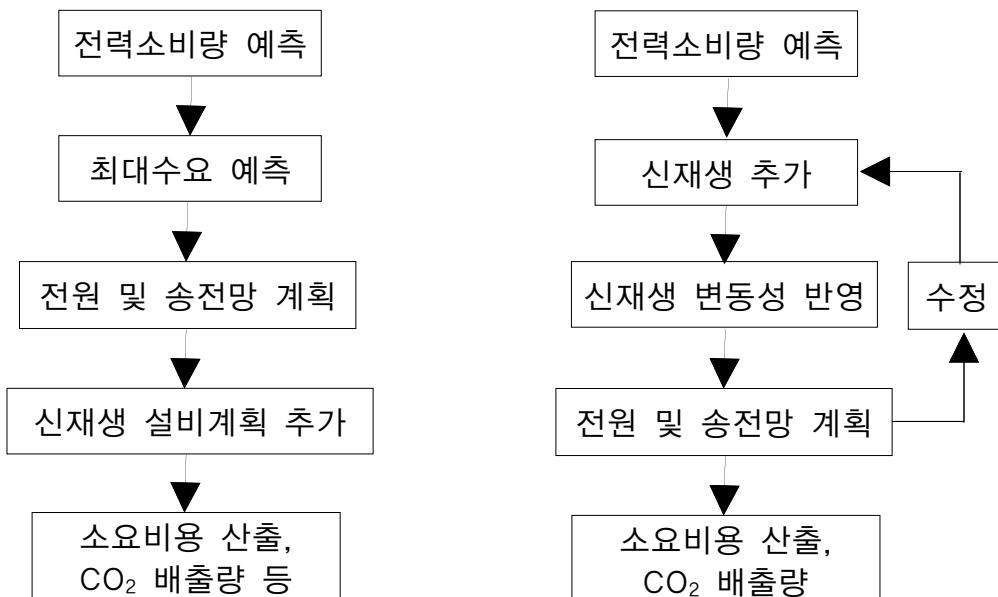
#### □ 최적전원 구성 검토 시 부하모형 반영

- 중장기적으로 전력수요 변동특성을 반영하여 어떻게 최적전원을 구성할 것인가에 관한 문제는 다양한 경제적 변수를 고려하여 해답을 찾아야 하는 최적화 문제임
- 이와 같은 전력수급계획문제에서 신재생에너지의 중장기 출력변동을 기준의 전력수요모형에 어떻게 반영할 것인가가 많은 중요한 과제 중 하나로 논의가 진행 중
  - 신재생발전은 발전기의 접속지점의 전압에 따라 주로 배전전압 또는 소비자 부하지점의 전압에 의하여 발전력을 주입함
  - 시스템운용에서 보면 신재생발전은 소비자의 부하관리효과로 나타나며, 154kV 또는 345 kV의 변전소에서는 부하가 차감된 것으로 나타남
  - 신재생발전의 용량이 6,000만~7,000만 kW의 경우 접속전압을 어떻게 구성할 것인가는 검토대상임
  - 전압에 관계없이 신재생발전의 시간대별 출력변화는 시스템부하를 삭감하는 것으로 처리함(이것은 신재생발전원이 급전가능발전기처럼 취급할 수 없기 때문임)
  - 신재생발전량을 고려하지 않은 기존의 시간대별 전력수요로부터 부하지속곡선 모형(〈그림 3.1〉 참조)을 만들고 이에 의하여 최적 전원설비 투자계획을 산출한 후 신재생 설비계획을 추가하고 백업발전기를 추가하는 방법\*(〈그림 3.4〉에서 전형적 접근방법 부분)

\* 최적이 아닌 준 최적해 성격의 전월설비계획에 해당

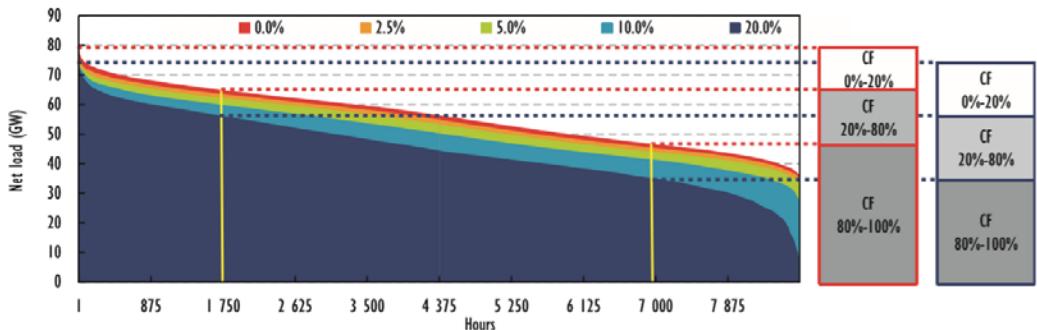
- 기존 전력수요에서 시간대별 신재생발전량을 차감한 순수요(net demand)를 이용하여 부하지속곡선 모형을 만들어 최적설비투자 계획을 산출하는 방법 (〈그림 3.4〉에서 개선방향 부분이며 이 경우에 계획도출 후 백업발전기를 추가함)

**〈그림 3.4〉 신재생전원을 반영한 설비계획 방법진화**  
 〈전형적 접근방법〉                            〈향후 개선방향〉



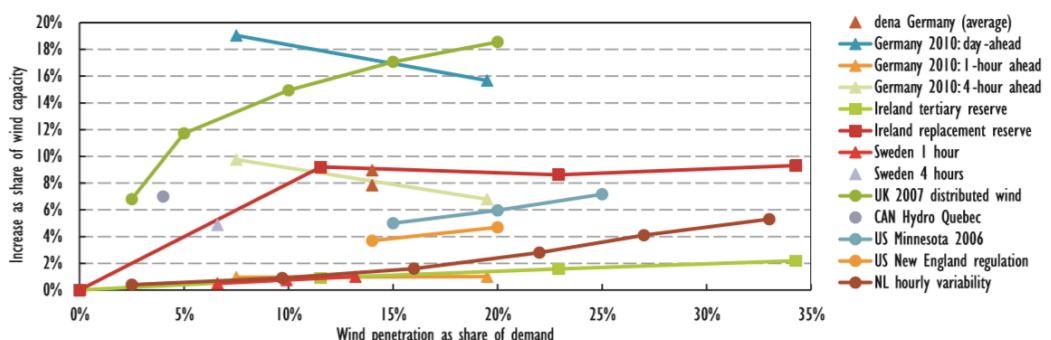
- 신재생발전의 출력은 기본적으로 자연력의 변화에 따라 달라지며 중장기 전력수급계획에서 이와 같은 기상변수를 정확히 예측한다는 것은 현실적으로 불가능
  - 신재생발전이 증가함에 따라 전력부하 모형은 불확실성을 더욱 내포할 것으로 예상되며 이를 어떻게 정량화하여 전력수급계획 작성 시 반영할 것인가가 중요하지만 uncertainty를 고려하는 방법이 개발되어야 함
    - \* 투자비용최소화, 변동성 대응자원, 설비예비력 및 운용예비력 확보 등과 직결

〈그림 3.5〉 신재생전원비중에 따른 최적전원 구성변화(OECD/IEA(2014))



- 특히, 신재생원의 비중이 증가함에 따른 전력수급균형유지 및 신뢰도 유지 측면에서의 합리적 예비력 확보는 큰 관심사 중 하나로서 많은 연구기관 및 전문가들이 이에 대한 분석결과들을 내놓고 있음
- 각 국가 별로 또는 전력회사 별로 신재생발전의 운전여건이 상이하므로 예비력확보 문제는 〈그림 3.6〉에 나타낸 바와 같이 다양한 형태를 보이고 있음

〈그림 3.6〉 풍력발전 비중에 따른 국가별 소요예비력 변화(OECD/IEA(2014))



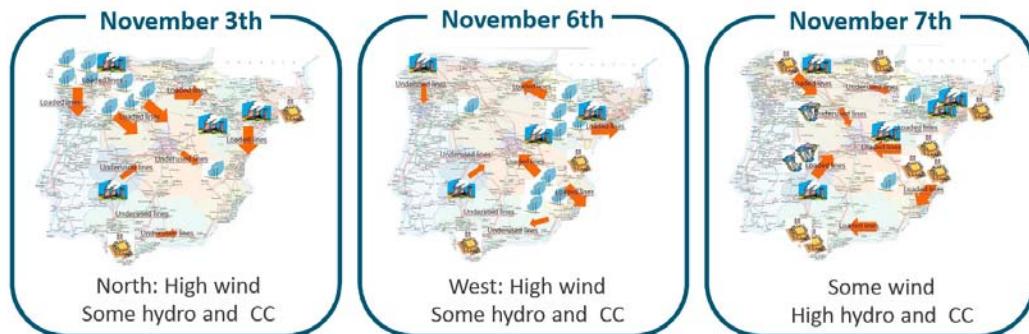
※ 출처: Holttinen, H. et al., 2013

### 3. 전원개발계획에서의 급전대상발전기 처리

- 발전설비확장계획의 후보가 되는 발전기로는 원자력, 유연탄화력, LNG 복합화력, 가스터빈, 수력, 양수발전기 등 여러 유형이 있으며 건설비, 건설기간, 변동비, 운전특성 등이 서로 다름
- 이러한 각종 유형의 발전기 및 전력수요의 특성을 고려해 볼 때, 부하변동에 적절히 대응하면서 최소의 비용으로 수요를 만족시킬 수 있는 발전기의 구성이 매우 중요함
- 유연탄 연소 발전기 및 원자력 발전기는 발전출력의 변화가 거의 없이 높은 출력을 유지하도록 하여 기저부하를 담당하는 발전기로 운전하고, 가스터빈 및 양수발전기는 첨두부하 및 시시각각 변동하는 부하를 담당하도록 하는 것이 경제적임
- 원자력 발전기는 건설비가 높은 대신 변동비가 낮고, 부하의 변동에 따른 출력조정이 어려우며 가스터빈 발전기나 LNG복합화력 발전기와 같은 것은 건설비가 낮은 대신 변동비가 높으며 발전출력의 조정이 용이함
- 이러한 여러 유형의 발전기는 계통운용자가 필요하다고 판단할 때에 기동하거나 출력을 조정하고, 운전 중인 다른 발전기가 고장정지를 일으켰을 때 가동할 수 있는 발전기이며 급전가능 발전기라고 함
- 신재생에너지를 이용한 대부분의 분산형 발전기는 가동 및 출력의 변화가 자연조건에 의존하므로 계통운용자가 필요할 때 임의로 가동할 수 없는 발전기임
- 운전 중인 급전가능 발전기가 고장정지를 일으켰을 때 시스템운용자가 임의로 신재생발전기를 가동할 수 없음

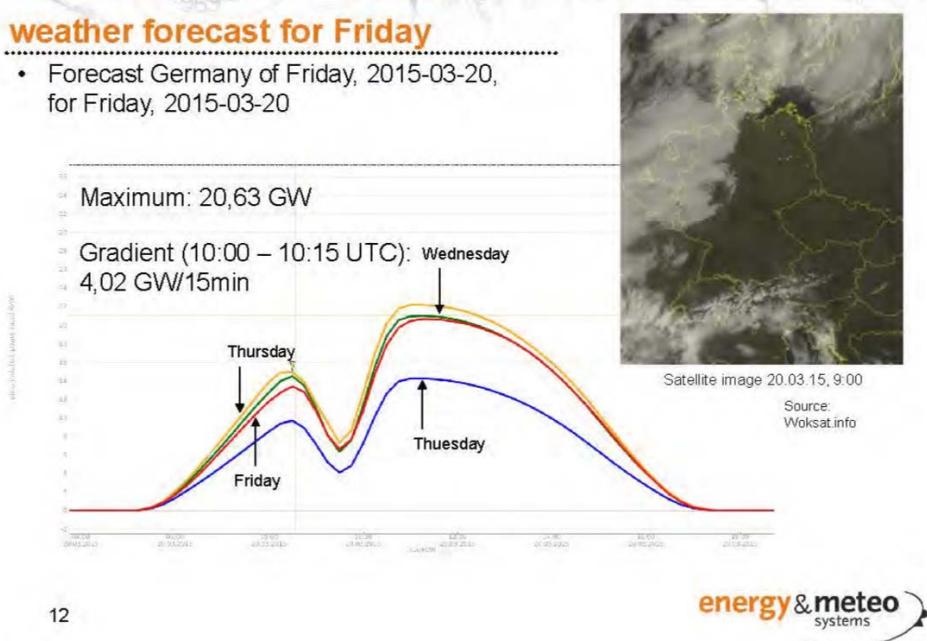
- 이러한 발전기를 급전불가능전원이라고 하며 발전설비확장계획에서 미래에 건설할 대상발전기로서 취급하기 어려움
- 신재생에너지를 이용한 발전기를 다른 후보발전기와 동등하게 고려하여 수급계획을 수립하게 되면, 미래의 어느 시기에 발전기가 고장정지를 일으켰을 경우, 신재생에너지를 이용한 발전기를 계통운용자가 원하는 시기 또는 급전가능 발전기의 고장정지 시에 가동할 수 없음
- 그러면 소비자의 수요를 만족시키지 못하는 경우가 발생하며 이것은 발전 계통의 공급신뢰도를 떨어뜨리는 요소가 됨
- 따라서 신재생에너지를 이용하는 발전기를 후보발전기로서 고려할 때에는 이들이 발전하는 것을 수요의 변화로 보아서 미래의 부하지속곡선을 수정하고 급전가능 발전기를 대상으로 하여 발전설비확장계획을 수립하는 것이 일반적 방법임
- 전력수요는 항상 일정하게 나타나는 것이 아니어서 계절, 요일 및 날씨 등에 따라 큰 차이를 보임
  - 스페인의 경우 풍력발전량에 따른 전력조류 변화(〈그림 3.7〉 참조)

〈그림 3.7〉 스페인에서의 기상변화 및 전원구성에 따른 조류변동 개념도(송승호(2017))



- 또한, 하루 중에도 최대 및 최소부하 사이의 폭이 크고, 시간에 따라서도 불규칙적 변동을 보이며 주별, 월별로도 차이가 큼

**<그림 3.8> 독일에서의 기후변동에 따른  
신재생 출력변동(J. Charles Smith(2016))**



12

- 전력이란 수요의 발생과 동시에 공급이 이루어져야 하는데, 수요와 공급의 차이를 보완해 줄 수 있는 기술적, 상업적 전력저장 방법이 많지 않음
- 현재로서는 양수발전이 하나의 대안이며 배터리저장장치, 압축공기저장장치 등이 고려대상임
- 한편, 발전설비저장계획은 송전계통계획과 서로 연계하여 동시에 수립되는 것이 좋지만, 발전설비저장계획 수립 시에는 송전계통을 단일 모선의 시스템으로 나타내어 전국에 있는 발전기와 수요가 하나의 점에 연결되어 있는 것으로 간주하여, 송전계통계획과는 별도로 처리하고 있음

---

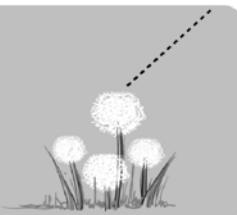
#### 4. 실시간 시스템운용과 신재생발전기 취급

- 실시간 시스템운용은 급전대상 발전기에게 출력변경을 하면서 주파수, 안전도, 경제성을 유지하는 것임
- 시스템운용의 대상이 되는 예비력은 순동예비력(spinning reserve)임
- 신재생에너지 발전기는 대부분 소용량이고, 출력이 자연조건에 의존하고, 급전에서 마음대로 출력을 조정하거나 필요할 때 출력을 조정하라고 명령을 내릴 수도 없음
- 예를 들어 화력발전기가 불시에 고장정지를 일으켰을 때 신재생에너지 발전기는 원하는 출력을 일반 화력발전기처럼 제공할 수 없음
- 또한 발전기가 배전선로에 주로 접속되어 있어서 154kV, 345kV에 접속된 소비자 부하를 대상으로 하는 발전기처럼 하나의 발전기로 취급하기에도 너무 깊게 파묻혀 있어서 154kV 모선의 수요를 취급할 때 수요를 차감해서 나타남
- 예를 들어 22.9kV에 접속된 태양광발전단지가 있을 경우, 154kV 이상의 모선을 대상으로 전력조류계산을 한다면 태양광발전기의 출력은 154kV 모선의 수요를 태양광발전기 출력만큼 차감하여 나타나게 함
- 154 kV모선의 수요를 공급하려고 급전대상발전기의 출력을 조정하면 되는 것임
- 수많은 소비자 소유의 신재생발전기는 주로 소비자 구내의 계량기에서 소비자측에 접속되어 있으므로 신재생 에너지 발전은 소비자 부하가 감소하는 형태로 소비자 계량기에 나타나며 이것은 소비자가 부하관리를 한 것과 같은 효과임

- 실시간 시스템운용에서 급전대상 발전기는 시스템 부하를 공급하기 위하여 현재 가동되어 출력을 조정하는 것이고, 이렇게 가동 중인 발전기의 여유출력을 이용하여 EMS가 주파수 조정, 안전도 유지, 경제성 유지 등의 기능을 하는 것임
- 신재생에너지 발전은 에너지 생산을 도와준 것이고 수요가 전체적으로 낮아진 것임
- 신재생에너지 총 출력을 시시각각으로 파악할 수도 없고 파악할 필요가 없다는 것임
- 발전기 건설계획을 수립할 때에도 공급할 수요는 급전대상 발전기가 공급하여야 할 수요이며 신재생에너지발전이 수요를 미리 차감한 것을 이용함

# IV

## WASP모형에 의한 장기전원개발 계획실행



### 1. WASP(전원계획 모형) 개요

#### □ 기존 WASP-IV모형

- 1974년 미국의 TVA 전력회사의 R. Taber Jenkins와 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)의 D. S. Joy에 의해 개발된 발전설비확장계획 수립용 전산모형
- 그 후, 국제원자력기구(IAEA)가 이것을 수정하여 WASP-II로 발표하였고, 현재 세계 각국의 여러 전력회사가 활용
  - 우리나라는 1977년에 IAEA를 통하여 도입하여 장기 전력수급계획 수립에 활용
- 신뢰도의 제약조건 아래에서 최소비용의 발전설비확장계획을 도출하는 모형
  - 최적화는 R. Bellman의 동적계획법을 이용하고, 운용비 계산은 Baleriaux의 확률적 시뮬레이션<sup>4)</sup>을 이용
- WASP-IV 모형에서 추가된 주요기능은 다음과 같음
  - 환경오염물질 배출량, 연료사용과 발전에 대한 도입 옵션이 향상
    - 발전기의 오염배출물(두 종류의 오염물질), 연료사용, 발전기의 발전량 등에 대한 제약을 복합그룹제약을 도입하여 처리
    - 양수발전기의 시뮬레이션 옵션을 추가

4) R. T. Jenkins & D. S. Joy(1974). Wien Automatic System Planning Package(WASP)-An Electric Utility Optimal generation Expansion Planning Computer Code, Report no. ORNL-4945, Oak Ridge National Laboratory.

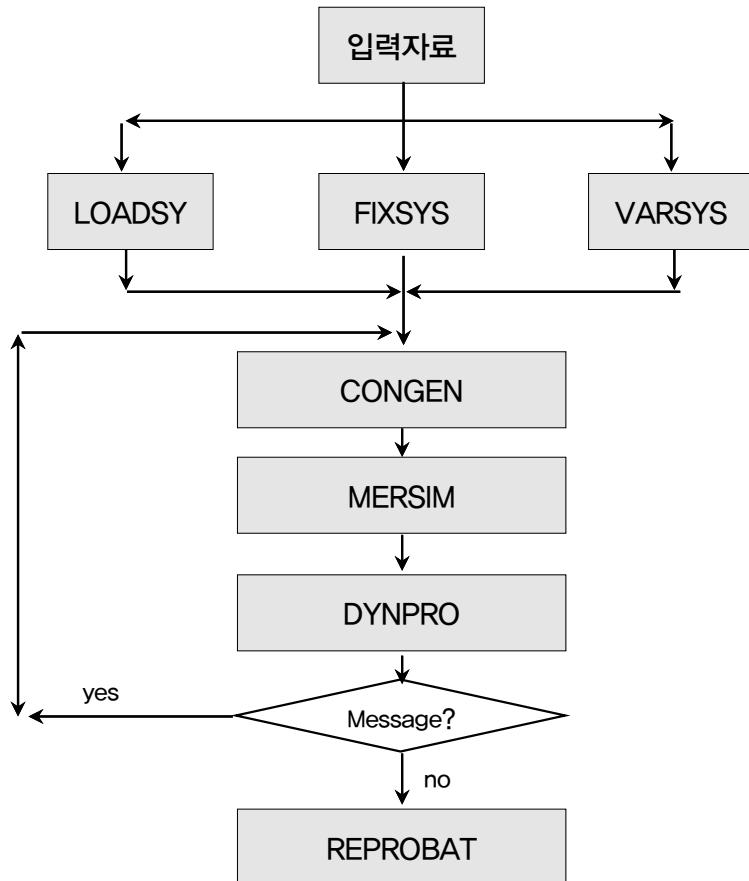
- 이 옵션은 WASP-II에서 이용이 가능했으나 수력발전기의 표현에 대해 유연성을 제공하기 위해 WASP-III에서는 제거되었으나 양수 발전기와 개발 중인 에너지 저장기술\*의 중요성이 증가하면서 이를 반영하기 위한 옵션이 WASP-IV에 추가
    - \* 대용량 배터리, 압축공기저장 발전기 등
  - 그 밖에 고정 예방보수계획(사용자가 지정하는) 옵션, 환경 오염물 배출량 계산 성능이 확장
- WASP 모형은 6 개의 다음과 같이 프로그램으로 구성되어 있고, 각 프로그램의 구성은 사용자가 프로그램 실행 결과를 알고 입력을 다시 수정할 수 있도록 되어 있음
- LOADSY, FIXSYS, VARSYS, CONGEN, MERSIM, DYNPRO 등 6개의 프로그램과 실행결과를 종합적으로 보여주는 REPROBAT
  - LOADSY 모형에 대하여는 앞에서 시스템부하와 신재생발전의 출력변동을 고려하는 절에서 설명하였음
- WASP-IV의 6개 프로그램의 구조는 중간 결과물을 확인하여 입력데이터의 여러가 발생하여 낭비하는 시간을 줄일 수 있으며 프로그램별 입력데이터 및 세부기능은 <표 4.1>과 같음

〈표 4.1〉 프로그램별 입력데이터의 특성 요약

프로그램	입력 Data	기 능
LOADSY	전력수요(미래년도 예측치) - 최대수요 - 분기별 최대수요 - 부하지속곡선 5차 다항식계수	- 부하지속곡선 5차 다항식 계수를 푸리에 급수의 계수로 변환 처리 - 기간별 최대수요, 발전량, 부하율 계산 ※ CONGEN, MERSIM에 부하지속곡선 및 최대수요, 최소수요 자료(푸리에 급수 형태) 제공
FIXSYS	- 기존발전기 및 확정발전기 특성 * 용량, H/R, FOR, O/M 비용 등 - 기존발전기 폐지년도 - 확정발전기 준공년도	- 발전기별 변동비 계산 - 연도/분기별 설비용량 계산 - 연도/분기별 수력설비의 발전가능용량 계산 - 발전기별 고유번호 지정 - 연도별 준공/폐지발전기 정리 ※ CONGEN, MERSIM, DYNPRO에 기존 설비 및 확정계획 발전기의 자료 제공
VARSYS	- 신규후보발전기 종류와 특성, *FIXSYS와 동일	- FIXSYS와 동일하나 대상은 후보발전기
CONGEN	- 연도별 최소 존재댓수 - 연도별 존재댓수의 상, 하한	- 후보발전기의 연도 별 최소 및 최대존재 댓수의 작성 - 발전기 투입순위 결정 ※ MERSIM에 연도별 후보발전기조합 자료 제공
MERSIM	발전기 투입순위 등 - 순동예비력 - 발전기투입순위 - 물가상승률(운용비)	- 후보발전기조합별로 시뮬레이션 수행 * 운영유지비, 연료비산출 * 신뢰도지수(LOLP) 산출 ※ DYNPRO에 운용비 및 신뢰도 자료 제공
DYNPRO	- 할인율 - 건설단가, LOLP제약조건 - 물가상승률 (건설비)	- 후보발전기 별 건설비를 이용 - 최적 발전설비확장계획 도출 ※ 최종 발전설비확장계획 도출

- WASP-IV을 구성하는 6개 프로그램의 실행순서는 <그림 4.1>과 같음

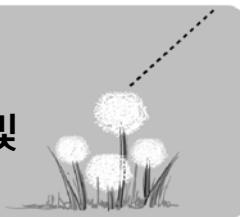
<그림 4.1> WASP 모형 구성



- WASP-IV을 구성하는 나머지 프로그램은 제9장 참조

# V

## WASP 모형운용결과 및 해결과제



### □ 기본 가정

- 7차 전력수급계획의 대상년도와 같이 2035년까지 신재생에너지를 년도 별로 추가하는 경우 비용최소화 관점에서 전원 구성이 어떻게 변하는가를 고찰하기 위하여 다음과 같이 가정
  - 2017년에 최대수요는 85,600MW, 부하율은 73.3%로 설정
  - 시간이 지날수록 최대수요는 증가하되 부하율은 낮아지는, 즉 수요는 증가하지만 전력사용 이용패턴이 더 불규칙적으로 변화하는 방향으로 변화할 것이라는 상황을 가정
  - 기타 입력 자료는 제7차 전력수급계획 자료를 근거로 조정하였고 변화하는 전력사업 환경을 감안하여 적의 조절함
  - 에너지 사용량(발전단 기준)도 점차 증가하는 것으로 가정
- 신재생에너지 영향을 고찰하기 위한 년도 별 최대수요 및 에너지량, 그리고 부하율은 <표 5.1>과 같음

〈표 5.1〉 시뮬레이션 입력자료

년도	최대수요(MW)	에너지(GWh)	부하율(%)
2017	85,600	550,302	73.3
2018	88,000	566,552	73.41
2019	90,900	580,331	72.81
2020	93,100	590,417	72.34
2021	95,400	599,527	71.58
2022	97,300	607,007	71.06
2023	98,900	612,557	70.53
2024	100,200	617,447	70.16
2025	101,100	621,870	70.03
2026	102,200	621,258	69.19
2027	103,300	624,505	68.81
2028	104,400	627,830	68.48
2029	105,600	632,035	68.16
2030	106,900	638,549	68.02
2031	108,200	645,135	67.88
2032	109,300	650,536	67.75
2033	110,400	656,031	67.62
2034	111,500	661,572	67.51
2035	112,400	665,888	67.4

#### □ 후보발전기

- 후보발전기는 〈표 5.2〉에 나타낸 바와 같이 총 3 가지 기술군, 7가지 기술로 구분
  - 복합화력발전기는 450MW와 900MW 급 용량으로 구분
  - 석탄화력발전기는 500MW, 870MW, 1000MW 급으로 구분
  - 원자력은 현재 APR 1400을 대표하는 1400MW급과 이를 개선한 1500MW급으로 구분하여 입력
- 건설단가는 〈표 5.2〉와 같이 가정(준공시점을 기준으로 환산한 건설단가)

---

〈표 5.2〉 시뮬레이션 후보 발전기

기술종류	명칭	용량(MW)	건설단가(백만원/MW)
복합화력 (LNG)	CC45	450	1,155
	CC90	900	904
석탄화력	C500	500	1,502
	C800	870	1,490
	C100	1000	1,449
원자력	N14H	1400	3,200
	N15H	1500	3,150
신재생	미정	미정	2,300
백업 GT		가변	600

## □ 시뮬레이션 결과

- 신재생에너지발전을 고려하지 않은 경우(기준시나리오)의 설비용량
  - 〈표 5.3〉에 나타낸 바와 같이 원자력과 유연탄 발전기는 증설되는 반면에 기타 발전원의 증가가 이루어지지 않고 있음
  - 이는, 기저발전이 첨두발전을 대체하는 것이 경제적이기 때문에 발생하는 상황
  - 기저발전의 성장은 중간부하 및 첨두부하 발전설비를 지닌 발전사업자의 수익을 감소시킬 수 있음
  - '17년에 25,000MW의 원자력은 2029년 즈음에 41,000MW 규모로 성장할 가능성이 있으며 유연탄은 동 기간에 37,500MW에서 45,000MW 정도로 성장가능
  - 2035년에 필요한 설비용량은 약 132,800MW 규모일 것으로 도출됨

**〈표 5.3〉 기준 시나리오에서의 연도별 전원설비계획(MW)**

연도	원자력	유연탄	무연탄	석유	LNG	지역난방	양수	총용량
2017	25,329	37,500	1,126	3,850	33,490	5,164	4,700	111,159
2018	26,729	37,500	726	3,795	34,390	5,164	4,700	113,004
2019	26,729	38,500	726	3,795	35,290	5,164	4,700	114,904
2020	26,729	39,500	726	3,795	36,190	5,164	4,700	116,804
2021	28,129	45,000	726	2,595	36,190	5,164	4,700	122,504
2022	32,329	45,000	726	2,595	36,190	5,164	4,700	126,704
2023	35,129	45,000	726	2,595	34,390	5,164	4,700	127,704
2024	35,129	45,500	726	1,195	34,390	5,164	4,700	126,804
2025	35,129	45,500	726	1,195	34,390	5,164	4,700	126,804
2026	36,629	45,500	726	1,195	34,390	5,164	4,700	128,304
2027	38,129	45,500	726	1,195	34,390	5,164	4,700	129,804
2028	39,629	45,500	726	1,195	34,390	5,164	4,700	131,304
2029	41,129	45,500	726	1,195	34,390	5,164	4,700	132,804
2030	41,129	45,500	726	1,195	34,390	5,164	4,700	132,804
2031	41,129	45,500	726	1,195	34,390	5,164	4,700	132,804
2032	41,129	45,500	726	1,195	34,390	5,164	4,700	132,804
2033	41,129	45,500	726	1,195	34,390	5,164	4,700	132,804
2034	41,129	45,500	726	1,195	34,390	5,164	4,700	132,804
2035	41,129	45,500	726	1,195	34,390	5,164	4,700	132,804

○ 신재생에너지원을 고려한 경우의 설비용량(〈표 5.4〉 참조)

- 신재생에너지를 우선 건설하는 정책을 수행하게 되면 원자력과 유연탄은 거의 증설되지 않고 정체될 것으로 예상됨
- 그러나, LNG 발전은 2017년 28,540MW에서 2030년에는 48,340MW로, 2035년에는 49,240MW로 증설 예상
- 이와 같이 LNG발전이 기준시나리오에 비하여 증가하는 것은 신재생에너지 발전의 낮은 설비이용률(18~20%)로 인하여 시스템부하곡선이 차감되어 시스템부하율이 낮아지기 때문임
- 신재생에너지의 설비가 증가할수록 자연력의 변화에 의한 출력 불확실성이 비례, 급증하기 때문에 국가에너지안보에 대비하여 백업설비(순동예비력

확보 필요)의 추가건설이 필요하며 본 연구에서는 신재생발전 설비만큼 건설한다고 가정<sup>5)</sup>)

- 원자력이나 유연탄과 같은 중앙급전 전력설비는 2035년까지 약 121,354MW가 건설될 것이며 백업설비를 제외하면 2035년에 약 188,083MW의 중앙급전 발전능력을 보유하게 될 것임

**〈표 5.4〉 신재생에너지원을 고려한 경우의 연도별 설비계획(MW)**

연도	중앙급전								신재생		총용량 (A+B)
	원자력	유연탄	무연탄	석유	LNG	지역 난방	양수	총용량 (A)	신재생 (B)	백업 GT	
2017	22,529	32,500	1,126	3,850	28,540	7,664	4,700	100,909	437	430	101,346
2018	22,529	32,500	726	3,795	28,540	7,664	4,700	100,454	3,598	3,590	104,052
2019	22,529	32,500	726	3,795	32,140	7,664	4,700	104,054	8,396	8,390	112,450
2020	22,529	32,500	726	3,795	33,040	7,664	4,700	104,954	15,542	15,540	120,496
2021	22,529	32,500	726	2,595	36,640	7,664	4,700	107,354	22,600	22,590	129,954
2022	23,929	32,500	726	2,595	38,440	7,664	4,700	110,554	29,235	29,230	139,789
2023	25,329	32,500	726	2,595	41,140	7,664	4,700	114,654	36,149	36,140	150,803
2024	25,329	32,500	726	1,195	44,740	7,664	4,700	116,854	41,102	41,100	157,956
2025	25,329	32,500	726	1,195	46,540	7,664	4,700	118,654	46,169	46,160	164,823
2026	25,329	32,500	726	1,195	46,540	7,664	4,700	118,654	48,945	48,940	167,599
2027	25,329	32,500	726	1,195	48,340	7,664	4,700	120,454	54,254	54,250	174,708
2028	25,329	32,500	726	1,195	48,340	7,664	4,700	120,454	56,263	56,260	176,717
2029	25,329	32,500	726	1,195	48,340	7,664	4,700	120,454	58,721	58,720	179,175
2030	25,329	32,500	726	1,195	48,340	7,664	4,700	120,454	60,737	60,730	181,191
2031	25,329	32,500	726	1,195	48,340	7,664	4,700	120,454	61,622	61,620	182,076
2032	25,329	32,500	726	1,195	49,240	7,664	4,700	121,354	62,584	62,580	183,938
2033	25,329	32,500	726	1,195	49,240	7,664	4,700	121,354	63,839	63,830	185,193
2034	25,329	32,500	726	1,195	49,240	7,664	4,700	121,354	64,947	64,940	186,301
2035	25,329	32,500	726	1,195	49,240	7,664	4,700	121,354	66,729	66,720	188,083

5) 최악의 경우 강력한 바람을 동반한 태풍이 오면, 풍력과 태양광 발전이 동시에 정지할 가능성이 있으며 심야에 태양광발전도 없고 풍력발전출력이 없을 경우, 그리고 대규모 풍력단지 등에서의 풍력발전의 급작스런 정지 등에 대한 문제를 대비하고 에너지안보를 위해서 실시간운용에서 순동예비력으로서의 예비력이 필요함

- 발전량(에너지 공급량)의 경우 신재생에너지의 이용률이 낮기 때문에 이것이 전체 발전량에서 차지하는 비중은 <표 5.5> 정도로 나타날 것으로 예상됨

**<표 5.5> 신재생전력 20% 달성을 고려한 연도 별 발전량**

(단위: GWh)

연도	기준 발전량	신재생에너지 발전 건설			신재생발전량 비중
		중앙급전	신재생		
2017	550,302	549,536	766		0.14%
2018	566,552	560,249	6,303		1.13%
2019	580,331	565,621	14,710		2.60%
2020	590,417	563,187	27,230		4.83%
2021	599,527	559,932	39,595		7.07%
2022	607,007	555,787	51,220		9.22%
2023	612,557	549,224	63,333		11.53%
2024	617,447	545,436	72,011		13.20%
2025	621,870	540,982	80,888		14.95%
2026	621,258	535,507	85,751		16.01%
2027	624,505	529,452	95,053		17.95%
2028	627,830	529,258	98,572		18.62%
2029	632,035	529,155	102,880		19.44%
2030	638,549	532,138	106,411		20.00%
2031	645,135	537,174	107,961		20.10%
2032	650,536	540,888	109,648		20.27%
2033	656,031	544,185	111,846		20.55%
2034	661,572	547,785	113,787		20.77%
2035	665,888	548,978	116,910		21.30%
합계	11,769,349	10,364,474	1,404,875		11.94%

---

## ○ 신재생에너지원을 고려한 경우의 소요비용 추정

- 신재생에너지발전 증대에 따라 시스템부하율이 낮아지고 중앙급전의 발전량은 감소
- 신재생에너지 발전건설비는 230만원/kW<sup>6)</sup>로 설정함
- 신재생발전의 출력은 위의 표에서 나타난 신재생발전량을 이용률 20%의 신재생발전기가 공급하는 것으로 하여 출력을 계산함
- 년도 별 신재생발전량의 비중은 위의 표에서 2030년 이후 2035년 기간 중 약 20% 내외에 도달하는 것으로 나타남
- 신재생출력의 시간대별 변화를 고려하여 발전량 비중을 년도 별로 정확하게 사전에 예측하는 것은 현재의 WASP 모형에서는 어려운 문제이며 많은 반복계산이 필요함
- 신재생발전 출력이 미리 결정되더라도 100만 kW 규모의 신재생 단지에서의 출력을 정확하게 예측하고 년도 별로 지정한 비중을 건설하는 것도 모델 운용상 무리한 것임

## ○ 2030년 신재생전력 20% 달성을 위한 소요비용 추정

- 이상의 가정 아래 발전용량과 에너지생산량에 대한 비용을 2015년 현가로 요약, 정리한다면 <표 5.6>과 같음. 그 주 내용은 다음과 같음
  - 2015년 가격 기준으로 향후 19년 동안 11,769,349 GWh 상당의 발전량의 약 11.94%인 1,404,875GWh를 신재생발전으로 공급하게 되었을 경우 약 144조 원의 추가비용 발생이 예상됨
  - 그 세부내역으로는 신재생에너지 건설비로 약 108조 원, 백업 설비 건설로 약 28조 원이 증가할 것이며, 중앙급전발전기의 가동감소의 기회비용으로 건설비 및 운영비용 명목 아래 약 8조원의 비용 증가 예상

---

6) 한국전력공사, 한국에너지공단, 관련 협회 등의 자료와 의견을 통합하여 태양광, 풍력 등 다양한 신재생 발전설비들의 평균 건설비를 본연구팀이 임의 추정한 자료임. 향후 공식통계자료가 밝혀질 경우 대체 활용이 필수적임

- 중앙급전 발전원에서는 원자력 및 석탄화력의 건설비 감소가 예상되는 반면에 LNG 발전기의 건설 및 이의 운영비용(연료비)이 증가할 것임
  - 이는 2015년 현가금액이므로, 년도별 경상가격으로는 이의 2~3배 규모가 될 것임
  - 일반인의 이해를 돋기 위해서는 경상가격으로 환산, 표시하나 경제학적 의미는 무시할 수준임

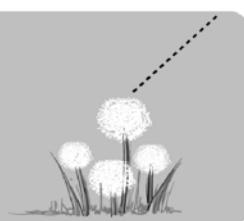
**〈표 5.6〉 신재생에너지원을 고려한 경우의 비용추정**

(백만원, '15년 현가)

년도	기준 시나리오 A	신재생에너지원 고려			
		계 (B=C+D+E)	급전가능 발전기(C)	신재생 투자비용(D)	백업 GT 투자비용(E)
2017	47,388,416	36,637,914	35,374,320	1,005,594	258,000
2018	34,297,264	42,104,526	33,417,424	6,889,946	1,797,156
2019	31,603,232	45,978,151	33,474,760	9,915,848	2,587,543
2020	30,440,208	49,635,303	31,984,696	13,997,184	3,653,423
2021	33,281,968	49,490,466	32,972,720	13,103,220	3,414,527
2022	28,538,960	42,408,902	27,683,792	11,676,815	3,048,295
2023	24,624,416	42,054,841	27,515,280	11,532,692	3,006,869
2024	21,988,320	34,867,798	24,990,464	7,831,522	2,045,812
2025	20,737,600	34,001,660	24,429,936	7,593,470	1,978,254
2026	20,662,624	27,155,021	22,181,824	3,942,992	1,030,206
2027	19,363,744	29,644,713	20,630,528	7,149,003	1,865,182
2028	18,188,320	21,756,258	18,523,520	2,563,515	669,222
2029	17,082,784	21,637,650	17,886,624	2,974,678	776,349
2030	15,580,608	19,410,363	16,498,048	2,311,051	601,264
2031	14,978,176	17,055,640	15,841,696	961,592	252,352
2032	14,359,296	16,334,033	15,084,000	992,023	258,009
2033	13,766,336	16,112,654	14,569,088	1,225,130	318,436
2034	13,198,656	15,442,662	14,149,152	1,025,481	268,029
2035	12,622,848	15,472,214	13,500,864	1,563,945	407,406
합계	432,703,776	577,200,769	440,708,736	108,255,699	28,236,334
차액(B-A)	= 144,496,993				

# VI

## 신재생 확대를 위한 기술개발 과제

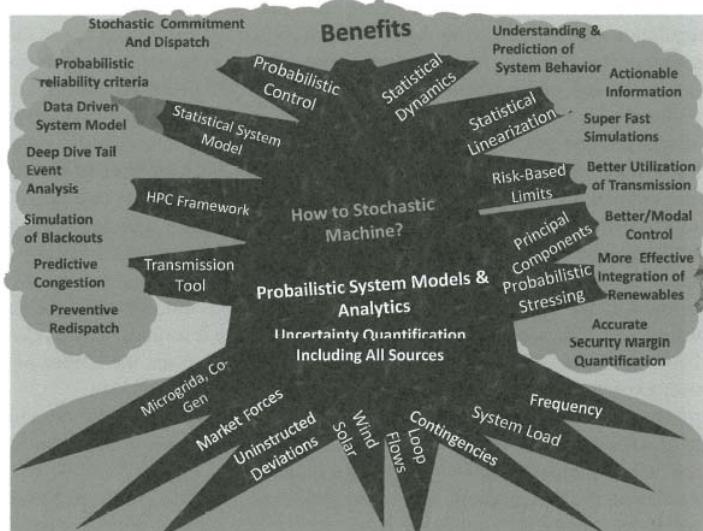


### 1. 신재생 전원확대에 따른 전력계통 영향

#### □ 신재생 용량비중에 따른 영향

- 총 발전설비용량에 비하여 신재생 전원용량이 수 % 이내로 작은 경우는 이에 대한 영향이 크게 나타나지 않을 수 있음(신재생발전의비중이 커지면 실시간 시스템운용에서 순동예비력이 작용하는 수준보다 능가하게 됨)
- 신재생 용량이 점차 증가함에 따라 전력계통 계획 및 운용에는 전반적으로 가변성과 불확실성이 증가할 것이며 이에 따라 관련기술들도 확정적 기반에서 확률적으로 변화할 전망

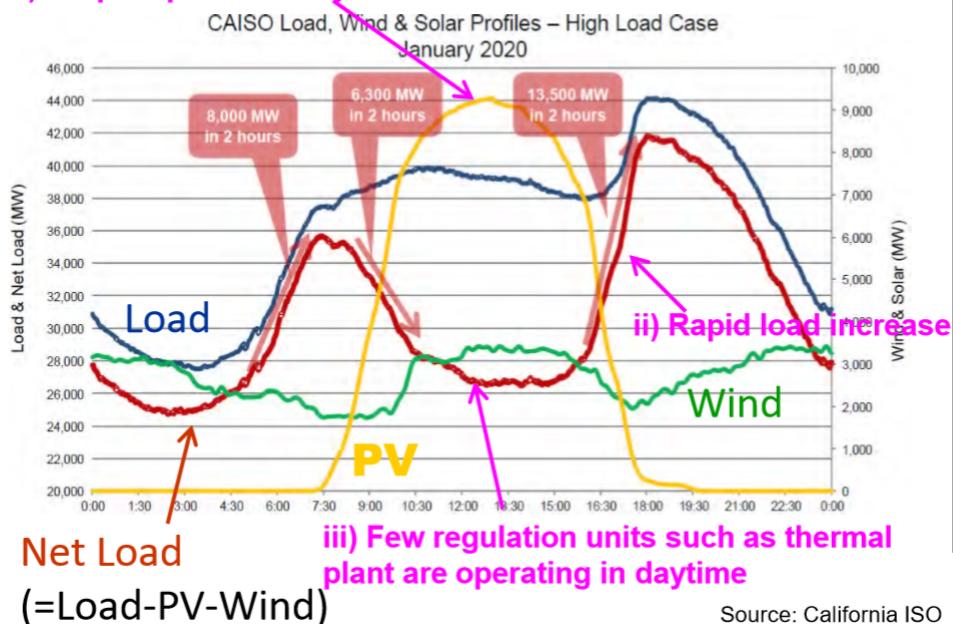
〈그림 6.1〉 불확실성 증가에 따른 요소 기술변화 개념(Lawrence E. Jones(2017))



- 즉, 신재생 용량이 점차 증가함에 따라 전력수요 패턴 및 기존 발전기 운용 패턴, 전력계통 유연성 등 전력수급과 관련한 다양한 면에서 변화가 예상됨
  - 태양광 발전설비 증가에 따라 주간시간대 태양광발전출력의 급증으로 급전대상 발전기의 출력이 감소해야 함(미국 캘리포니아에서의 Duck curve)

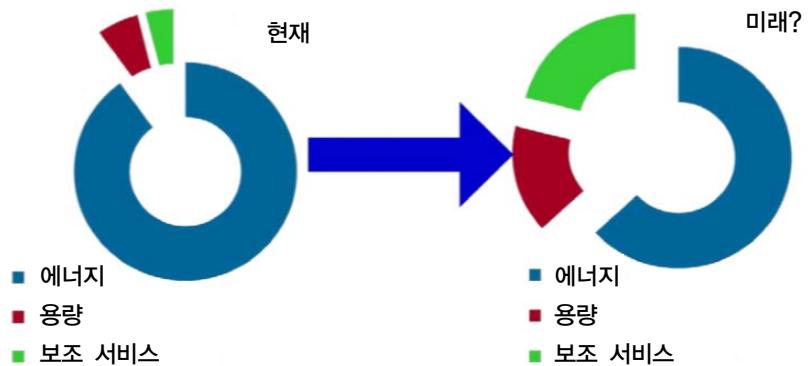
〈그림 6.2〉 풍력 및 태양광발전증가에 따른 부하변화(미, 캘리포니아)

### i) Surplus power in daytime



- 특히, 전력수요는 기상변화에 따른 변동성이 더욱 심화되고 이를 상쇄하기 위하여 응동력이 빠른 화력발전기의 발전량 증대로 자원 배분량이 변화될 전망(〈그림 6.3〉 참조)
  - 기존 발전기는 용량 및 보조서비스 공급 주체로서의 역할이 더욱 강조될 전망

〈그림 6.3〉 기존발전기의 역할변화 개념도



\* 출처: EPRI(미국전력연구소)

#### □ 신재생 전원확대에 따른 세부 기술적 영향

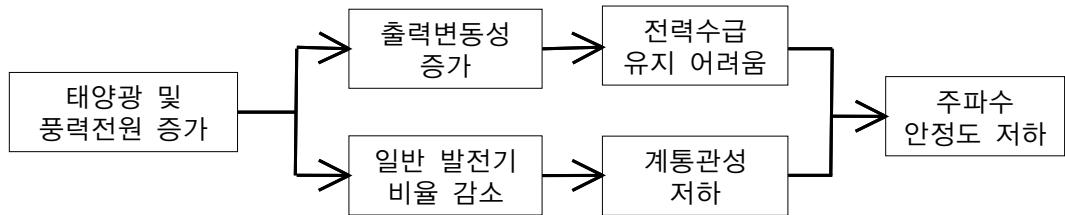
##### ○ 전력계통 관성 및 전압유지능력 저하

- 태양광은 직류발전이고 풍력은 비동기발전기이므로 설비규모가 커지고 한 단지에서의 용량이 커지면 무효전력공급문제가 심각해짐
- 신재생발전의 전압이 기존발전기의 345kV, 765kV 등과 같이 고전압이 아니고 배전전압에서 시스템에 전달되기 때문에 배전전압수준에서 무효전력 공급원의 필요성이 더욱 커짐
- 인버터를 통하여 전력계통에 연결된 신재생 전원은 직류발전의 경우, 기본적으로 관성을 가지지 않으므로 신재생전원이 증가할수록 전력계통 전체측면에서는 관성에너지<sup>7)</sup>가 감소하게 됨
- 전력계통 모선전압이 규정범위를 벗어나는 경우 기존의 각 발전기 및 제어 장치들에 의하여 무효전력을 공급하여 전압을 일정범위 내로 유지해야 하지만 신재생전원 증가로 기존전원 비중이 감소하는 경우 이와 같은 전압 응동능력 감소

7) 전력수급 불균형 등으로 주파수가 저하하는 경우 이를 정격치로 복원하는 역할을 담당할 발전기의 필요성 대두. 태양광은 직류발전이므로 교류발전기의 동기운전에 도움을 주는 관성이 없음

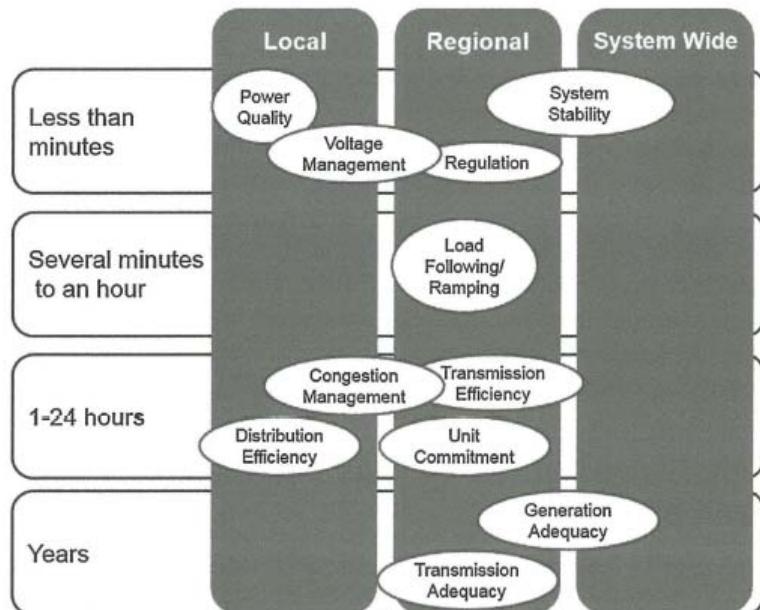
- 풍력 및 태양광 발전증가가 전력계통에 미치는 전반적인 영향을 개념도로 나타내면 <그림 6.4>와 같음

<그림 6.4> 신재생전원 증가에 따른 계통영향 개념도



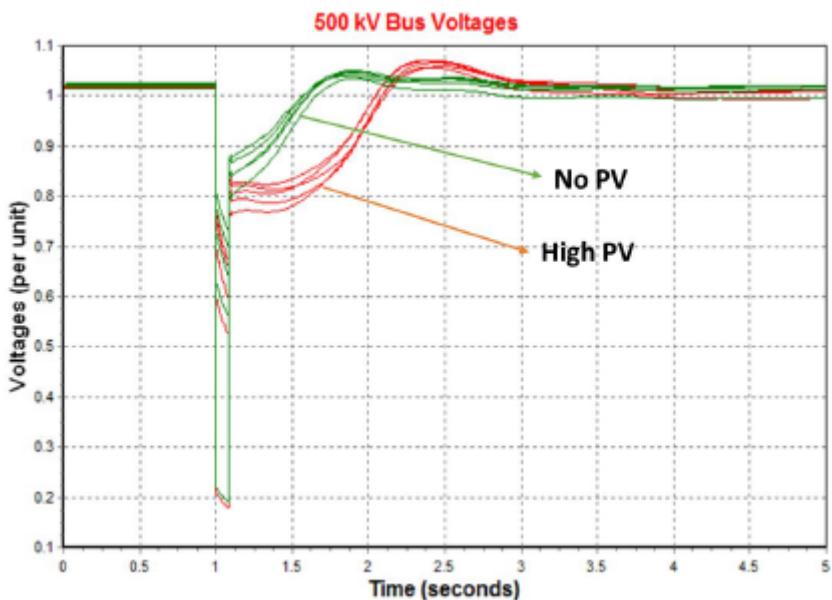
- 풍력발전기가 전력계통에 미치는 영향을 시간대별로 구분하여 나타내면 <그림 6.5>와 같음. 풍력발전기는 비동기발전이 주류이므로 수분 이내 시간대에서 수년간에 걸쳐 지역계통 및 전체계통에 전력품질 및 전력수급 등 다양한 기술적 영역에서 영향을 미침

<그림 6.5> 풍력발전기가 전력계통에 미치는 영향(Lawrence E. Jones(2017))



- 
- <그림 6.6>은 전력계통에서의 태양광전원증가에 따른 전압응동성을 나타낸 것으로써 500kV 변전소 모선에서의 전압회복능력이 저하하는 현상을 예시

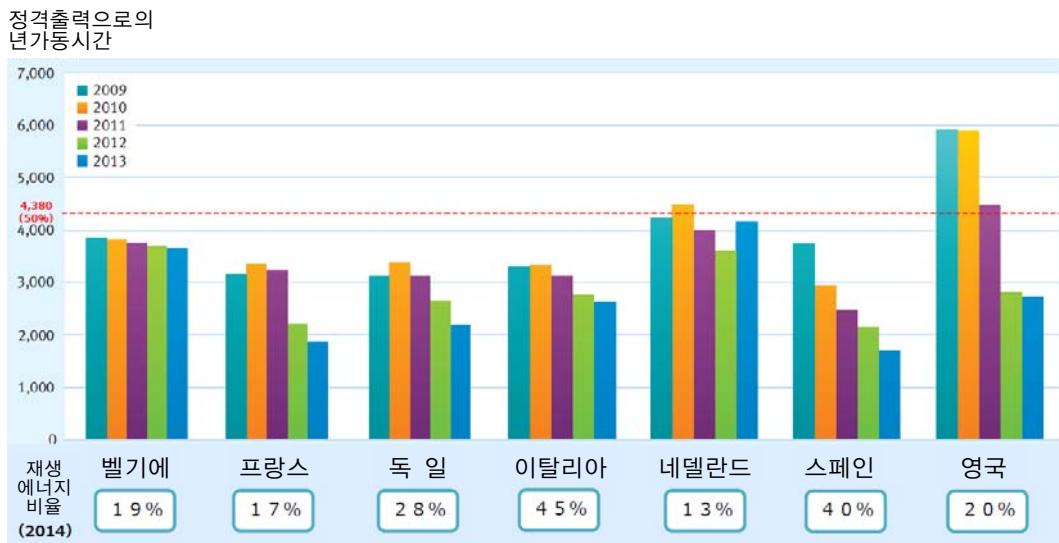
<그림 6.6> 태양광전원 연계전후의 전압응동



\* 출처: EPRI(미국전력연구소)

#### ○ 고변동비 발전기의 이용률 저하

- 스페인에서는 '00년대 들어 풍력발전을 중심으로 한 재생에너지 발전 도입 확대로 가스 및 석탄화력 설비 가동률 저하, 복합가스 화력발전(CCGT) 이용률은 10%대까지 하락

**<그림 6.7> 유럽 주요국의 복합가스 화력(CCGT) 설비 이용률의 추이('09~'13)**

출처 : 省エネルギー・新エネルギー部(平成29年)

- 부하 변동성 증가로 인한 기존발전기의 증감·발 및 필요 순동예비력 증가
  - 재생에너지(특히 자연 변동 전원)의 출력변동을 상쇄하고 전력수급을 유지하기 위해서는 계통조정력<sup>8)</sup>을 효과적으로 확보하는 것이 중요
  - 재생에너지 출력예측 및 감시제어를 위하여 전용 감시제어시스템을 구축운용(스페인)
  - 그리드 코드에 풍력발전기는 주파수조정능력을 갖도록 규정(그러나 풍력발전기는 비동기발전기이므로 동기발전기와 같은 주파수조정능력을 기대하기 어려움. 동기발전기로 구성할 경우 경제성 검토 필요)
  - 용량시장, 수급조정 시장, 품질유지서비스 시장 등의 다양한 시장메커니즘을 활용하여 필요한 조정력을 확보(그러나 경쟁시장이 아닌 우리나라의 경우 시스템운용에서 처리하여야 함)

8) 전력계통의 주파수 제어, 수급조정 등에 필요한 발전설비(가스터빈, 양수발전 포함), 전력저장장치, 수요 관리와 같은 전력조절 시스템 및 이에 준하는 시스템(단, 송배전 설비는 제외)의 능력을 의미

- 
- 일본: 일반 송배전 사업자에 의한 조정력 공모가 이미 이루어지고 있으며, 향후, 용량 시장과 실시간 시장을 통해서도 조정력 확보예정

**〈표 6.1〉 신재생에너지 증가에 따른 계통영향**

계통영향	일반적 대책
신재생 출력변동성에 따른 수급균형 유지문제로 인하여 계통 안정도 저하	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 출력안정화용 기기설치 및 양수발전과 협조운용</li> <li>• 신재생 출력 및 운영예비력 예측기술 제고</li> </ul>
신재생(변동성) 전원의 계통 수용 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 신재생 수용증대를 위한 계통인프라 적기 확충</li> <li>• 계통운용, 계획을 고려한 지역별 신재생 개발</li> </ul>
특정 지역과 특정선로 집중연계로 선로 운전용량 초과	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 피크저감용 기기 설치확대</li> <li>• 신재생과 망해석, 감시제어기능 구축으로 신재생 수용량 증대</li> </ul>
전력품질저하(고조파, 고장전류 증대, 보호협조 문제 등)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고조파 필터, 한류리액터, NGR 설치 등</li> <li>• 신재생 역률제어장치, 양방향 보호기기 등 설치</li> </ul>

## 2. 신재생발전확대에 대비한 기술적 해결과제

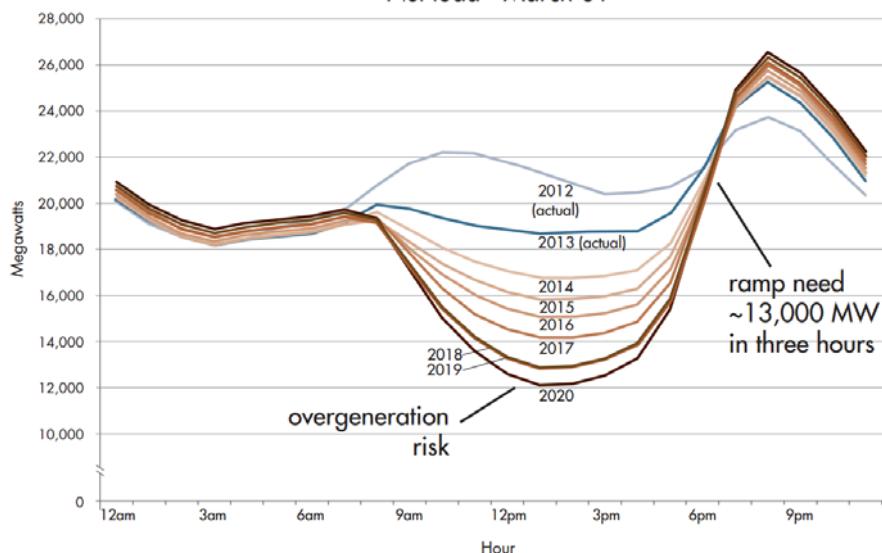
### □ 단기적 관점

- 2030년 신재생 20% 달성을 위한 기술개발 로드맵 수립 및 추진
  - 신재생확대를 위해서는 신재생전원 도입에 따른 경제성 및 환경성, 전력 수급 안정성 등에 관한 중장기적 분석과 이에 대한 단계별 대응기술개발 필수
    - 경제성: 신재생에너지가 도입 및 운용되는 장기간 동안 관련비용(설비 투자 및 운용) 최소화
    - 환경성: 신재생에너지 전원 자체의 CO<sub>2</sub> 배출은 미미하지만 설치 및 운용에 따른 사회 및 생태계에 미치는 영향을 혼용범위 내로 억제하는 노력이 필요
    - 전력수급 안정성: 신재생전원의 출력변동성 및 불확실성에 대응한 안정적 전력수급 체계구축이 필요(신재생발전원의 출력에 해당하는 백업발전기의 투자 필요)

- 현 전력수급체계 하에서의 신재생에너지 확대에 따른 제약요소 도출 및 선택 가능한 대응방안 분석필요
  - 세계 각국에서는 자체 전력시스템 규모 및 특성, 신재생자원 잠재량 등을 기반으로 중장기적으로 신재생 확대시의 예상 문제점을 사전에 도출 및 분석
  - 미국 캘리포니아에서는 태양광 발전증가에 따른 기존 전력 수요(net load) 패턴변화를 <그림 6.8>과 같이 예측: 오리모양의 duck chart 발생
    - \* duck chart 현상이 심화될수록 일몰 후 늦은 오후에 발생하는 피크수요 충당을 위해 단시간(약 3시간)에 많은 전력을 급격히 공급할 필요
    - \* 12:00 경에 태양광발전은 증가하는데 시스템부하가 감소하는 경우 급전가능발전 기의 출력을 급격히 감소하여야 함
    - \* 이로 인하여 전력시스템의 안정적, 효율적 운용에 어려움 초래예상
    - \* duck chart 현상에 대응한 다양한 대안들에 대하여 분석 중(유연성 자원 확보, 주파수 및 전압제어 능력평가 등)

<그림 6.8> 캘리포니아 duck chart

Net load - March 31



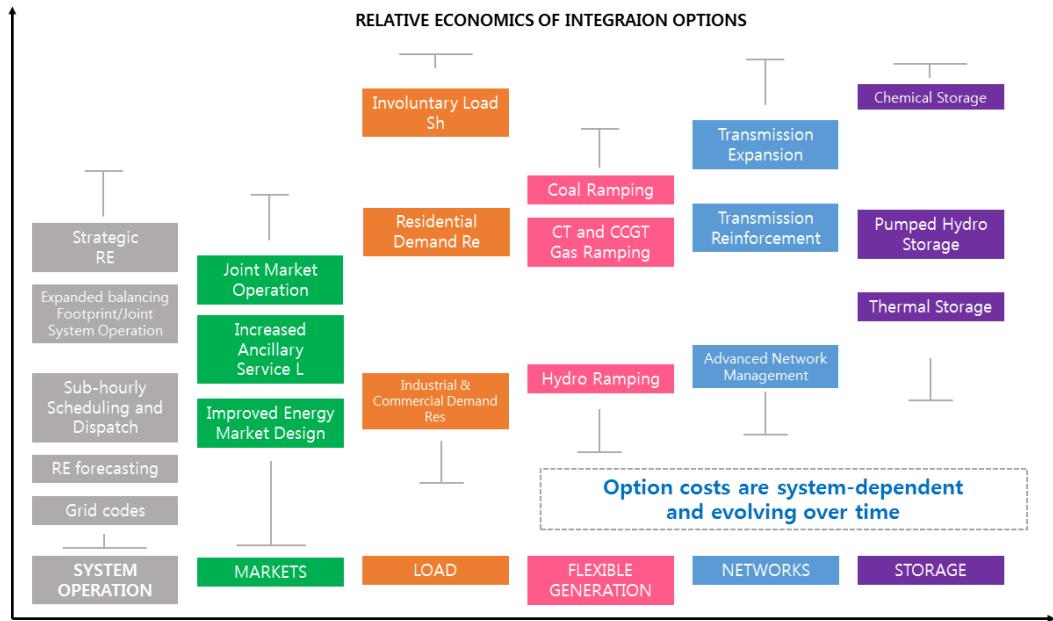
\* 출처: CAISO 2013

- 
- 유럽에서는 20-20-20 목표를 선언하고 이를 달성하기 위하여 관련국가의 전문가들을 중심으로 TF를 구성하고 추진 중(EWEA(2013))
    - \* 필요기술 도출 및 산학연 역할분담에 의한 기술개발, 실증 및 적용 등
    - \* 그리드 코드에 풍력발전기는 주파수조정능력을 갖도록 규정
    - \* 특히, 스페인은 재생에너지 출력예측 및 감시제어를 위하여 전용 감시제어 시스템을 구축 운영
  - 많은 지역에서 용량시장, 수급조정 시장, 보조서비스 시장 등의 다양한 시장 메커니즘을 활용하여 필요한 조정력을 확보(OECD/IEA(2017))
  - 국가나 지역 간 전력시스템이 연계되어 신재생에너지 확대에 비교적 유리한 조건을 가진 유럽이나 미국과는 달리, 우리나라는 독립된 전력시스템 구조를 가짐
    - \* 현 전력시스템 및 신재생에너지 기술수준에서 2030년에 20% 신재생 전원 수용 가능성에 대한 충분한 분석 필요(산, 학, 연 전문가를 중심으로 TF 운영 등)
    - \* 상기 TF를 통하여 우리나라에서의 신재생 확대에 따른 정책, 기술, 제도적 측면에서의 현상분석 및 해결과제 도출
    - \* 신재생에너지 확대를 위한 기술들로는 <그림 6.9>에 나타낸 바와 같이 계통 운용, 전력시장, 유연 자원 확보<sup>9)</sup> 등 다양한 측면의 대안들이 있으며 각 대안별 우리나라 기술수준과 비용대비 효과 필요

---

9) 전력계통의 주파수 제어, 수급조정 등에 필요한 발전 설비(양수발전 포함), 전력저장장치, 수요관리와 같은 전력조절 시스템 및 이에 준하는 시스템 능력

**〈그림 6.9〉 신재생에너지 확대에 필요한 기술체계도  
(Jaquelin Cochran(2014))**



- 2030년 신재생전원 비중(발전량 또는 설비용량 기준) 20% 달성을 위한 국가적 로드맵 수립 및 추진
  - 우리나라의 신재생전원별 기술자립도 및 전망, 정부 및 산/학/연 역할 분담 등을 고려하여 법·제도, 정책, 기술 등과 같은 분야에서 순차적으로 해야 할 Task를 도출
  - 기술분야 Task (예)
    - \* 송배전 설비: 설비보강, HVDC 도입 등
    - \* 계통시스템 운용: 신재생발전출력의 급변에 따른 급전순서, 차단순서, 백업전원확보 등
    - \* 전력거래 : 신재생 발전 구매
- 2030년 신재생 설비규모와 포트폴리오 산정
  - \* 현 정부에서는 2030년에 발전량 기준으로 신재생전원 발전비중을 20%까지 확대할 계획

〈표 6.2〉 2016년 대비 2029년 최대부하 및 발전량(근거: 7차 전력수급기본계획)

구분	용량(MW)			전력소비량(GWh)	
	발전설비	최대부하	신재생에너지	총소비량	신재생에너지
2016	102,722	84,612	8,960(6.7%)	509,754	28,256(5.1%)
2029	133,097	111,929	32,890(20.1%)	656,883	83,090(11.7%)

- 2029년 전력소비량을 기준으로 신재생에너지 이용율을 20%<sup>10)</sup>로 가정할 경우, 총발전량의 20%를 신재생전원으로 충당하는데 필요한 설비용량은 약 75GW 규모
  - 물론, 정확한 신재생전원 용량은 신재생전원별 포트폴리오 및 각 전원별 이용률에 따라 상이함
  - 그러나, 신재생발전원 중 태양광 및 풍력발전이 대부분을 차지할 것으로 전망
- \* 75GW 신재생전원에서 80%를 태양광 및 풍력으로 충당할 경우 이에 해당하는 용량은 약 60GW 규모
- 국내의 신재생 전원별 잠재량 및 위치, 출력특성, 가격추이 등을 종합적으로 고려하여 2030년 목표를 달성하기 위하여 신재생전원 구성을 어떻게 할 것인가에 대한 포트폴리오 산출이 필요

#### ○ 국내 신재생개발을 위한 부지확보와 생태계와의 조화방안 수립

- 2016년 에너지관리공단에서 발표한 신재생에너지백서에 의하면 태양광의 기술적 잠재량은 7,451GW, 풍력은 육상풍력이 63.5GW, 해상풍력이 33.2GW로 가능한 것으로 추정(〈표 2.2〉 참조)
- 우리나라의 경우 단위면적당 설치 가능한 풍력발전기 용량은 육상풍력의 경우  $5\text{MW}/\text{km}^2$ , 해상풍력의 경우  $10\text{MW}/\text{km}^2$  규모일 것으로 추정<sup>11)</sup>

10) 2011~2014년 동안의 육상풍력발전기의 이용율은 7~29% 수준(근거 : 한국풍력산업협회), 해상풍력은 20~30% 수준(제주는 30~48%) 근거: 국내해역의 중형 해상풍력 발전 플랜트 타당성조사연구(최종보고서)

11) 국내 신재생 최적개발 시나리오 수립연구(2017). 한전전력연구원, pp. 39~41.

\* 해외논문 및 보고서<sup>12)</sup>에 의하면 육상풍력은  $4\text{MW}/\text{km}^2$ , 해상풍력은  $8\text{MW}/\text{km}^2$ 로 추정

\* 국내논문<sup>13)</sup>에서는  $6.9\text{MW}/\text{km}^2$ 로 추정

- 태양광 설비별 부지면적은 다양한 기관에서 발표하고 있으며 이를 종합한 결과, 대체적으로  $1\text{kW}$ 당  $8.3\sim44\text{m}^2$  ( $2.5\sim13.3\text{평}$ )의 부지가 필요

**〈표 6.3〉 각 기관별 태양광 설치면적(김남일(2017))**

발표기관	$\text{m}^2$	평	설치지역	용량 또는 기술
원자력문화재단	44	13.3	-	
해줌	$8.3\sim33$	$2.5\sim10$	한국	고정식/건축물~추적식/대지
쏠라 에너지	$8.3\sim16.5$	$2.5\sim5$	한국	건축물~대지
NREL <sup>14)</sup>	32.0	9.7	미국 전역	대용량( $>20\text{MW}$ )
HSEO <sup>15)</sup>	$13.4\sim29.1$	8.8	하와이	하와이에서 '14년 체결된 PPA 중 대용량 프로젝트 일부

- 상기와 같은 가정 하에서 태양광 및 풍력을 각각  $30\text{GW}$  건설한다면 추정되는 소요면적을 예시하면 다음과 같음

\* 단, 본 면적은 예시만을 위한 값으로서 실질적 계산은 신재생전원의 구체적 위치나 사양을 기반으로 이루어져야 함

**〈표 6.4〉 태양광 및 풍력발전 설비건설에 필요한 면적(예시)**

구분	단위용량당 설치면적	설치용량(가정)	소요면적
태 양 광	$26\text{m}^2/\text{kW}$	$40\text{GW}$	$1,040\text{ km}^2$
풍력 발전	$0.2\text{km}^2/\text{MW}(=5\text{MW}/\text{km}^2)$	$10\text{GW}$	$2,000\text{ km}^2$
해상풍력	$0.1\text{km}^2/\text{MW}(=10\text{MW}/\text{km}^2)$	$10\text{GW}$	$1,000\text{ km}^2$
계			$4,040\text{ km}^2$

12) NREL(2012). “U.S. Renewable Energy Technical Potentials : A GIS-Based Analysis”; EEA(2009), “Europe’s Onshore and Offshore Wind Energy Potentials”

13) 김현구 외 2(2016). “국내 풍력단지의 풍력터빈 용량밀도와 이격거리산정”, 풍력에너지저널, 제7권, 제2호, pp. 45~51.

14) National Renewable Energy Laboratory

15) Hawaii State Energy Office

---

- 태양광이나 풍력발전설비 건설에 필요한 부지확보는 설비용량에 따라  
상이 할 것으로 예상되나 우리나라의 지형적 특성을 고려하여 이에 대한  
대책마련이 필요

- \* 외국에서의 신재생에너지 부지확보에 관한 관련정책 분석 등

- \* 우리나라 특성에 적합한 부지확보 모델도출(염전 태양광, 농사겸용 태양광 발전 등)

- 신재생 에너지 개발에 따른 생태와의 조화문제

- \* 신재생에너지가 기존전원을 대체할 정도의 대규모로 도입되었을 경우

- CO<sub>2</sub> 삭감 등 친환경 에너지 효과는 기대할 수 있겠으나 개발과정에서의

- 생태계와의 조화가 또 하나의 선결과제로 부각될 전망

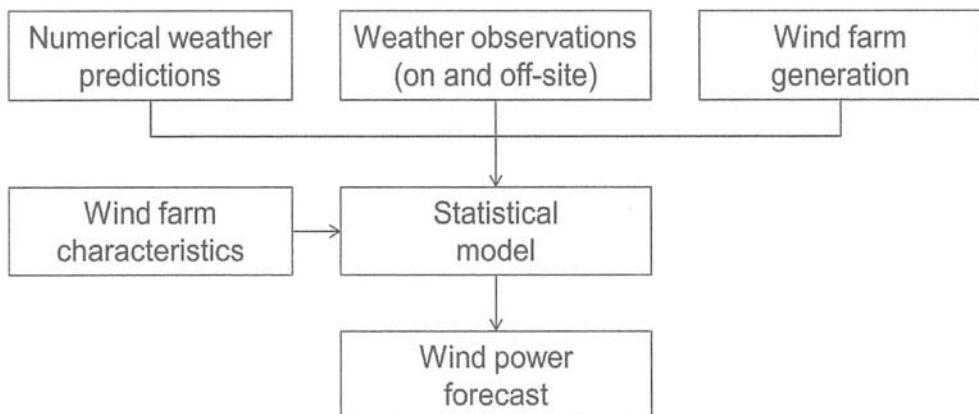
- 신재생 전원 최적구성 및 설비투자 효율화를 위한 전원계획 모형 개발

- 신재생 전원별 출력예측 시스템 개발

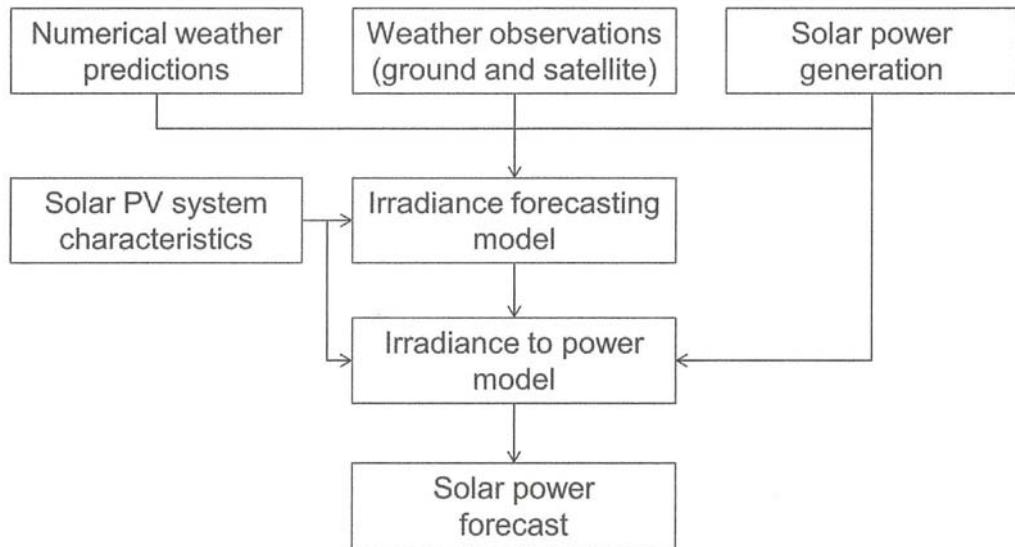
- 예측범위 : 단위기별, 지역별, 국가전체

- 예측시간단위 : 수초~수분, 시간, 일, 주간 등 단기 및 중기

〈그림 6.10〉 풍력발전예측 개념도(Lawrence E. Jones(2017))

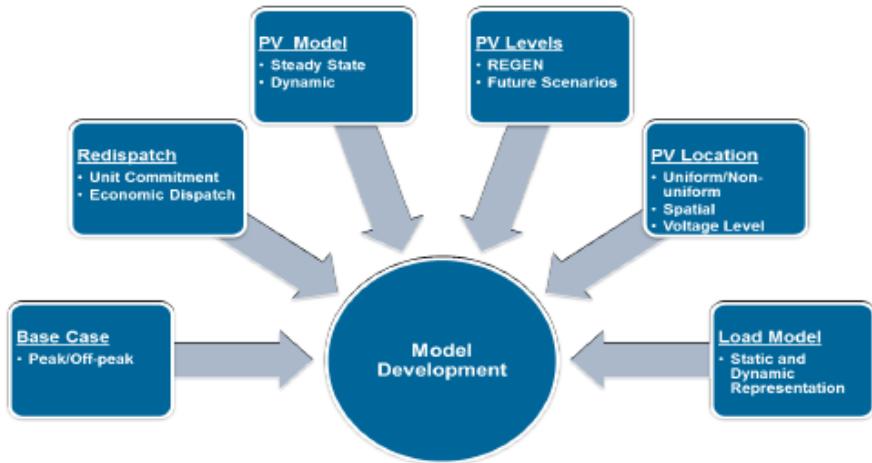


〈그림 6.11〉 태양광 예측 개념도(Lawrence E. Jones(2017))



- 신재생 감시제어 시스템 개발 및 기존감시제어 시스템과의 연계
- 신재생전원 자체의 주파수 및 전압제어 기술 개발
- 신재생전원의 출력특성을 반영한 가치평가 기술 개발
  - 계통공급 신뢰도 및 운용비용 기여도, 기존설비투자 저감 효과 등
- 신재생전원 특성을 반영한 발전시뮬레이션 모형 개발
- 신재생전원 특성을 반영한 송배전망 계획기술
- 전력계통 해석을 위한 신재생전원별 모델 개발
  - 신재생전원별 유무효전력제어특성 등을 고려한 수치해석 모델 개발

〈그림 6.12〉 태양광 발전의 모델개발 개념도

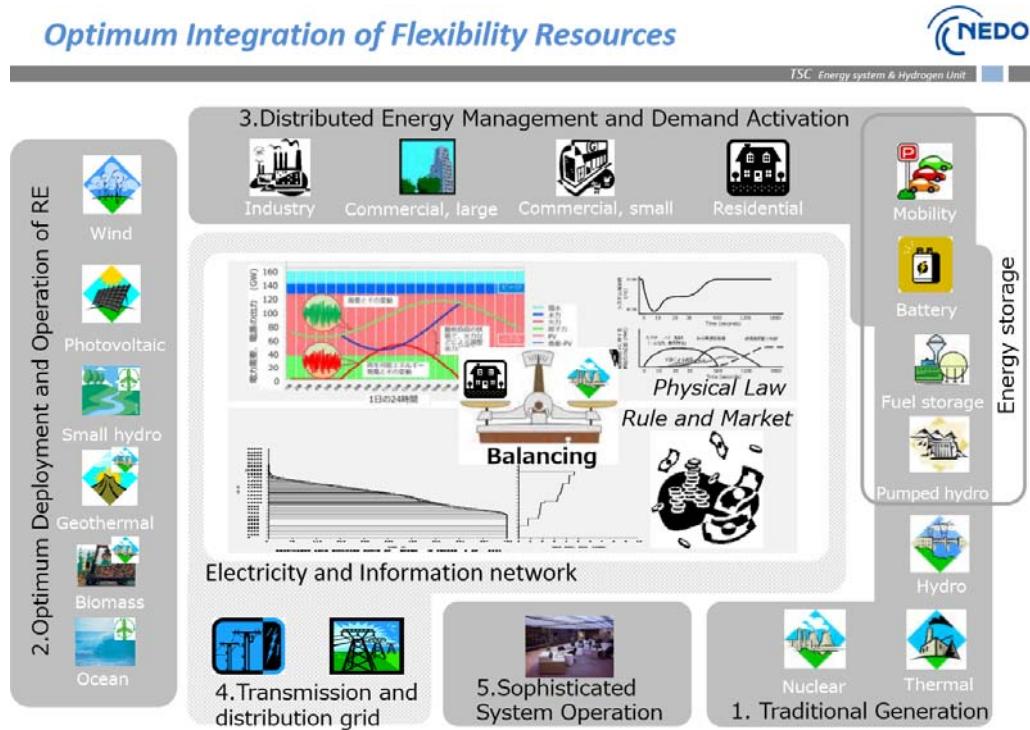


\* 출처: EPRI(미국전력연구소)

- 신재생전원 출력 불확실성을 반영한 전력계통 유지보수 계획수립 기술개발
- 신재생 출력특성을 반영한 적정 예비력 평가기술개발
  - 설비예비력(율) 및 운용예비력(율)
- 신재생 전원특성을 반영한 전력계통 과도현상 분석기술개발
  - 전자기 및 전기/기계적 현상해석을 위한 신재생 모델개발
  - 오프라인 및 실시간 분석시뮬레이터 개발
  - 전력조류, 고장계산, 안정도 분석 알고리즘 및 프로그램 개발
- 신재생전원 전력품질 해석 및 기준개발
  - 플리커, 전압변동, 고조파, 유효 및 무효전력제어, 순간전압강하에 대한 응동(LVRT), 계통보호 등
- 신재생전원 출력 변동성 제어개발
- 신재생전원 계통연계기준(Grid Code) 고도화

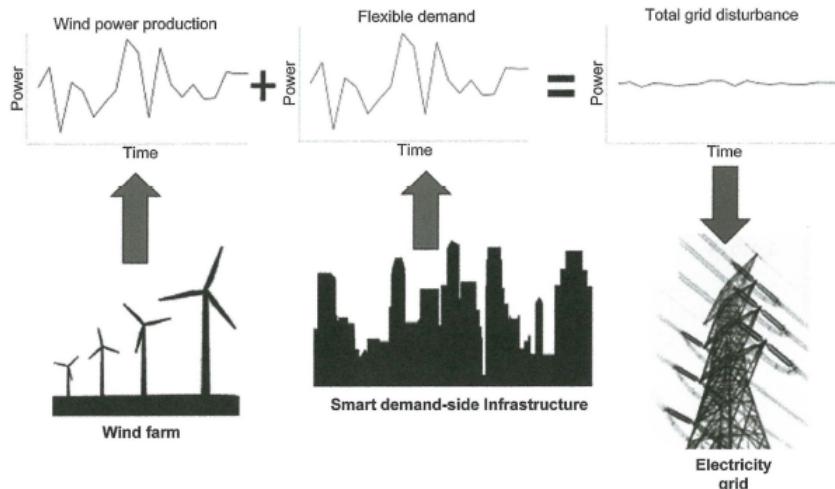
- 신재생전원 확대에 대비한 계통유연성(Flexibility) 평가기술개발
- 송배전망에서의 조류변동에 따른 보호제어기술 개발
- 신재생전원 및 계통유연자원과의 협조제어기술 개발

〈그림 6.13〉 신재생전원과 유연성 자원과의 협조개념도(Akira YABE(2016))



- 신재생전원 변동완화를 위한 수요반응 기술
  - 산업용, 상업용, 주택용 전력소비 특성분석 및 신재생전원과의 연계

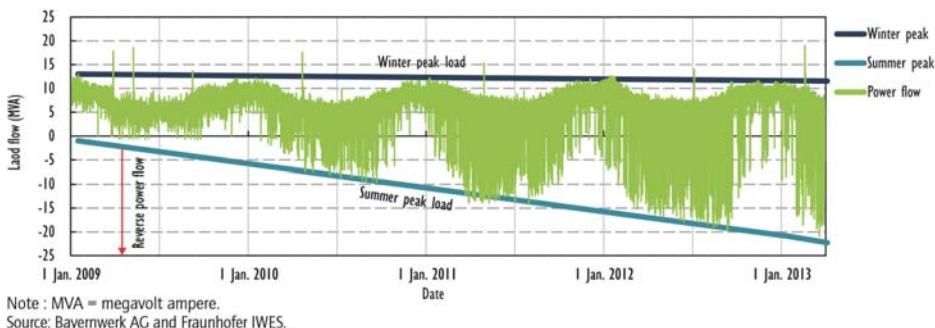
〈그림 6.14〉 신재생전원과 수요관리 협조개념도(Lawrence E. Jones(2017))



- 신재생전원의 계통연계 확대에 따른 계통보강 추진

- \* 신재생자원은 일반적으로 지역별로 편재화된 경향을 보이며 이러한 자원들을 송배전망에 연계하는 경우 기상여건에 따라 전력흐름이 변하게 됨
- 다음 그림은 독일 변전소에서의 '09~'13년 간의 조류변동을 나타낸 것으로 시간이 경과할수록 조류의 변동폭 및 방향 자체도 계절별로 변하는 패턴을 보이고 있음

〈그림 6.15〉 신재생출력에 따른 변전소에서의 전력조류 변화  
(OECD/IEA(2014))



- \* 신재생발전의 국부적 변동으로 인한 조류변동으로 인하여 송배전 용량 부족 등의 지역적 및 광역적 제약이 발생할 수 있으며 이와 같은 제약을 사전에 예측하고 합리적인 해결방안을 마련하는 것이 필수조건임
- \* 계통 제약은 다음과 같이 용량 면에서 제약과 변동적 계통제약으로 대별되며 일반적으로 용량제약은 지역적 제약과 광역적 제약으로 구분
- \* 지역적 제약: 신재생 연계부근의 송배전 선로용량에 관한 제약으로 선로보강이 필요(추가선로 건설 및 전력조류 제어설비 설치 등)
- \* 광역적 제약: 발전량과 소비량이 균형을 이루어야 하는 전력수급에 관한 제약으로 신재생전원의 과잉발전으로 잉여발전 가능성이 있는 경우 이에 대한 출력억제 대책필요
- \* 변동 면에서 제약: 태양광 및 풍력발전의 예상치 못한 급격한 출력변동은 전력계통 주파수 및 전압 유지, 전력이동의 위한 송전설비능력 등에 어려움을 초래할 수 있으며 이에 대응한 조정자원 확보가 필요

#### 〈표 6.5〉 신재생에너지 증가에 따른 제약 및 해결방안

제약구분	재생에너지 증가에 따른 예상문제	해결방안
지역적 계통 제약	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전력조류 변화에 따른 송배전 용량 확보</li> <li>- 계통보강 비용확보 및 적기 선로 건설</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 계통의 최대한의 활용</li> <li>- 계통 보강</li> </ul>
광역계통 제약	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기간계통에서의 융통전력 제약</li> <li>- 사업자 간 형평성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 출력제어의 최소화와 형평성, 예측 가능성 확보</li> <li>- 계통 보강</li> </ul>
변동 면 계통 제약	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 재생에너지 변동성 상쇄를 위한 조정비용 증가</li> <li>- 송배전과 발전과의 역할분담 문제</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 적절한 조정력 확보</li> <li>- 인센티브 및 시장제도 개선</li> </ul>

- 년도 별 신재생 비중 및 투자여건 등을 고려하여 투자규모를 산출하고 이에 대한 분담주체를 도출
  - 기존 계통을 최대한 활용한다고 해도, 재생에너지 증가에 따라 7,000만 kW 용량의 지역적 가변성을 감당하기 위하여 상당한 계통보강 투자는 필요(현재의 송전망 용량도 지역주민 반대로 인하여 송전선 건설이 미진하여 부족한 형편임)

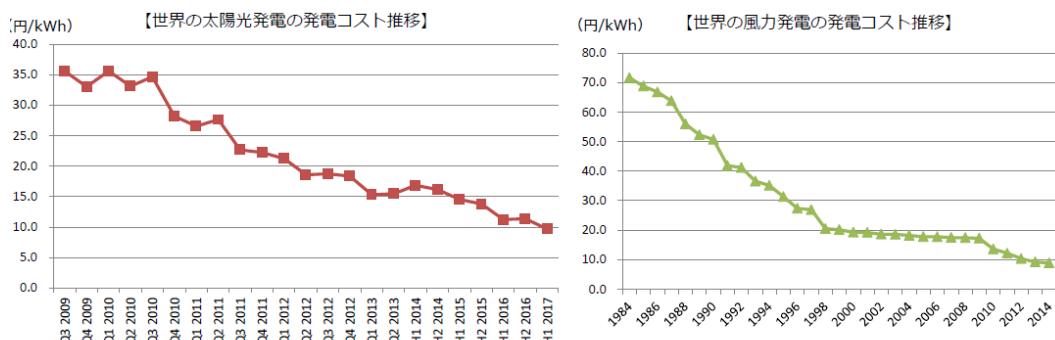
- \* 현재, 기간계통 보강은 전력회사(한전)가 국가 전력수급기본계획에 반영하여 추진
- \* 신재생에너지원의 전력계통 연계는 접속비용 부담에 관한 규정에 의하여 결정
- 계통보강에는 많은 비용과 선하지(right of way) 확보 등 장시간이 필요한 경우가 많아 재생에너지의 도입에 따른 사회적 비용최소화 노력 필요  
(대안별 비용/효과 평가 등)

## □ 중기적 관점

### ○ 신재생전원 설비 국산화 및 국제경쟁력 강화기술

- 세계적으로 태양광 및 풍력발전비용은 점차 하락 추세(〈그림 6.16〉 참조)
- 산학연 협력기술개발에 의한 가격경쟁력 확보 필요

**〈그림 6.16〉 태양광 및 풍력발전비용 추세  
(省エネルギー・新エネルギー部(平成29年))**

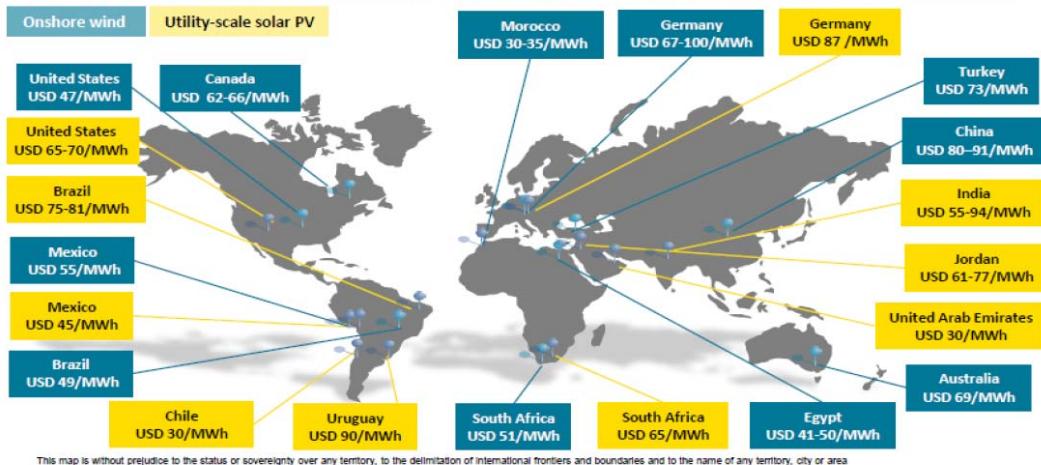


出典 : Bloomberg new energy financeより  
為替レート : 日本銀行基準外国為替相場及び裁定外国為替相場  
(平成29年5月中において適用 : 1ドル = 113円、1ユーロ = 121円)

- 신재생전원에 대한 가격경쟁력과 함께 장기계약, 신재생자원 잠재량에 따라 국가별로 장기계약 가격이 상이

### 〈그림 6.17〉 최근의 태양광 및 풍력발전의 저비용 사례

Recent announced long-term contract prices for new renewable power to be commissioned over 2016-2019



**Best results occur where price competition, long-term contracts and good resource availability are combined**

© IEA 2016

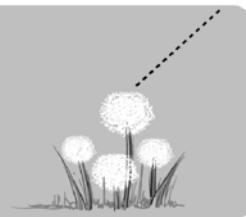
\* 출처: Renewable Energy Division, International Energy Agency (2016)

- 신재생 전원에 의한 수소에너지화(Hydrogen) 기술
- 신재생 전원 자체의 성능개선 및 전력계통 제어참여
- 신재생 출력변동 완화 및 이전을 위한 전력저장기술
  - 화학적 배터리(단주기 및 장주기), 열저장장치, 가변양수발전 등
- 신재생 확대에 대비한 전력계통 운용체계 개선
  - EMS 및 SCADA 감시제어 범위 및 역할 재정립
  - 신재생 출력변동성 및 불확실성을 고려한 전력수요 예측
  - 전력계통 운용계획 수립단위 세분화
  - 신재생 출력 과잉 시 실시간에서 운전 중인 발전기 출력삭감기준 세분화
- 기존전원설비의 응동특성 개선 및 신재생전원과의 협조제어
  - 석탄 및 가스발전기 등의 출력응답율(Ramping) 최저출력 개선

- 
- 전압형 HVDC, FACTS 등 고성능 전력제어 설비개발
    - 고속의 전력전자소자를 이용한 전력제어기술 국산화 및 국가경쟁력 확보
  - 전력계통 구성 및 전력제어 기능개선
    - 신재생 전원 수용성 제고를 위한 전력계통 개선 로드맵 수립 및 실행
    - 기존 교류계통에 적절한 직류기술 도입에 의한 송배전망 운용효율성 제고
    - 지역별 신재생전원 편중 및 기후변동에 따른 다양한 전력흐름 변동 고려

# VII

## 요약, 결론 및 정책건의



### 1. 연구내용의 요약

- 한국과학기술한림원이 수행한 본 연구의 기본 의도는 2030년 신재생전력 20% 달성을 목표로 하는 정부의 3020계획에 따른 에너지부문, 특히 전력부문에서의 파급효과를 살펴보고, 효율적인 에너지전환(Transition) 정책 추진에 필요한 과학적 논리 분석의 계기를 마련함에 있음
  - 특히, 금년 6월 정부의 탈-원전정책 공표 이래, 관련 산업과 학계가 보여준 비(非)과학적 논쟁, 그리고 공론화 과정 중의 각종 논의와 결론도출 이후에도 지속되는 작은 논란 등을 감안하여 과학기술적 성찰을 통해 정부의 관련 정책성 안의 논리적 기반 제공을 위한 단기 연구<sup>16)</sup>를 시행함
  - 보다 구체적으로는 탈원전, 에너지전환 등 국가 에너지 및 전력정책 구성의 기본 도구인 WASP모형 운용과정에서 지금까지 신재생전력을 외부변수로 취급하여 온 기존 연구방법론의 한계의 개선방안을 모색하는 시도를 국내 최초로 시행함. 이에 본 연구에서는 신재생전력을 외부변수로 취급하는 포용적 방법론 개발 가능능성의 검증에 특별한 관심을 둠
    - \* 현재 우리나라를 포함한 대부분의 선진 전력산업국가에서 장기 전력수급계획 수립 논리의 기반으로 국제원자력기구(IAEA)가 확립한 WASP IV모형을 활용하여 신재생 전력 기여도 분석에 한계
    - \* 이에 IAEA는 2018년 이후 신재생전력 역할을 반영하는 WASP V모형 보급예정
    - \* 본 연구에서는 WASP V모형개발의 기본논리를 활용한 사전 연구형식을 취함

16) 연구비 2,000만원 이내, 투입 연구인력(비상근) 4명, 연구기간 2개월이며, 2017년 8월 8일 개최한 제11회 한림원탁토론회(탈원전 논란에 대한 과학자들의 토론) 결과를 가능한 준용함

- 
- 신재생발전이 총발전량의 20% 수준에 도달하도록 년도 별 신재생발전량 비중의 증가를 고려하고 미래 전력수요곡선의 변동가능성을 사전 시뮬레이션 한 후 WASP의 시뮬레이션 및 최적화기법에 의한 급전가능발전기의 건설 계획을 수립하고 백업 발전기(가스터빈 등)의 건설을 고려하여 비용변동을 추정함
  - 신재생발전은 급전불가능전원이며 변동비가 제로(0)임. 이에 시스템부하 곡선에서 신재생발전의 시간대별 변화를 미리 상정하여 부하곡선을 변경한 후에 순 부하지속곡선에 의하여 일반발전기의 건설계획을 수립하고 이에 따른 발전량 및 건설비를 추정하였음
  - 그리고 지금까지 알려진 에너지전환 관련 정책성안 논리 중 일부에서 과학기술적 논리가 충분히 활용되지 않았음을 인지하고, 이의 해결계기를 마련하고자 함. 따라서 과학기술적 논리에 의거하여 신재생 3020계획 추진과정에서의 한계와 해결과제 제시를 본 연구의 또 다른 주요 목표로 설정함
- 이러한 방법론에 의거하여 우리나라 발전설비확장계획을 2030년까지 정부의 신재생전력 20% 달성을 목표 달성이 가능하다는 전제 아래 신재생발전량이 20% 수준에 이를 때까지 발전기 건설계획의 변동을 검토함. 그 결과 송-변전 및 배전설비 보완비용, 백업가스터빈의 무부하 운전비용, 배전설비의 무효 전력공급설비 건설비용, 시스템운용 시의 백업발전기의 무부하운전비용 등을 제외하고도 약 144조 원 수준의 추가부담 발생가능성이 WASP모형 실행결과로 도출되었음<sup>17)</sup>

---

17) 실제 계산에 있어서는 7차 전력수급계획 대상년도인 2035년까지를 계산 대상기간으로 하였다. 이는 비용의 변동규모를 파악하기 위한 대상기간으로서 충분하다고 보았음. 2030년까지 약 7,000만 kW의 신재생전원 투자와 동일 규모 백업발전기 건설가능성에 대한 별도의 검토가 필요함

### 〈신재생에너지지원을 고려한 경우의 연도 별 전원설비계획〉

(단위: GWh)

연도	기준	신재생에너지 발전 건설		
		발전량	중앙급전	신재생
2017	550,302	549,536	766	0.14%
2018	566,552	560,249	6,303	1.13%
2019	580,331	565,621	14,710	2.60%
2020	590,417	563,187	27,230	4.83%
2025	621,870	540,982	80,888	14.95%
2030	638,549	532,138	106,411	20.00%
2035	665,888	548,978	116,910	21.30%
합계('17~'35)	11,769,349	10,364,474	1,404,875	11.94%

- 이는 태양광과 풍력발전의 출력의 간헐성을 보완하기 위한 것과 지역적으로 신재생 발전기 출력의 변화에 따른 전력시스템 불안정성 때문에 발생하는 비용임<sup>18)</sup>

- 그러나 이러한 추가비용 분석은 제한된 시기(2030년)까지 불확실한 기술 혁신 가능성과 소비자 선택의 변화를 고려하지 않은 정태적 분석결과라는 한계를 가짐
- 따라서 장기 전력수급계획, 에너지전환 전략 뿐 아니라 국가에너지계획, 지속가능성장계획 등 각종 경제사회전략 변화를 통해 가능할 것으로 추정됨.<sup>19)</sup> 이를 위해서는 강력한 사회적 합의를 기반으로 하는 다음과 같은 전력부문 해결과제들의 우선적 해결이 요구됨

18) 본 연구과제는 WASP 모형을 이용한 비용변화의 검토에 국한하며 그 실현 가능성에 대한 검토는 하지 않음

19) 여타 경제사회정책에 대해서는 제한된 연구범위와 기간을 가진 본 연구 범주에서는 제외하였음

## 〈2030년 신재생전력 20% 달성을 고려한 비용추정〉

(백만원, '15년 현가)

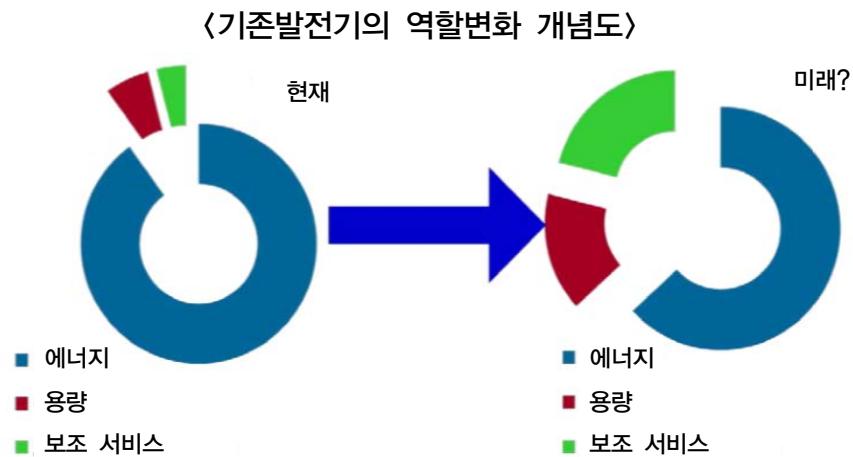
년도	기준 시나리오	신재생			
		A	계 (B=C+D+E)	급전가능 발전기(C)	신재생 투자비용(D)
2017	47,388,416	36,637,914	35,374,320	1,005,594	258,000
2018	34,297,264	42,104,526	33,417,424	6,889,946	1,797,156
2019	31,603,232	45,978,151	33,474,760	9,915,848	2,587,543
2020	30,440,208	49,635,303	31,984,696	13,997,184	3,653,423
2025	20,737,600	34,001,660	24,429,936	7,593,470	1,978,254
2030	15,580,608	19,410,363	16,498,048	2,311,051	601,264
2035	12,622,848	15,472,214	13,500,864	1,563,945	407,406
합계('17~'35)	432,703,776	577,200,769	440,708,736	108,255,699	28,236,334
차액(B-A) =	144,496,993				

- 또한, 미래 전력수급계획을 위한 과학기술적 해결과제들을 요약하면 다음과 같음

- 시스템운용상의 문제

- 신재생발전의 용량이 6,000만 kW 이상의 수준인 경우의 전력시스템운용 문제는 간헐적이고 가변적인 특성 때문에 응동이 빠른 가스터빈을 유사한 용량으로서 추가 건설할 필요 있음
- 이에 대한 논의는 자연력의 변화로 신재생발전 출력이 급격히 감소하는 상황까지 고려하기 때문임
- 미래의 실시간 시스템운용에서 가능성은 현재 시스템운용에서 검토할 범위 및 운용능력을 검증한 후에 논의하여야 함
- 특히, 신재생전력이 확대된 전력시장의 수요는 기상변화에 따른 변동성이 더욱 심화되고 이를 상쇄하기 위하여 응동력이 빠른 화력발전기의 발전량 증대로 자원배분량이 변화될 전망

- 이에 따라 원전, 석탄발전 등 기존 발전기(중앙급전발전)는 신재생전력 확대에도 그 역할이 대폭 축소되기보다 “용량 및 보조서비스 공급 주체”라는 새로운 역할이 더욱 강조될 전망



\* 출처: EPRI(미국전력연구소)

- 송배전문제

- 신재생발전의 용량이 6,000~7,000만 kW인 경우 지역적으로 분산된 1,000~2,000만 kW의 신재생발전출력의 변화로 인하여 실시간 전력 조류의 이동이 필요하므로 송전망이 이를 감당할 수 있도록 확장되어야 함. 이는 외국에서도 이미 지적되고 있는 문제이나 이번 연구에서 그 연구 필요성 제시수준에서 그침
- 또한 배전전압수준에서 무효전력공급설비비용도 고려되어야 함

### 〈신재생에너지 증가에 따른 계통영향〉

계통영향	일반적 대책
신재생 출력변동성에 따른 수급균형 유지문제로 인하여 계통 안정도 저하	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 출력안정화용 기기설치 및 양수발전과 협조운용</li> <li>• 신재생 출력 및 운영예비력 예측기술 제고</li> </ul>
신재생(변동성) 전원의 계통 수용 한계	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 신재생 수용증대를 위한 계통인프라 적기 확충</li> <li>• 계통운용, 계획을 고려한 지역별 신재생 개발</li> </ul>
특정 지역과 특정선로 집중연계로 선로 운전용량 초과	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 피크저감용 기기 설치확대</li> <li>• 신재생과 망해석, 감시제어기능 구축으로 신재생 수용량 증대</li> </ul>
전력품질저하(고조파, 고장전류 증대, 보호협조 문제 등)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고조파 필터, 한류리액터, NGR 설치 등</li> <li>• 신재생 역률제어장치, 양방향 보호기기 등 설치</li> </ul>

#### - 환경문제

- 신재생발전의 용량이 6,000~7,000만 kW 수준으로 개발된다는 가정 아래 국토의 효율적 이용, 소음공해문제, 환경문제, 산림파괴, 동물서식지 문제 등 고려 필요

### 〈신재생 2020계획 추진 태양광 및 풍력발전 설비건설 필요 면적(예시)〉

구분		단위용량당 설치면적	설치용량(가정)	소요면적
태	양 광	26m <sup>2</sup> /kW	40GW	1,040 km <sup>2</sup>
풍력 발전	육상풍력	0.2km <sup>2</sup> /MW(=5MW/km <sup>2</sup> )	10GW	2,000 km <sup>2</sup>
	해상풍력	0.1km <sup>2</sup> /MW(=10MW/km <sup>2</sup> )	10GW	1,000 km <sup>2</sup>
계				4,040 km <sup>2</sup>

○ 지금까지 전력 관련 기술혁신은 ICT 등 여타 부문에 비해 지연되어 왔음.

그러나 최근 디지털화, 스마트화 등 제4차 산업혁명의 견인역할을 수행하기 시작하였음

- 이에 전력산업구조의 근본적 변혁이 예상되어 충분한 기술혁신효과를 반영할 수준의 장기 전력수급계획의 목표연도를 최소 30년 정도 확대가 필요함

- 이런 차원에서 원전과 신재생의 환경저해 등 외부효과, 발전단가, 부지 소요 등은 가변적 요소가 많기 때문에 엄격한 기술평가와 정례적인 보완이 필요함
- 우리 과학기술한림원은 가변적인 전력기술혁신추세에 부응하여 정부는 2개의 장기기술개발과제와 기존 신재생기술개발계획과 별도로 신재생전력 계통연계 효율화에 필요한 9개 중기 기술개발과제를 시행할 것을 건의함
  - 장기기술개발과제: 우주태양광발전, 소형 모듈형 원전
    - \* 핵융합은 진행 중인 과제이므로 건의과제로는 제외
  - 중기 기술개발과제
    - 1) 신재생자원에 대한 국내잠재량 및 계통수용성 제고 기술 개발
    - 2) 장단기 신재생 출력예측 및 변동성 완화 기술 개발
    - 3) 신재생 특성을 고려한 적정 예비력 등 전력계통 해석기술 개발
    - 4) 계층적 신재생 운용감시 제어 시스템 개발
    - 5) 신재생전원별 장단기 투자타당성 평가시스템 개발
    - 6) 신재생 전원 국제경쟁력 확보방안 수립
    - 7) 백업발전기(현재로서는 가스터빈)의 구성 및 운영전략
    - 8) 중간부하용 발전기의 탄력적 운용기술 개발
    - 9) 신재생전력 증대에 부응하는 송전망 보강기술 개발
- 송-배전망 보강은 신재생발전원의 증가에 따른 필수요소이며 막대한 투자를 유발하는 것이므로 추후 상세분석 필요하며, 전력산업 구조개편의 주요 과제로 취급하여야 함
- 현재 원전과 신재생전력에 관련된 많은 기술적-경제적 불확실성이 방치되고 있음. 이에 정부는 내년부터 제9차 전력수급계획 작성에 필요한 기술혁신 효과와 시장적응도 변화, 그리고 사회적 합의 도출가능성을 고려하여 차선 (次善, Second-Best)의 에너지전환정책의 추진을 검토할 필요가 있음

- 
- 이를 위해 2030년 신재생 20% 달성을 위한 실질적 내용을 발전량 기준에서 설비용량 기준으로 바꾸어 최선의 단-중기 기술조합 구성을 검토할 필요가 있으며,
  - 또한 에너지절약 + 순환형 재생에너지(VRE: Variable Renewable Energy)로만 20% 목표달성을 프로그램을 구성하는 대안검토도 가능할 것임.

## 2. 연구의 결론

- 2030년 신재생전력 20% 달성을 위한 3020계획은 현재의 전력산업 여건을 반영하는 각종 입력 자료와 WASP 등 기존 방법론을 활용하는 경우 추가 국민 부담을 야기할 가능성이 큼
  - 본 연구과정에서 도출된 2030년까지 정부의 신재생전력 20% 달성을 위해 송배전설비 및 백업 발전설비 보완비용 등을 제외하고도 약 144조원 수준의 추가부담이 발생할 가능성이 WASP모형 실행결과가 대표적인 검증사례임<sup>20)</sup>
- 또한 본 연구에서는 3020에너지전환계획 관련 자료에 근거한 신재생-원전 상생구도의 설정 방법론 구축을 다각도로 추진하였으나, 기존 연구방법론을 활용하여서는 유효한 논리전개에 한계가 있음을 발견함
  - 제한된 본 연구과정에서 검토가 부족한 인문사회과학적 논리에 근거한 에너지시장, 산업구조 및 보다 광범한 경제사회 관련 정책의 효율적 추진으로 새로운 복합과학적 추진 및 효율화 논리개발을 통해 본 연구와 상생적인 역할 증진을 건의함

---

20) 실제 계산에 있어서는 7차 전력수급계획 대상년도인 2035년까지를 예산 대상기간으로 하였다. 이는 비용의 변동규모를 파악하기 위한 대상기간으로서 충분하다고 보았음. 2030년까지 약 7,000만 kW의 신재생전원 투자와 동일 규모 백업발전기 건설가능성에 대한 별도의 검토가 필요함

- 이에 신재생 위주 에너지전환계획 추진을 위해서는 기존의 장기 전력수급계획 추진 방법론으로는 한계가 있음을 인지해야 할 것임
  - 특히 15년 이내 중기계획은 계획기간의 축소에 따라 비용 최소화를 목적으로 하는 WASP 등 기존 방법론의 개선과 보완을 위한 논리개발이 시급함
  - 국가전력시스템 확장과정에서 신재생전력을 고려한 설비확장계획은 국제원자력기구 등에서도 추진하고 있으나 아직 완성하지 못한 것으로 알려지고 있음. 이를 국제공동연구과제로 검토할 필요성이 있음
- 에너지전환경정책은 적어도 30년 이상의 장기 “비전”을 제시하고 검증하는 구도를 가져야 함. 따라서 단-중기계획에는 실행 효율성을 주로 고려한 차선(次善)의 선택을 수용해야 할 것임
  - 이를 위해 2030년 신재생 20% 달성을 목표의 실질적 내용을 발전량 기준에서 설비용량 기준으로 바꾸어 최선의 기술조합 구성을 검토할 필요가 있으며,
  - 또한 에너지절약 + 순환형 재생에너지(VRE: Variable Renewable Energy)로만 20% 목표달성을 프로그램을 구성하는 대안검토도 필요함
- 신재생 위주 에너지전환경정책 추진을 위해서는 현재 신재생전력이 가지는 규모의 비경제, 생산이 편협성, 기술성숙도 미비 등 경제적-기술적 한계를 극복하는 동태적 기술혁신성과 평가 작업이 필요함
  - 따라서 정부는 2030년 신재생전력 20% 수준 달성을 위한 에너지전환경정책의 선행조건으로 대규모 신재생 포함 전력기술전반에 걸친 기술기획-평가 작업을 수행해야 할 것임
  - 이를 통해 신재생 전력의 그리드 패리티(Grid Parity: 기존 전력 대비 경제성 확보) 시기와 형식에 대한 세계 최고수준의 기술정보 확보를 기해야 함

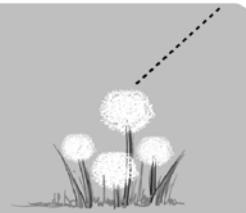
- 
- 본 연구팀은 우리나라 최고의 과학기술 전문가 집단인 한국과학기술한림원이, 필요시 한국공학한림원 등 여타 전문가 집단과 협력을 통해, 신재생-전력 기술 기획-평가 작업을 수행할 수 있음을 확인함

### 3. 건의

- 에너지전환정책 수립 초기 과정에 있는 우리나라는
  - 에너지기술혁신체계 기획- 평가- 실행역량이 효율적 관련 정책수립과 집행의 기반이 된다는 점에 대한 정부와 관련기관 및 산업계의 인식제고를 강력히 건의함
  - 또한 과학적 연구방법론에 준거한 경우에만 원전-신재생 상생전략 도출과 효율적이고 지속가능한 에너지전환정책 추진논리 정립이 가능하다는 점을 인식해야 할 것임.
  - 보다 구체적으로 원전과 신재생 전력이 상생할 수 있는 국가에너지전환정책의 성공기반 구축을 위한 출발점은 충실한 신재생-원전기술 기술기획-평가라는 사실을 고려할 것을 강력히 건의함
- 이와 함께 성공적인 에너지전화정책 추진을 위해 본 연구와 병행하여;
  - 에너지시장과 산업 구조 전환, 그리고 소비자 대응태세 변화를 촉진할 다양한 경제사회전략을 사회적 합의를 기반으로 추진할 것을 건의함
  - 특별히 에너지관련 정책은 자연과학-사회과학-인문과학이 통합된 복합 과학적 논리를 가져야 장기 효율성이 입증된다는 점을 강조함
- 따라서 본 연구팀은 우리나라가 활용 가능한 최고의 전문가 집단(과학기술 한림원 등)을 활용한 기술기획 및 평가 사업단을 구성하고 최단 시일 내 세계 최고수준 연구결과 도출이 가능하도록 정부가 지원하는 것이 미래 에너지전환 정책 효율적 추진의 요체라는 점을 본 연구의 주요 건의사항으로 제시함

# VIII

## 부록: 미래 전력기술



### 부록 1. 소형 모듈형 신형 원자로(SMR: Small Modular Reactor) – 지속가능 미래 원자력 옵션 –

#### □ SMR의 필요성: 원자력의 지속가능성 요구조건에 궁극적 부응

원자력에너지가 물질로부터 생성될 수 있는 최대 에너지라는 사실은 원자핵 물리학 논리체계에 심각한 오류가 발견되지 않는 한, 에너지 밀도가 원자력보다 더 큰 다른 에너지원이 새로 태어날 가능성이 없다는 것을 의미한다. 다만 열역학적으로 유용한 열에너지를 변환되지 않는 방사선이 통제 불능상태에서 생태계로 유출될 우려를 완벽하게 차단하는 기술을 확신하지 못하기 때문에 원자력안전이 현재 가동되고 있는 원자력발전시스템의 지속가능성에 저해요인으로 작용하여 사회적 및 경제적 부담을 안겨주고 있을 뿐이다.

결국 지난 60년에 걸쳐 진화한 원자력발전기술, 특히 우리나라 원전의 주종로형인 가압경수로 원전기술은 지금껏 인류가 만든 어떤 시설보다 종합적이고 체계적으로 최선의 안전을 만족하도록 설계, 건설 및 운전되고 있다는 실증적 가치조차도 큰 도움이 되지 못한 체, 오히려 안전이 증진될수록 안전하지 않을 수 있다는 인식도 증가하는 역반응현상이 나타나고 있다. 더 나아가서 재처리와 같은 핵주기 기술의 핵확산 전용 우려는 고준위방사성폐기물인 사용후 핵연료의 미래조차 불확실하도록 방치하므로 문제를 더욱 복잡하게 만들어 왔다.

---

이러한 내재적 저해요인이 오늘날 가장 확실한 온실가스 최소발생 에너지원으로 평가받고 있는 원자력을 신 기후 체제의 핵심 정책드라이버인 CDM(Clean Development Mechanism)에 받아들이는 것을 유엔기후변화협약 당사국들이 주저하고 있는 현실이다. 그렇지만 대부분의 에너지전문가들은 원자력이 미래 에너지믹스의 일원으로 지속적이고 비중 있는 역할을 담당할 가치가 있음을 부정하지 않는다. 왜냐하면 재생에너지집단은 독립적으로 기저부하를 수용하는 안정적 전력공급원으로서 부적합하고, 과학기술집약 문명사회의 복합구조에서 전력망계통관리의 신뢰성이 보장되는 저탄소에너지지원 가운데 원자력을 대체할 만한 고품질 발전기술이 없기 때문이다. 이에 과학기술적 차원에서 필요한 것은 현재 원자력기술이 안고 있는 저해요인의 제거 또는 개선과 더불어 COP21 의무 이행의 일차적 역할을 담당할 재생에너지기술의 태생적 취약성을 보완하는 공생조건을 구현하는 것이다.

이상에서 언급한 사항들을 정리하면, 원자력의 지속가능 발전은 먼저 내재적 문제인 안전성, 방사성폐기물관리, 핵화산차단을 경제적, 사회적 및 환경적으로 수용될 수 있어야 실현가능하다는 것이다. 이 문제들의 본질을 요약하면 다음과 같다.

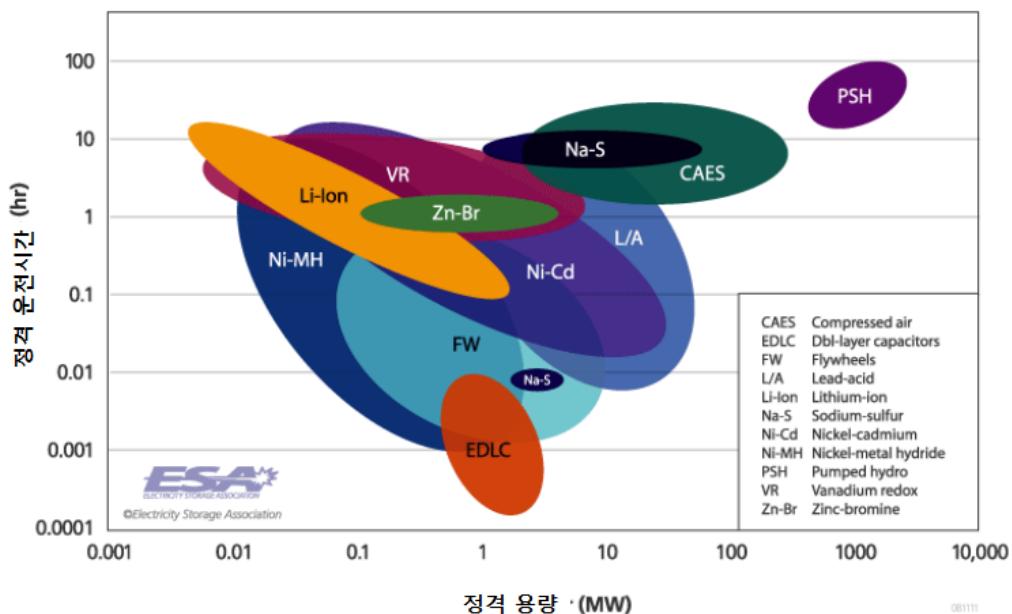
- 원자력 안전: 핵반응에서 생성된 방사선에 의한 인적 또는 물질적 손실이 발생하지 않는 상태를 “원자력 안전”的 개념으로 정의한다. 구체적으로 원자력 에너지시설의 안전은 TMI, 체르노빌 및 후쿠시마 사고를 거치면서 얻은 교훈을 반영하여 안전설계, 건설품질 및 인적오류방지를 총체적으로 체계화한 심층 방어철학의 완성으로 견고하게 되었다. 그렇지만 후쿠시마 사고를 원자력 안전에 대한 신뢰는 크게 약화되고, 돌이킬 수 없는 재앙으로 진전된 측면이 크다. 이의 주원인은 의사결정구조의 취약성에 있다는 결론에 도달함. 따라서 안전문화의 가치와 범주에 대한 재평가가 요구되는 시점에 이르렀다.

- 방사성폐기물관리: 후행핵주기에 대한 확고한 정책이나 계획이 없는 우리나라는 고준위폐기물로 분류되는 사용후 핵연료의 누적 및 장기관리문제가 원자력 발전의 미래에 가장 큰 장애물 중의 하나로 등장한다. 획기적인 기술개발 없는 재처리와 재활용은 경제성과 핵확산 우려를 고려할 때, 그 전망이 밝지 못하다는 것이 중론이다. 따라서 미래 원자력에너지시스템은 핵 비확산형 순환핵주기에 기반을 둔 혁신형 원자로가 개발되거나 적어도 사용 후 핵연료의 발생이 매우 적은 초장주기 개량형 핵연료로 상용화를 기반으로 하여야 할 것이다.
- 핵확산차단: 국가나 기관이 핵무기용 재료와 기술을 전용하지 못하도록 감시하는 목적에서 개인이나 범죄조직에 의한 핵물질 도난 또는 테러를 방지하는 기능을 포함하는 광의의 핵 안보 요건으로 “핵확산 차단” 개념이 정립되어 왔다. 이는 핵확산 저항성이 큰 핵연료시스템과 핵주기를 사용하거나 불순한 목적으로 핵심설비에 접근하는 것을 막는 물리적 방호가 완벽해야 함을 의미한다.

한편 자연현상에 종속적인 재생에너지시스템은 지리적 환경에 따라 차이가 크지만 대체적으로 에너지 밀도가 낮아서 전기전환효율이 작고, 계절에 의한 변동주기와 가용자원양의 변동 폭이 커서 우리나라의 경우 이용률도 또한 낮은 한계를 보인다. 특히 불안정한 기상조건의 간헐적 특성으로 발전량 예측이 불확실하기 때문에 보조전원과 주파수조정을 위한 에너지저장시스템이 반드시 필요로 한다. <그림 8.1.1>은 2008년 현재 상용화가 가능한 에너지저장시스템 기술수준을 정리한 것임, 신재생 전원이 전력망 안정에 영향을 미칠 만큼 확장될 경우, 양수 발전(PSH)을 제외하면, 어느 경우도 획기적인 신기술이 나타나지 않는 한, 대규모 보조전원으로서 기술적, 경제적으로 극복해야 할 많은 문제점들을 노정하고 있다.

저농축(3~5%) 이산화우라늄을 핵연료로 사용하는 대용량 수냉식 원자로형 원전은 핵연료의 저렴한 연료비와 기계적 건전성을 고려하여 특별한 사유가 발생하지 않는 한 노심교체주기(1~1.5년)동안 정상 운전하는 기저부하전원으로 뛰어난 경제성과 안정성이 입증되었다. 그러나 보조전원의 필수조건인 유연한 부하추종운전을 허용할 만큼 신속한 출력제어는 아직 한계가 있다. 프랑스처럼 원전비중이 크거나 독일처럼 재생에너지 비율이 큰 국가에서는 원전의 부하추종 운전이 시행되고 있지만, 부하변동 주기(1~2회/일) 및 범위(50~100% FP), 출력 감발율(3~5% FP/분)이 신재생 전원의 보조전원으로 사용되기에 아직 한계를 보이고 있다.

〈그림 8.1.1〉 에너지저장시스템기술의 종류 및 용량(2008년)



## □ 지속가능 미래 원자력 옵션

미래 에너지원으로서 원자력의 역할은 안정적으로 저렴한 전기를 생산하는 것과 신재생 전원의 간헐성을 완충시킬 수 있는 능력을 갖추는 것이지만, 원자력 에너지 활용의 최대 제약요인인 안전성, 고준위폐기물관리 및 핵확산차단의 3대 현안을 사회적 수용성과 경제적 경쟁력이 갖춘 가운데 해결하는 데에는 아직 한계가 있다. 그렇지만 신재생에너지의 미래를 설계하는데 기술혁신을 통한 가격하락을 핵심 전제조건으로 다루듯이 원자력의 미래도 연구개발과 기술혁신으로 해결방안 도출이 가능한 것으로 예상이 가능하다. 특히 다가오는 4차 산업 혁명으로 나타날 혁신기술의 긍정적 영향을 고려하면 더욱 긍정적일 것이다.

에너지원으로서 원자력은 핵반응원리에 따라 핵융합원자로와 핵분열원자로로 구분하지만, 핵융합의 상용화 노형과 시기가 구체적이지 못한 현실을 고려하여 본보고서는 핵분열원자로만을 대상으로 한다. 또한 핵분열원자로는 고온 열원과 청정 전원으로 이용 가능하지만, 전기 생산에만 국한하였다. 또한 전통적으로 용량에 따라 대형( $\geq 900\text{MW}$ )과 중소형( $\leq 600\text{MW}$ )으로 나누지만 활용 목적을 분명히 구별하기 위해 대형과 소형( $\leq 300\text{MW}$ )만을 다루기로 한다.

### ○ 소형모듈원자로(SMR)

소형모듈원자로는 1985년 미국의 Weinberg에 의해 최초로 제안된 개념을 바탕으로 정의하면, 우선 출력이 기존의 상용 원전에 비해 작고, 제작공장에서 모듈 형태로 만들어 발전소 부지현장에서 단순한 조립공정을 거쳐 건설되는 원자로시스템이다. 1950년대부터 이미 미국과 구소련은 선박추진용으로 소형 원전기술을 확보하였고, TMI 사고를 통해 대형 원전의 안전성은 확인되었지만 대규모 사업비와 투자 리스크로 시장 경쟁력이 취약할 것이 예상되면서 보다 단순하고 고유안전성이 높은 SMR의 가치가 관심을 가진다.

---

이와 별도로 IAEA는 노형에 무관하게 출력 300MW 이하의 원자로를 소형 원전으로 구별하므로 SMR의 개발 범위를 넓혔고, GEN-IV Forum이 다양한 동급의 제4세대 원자력에너지시스템 노형을 제안함에 따라 전 세계가 SMR이 보유하는 잠재적 활용가치를 이해하면서 자연스럽게 활발히 개발에 동참하기 시작하였다.

지금까지 각국이 개발하고 있는 SMR형 원자로는 다음과 같다.

- 일체형 가압경수로: SMART(한국), NuScale(미), mPower(미), IRIS(미), CAREM(알), IMR(일), SCORE(프), AVR(러), KTL-40S(러), NP-300(러), VBER(러), Holtec(미)
- 비등경수로/중수로: AHWR(인), CCR(일), MARS(인)
- 가스냉각로: GT-HTR-300(일), GT-MHR(미), HTR-PM(중), BBMR(남아)
- 소듐냉각로: 4S(일), BN-GT-300(러), KALIMER(한), PRISM(미), RAPID(일)
- 납/비스머스 냉각로: BREST(러), ENHS(미), LSPR(일), STAR/SSTAR(미), SVBE-75/100(러)
- 기타 노형: AMBIDEXTER(한), AHTR(미), CHTR(인), Hyperion(미), MARS(러), MSR-FUJI(일), TWR(미)

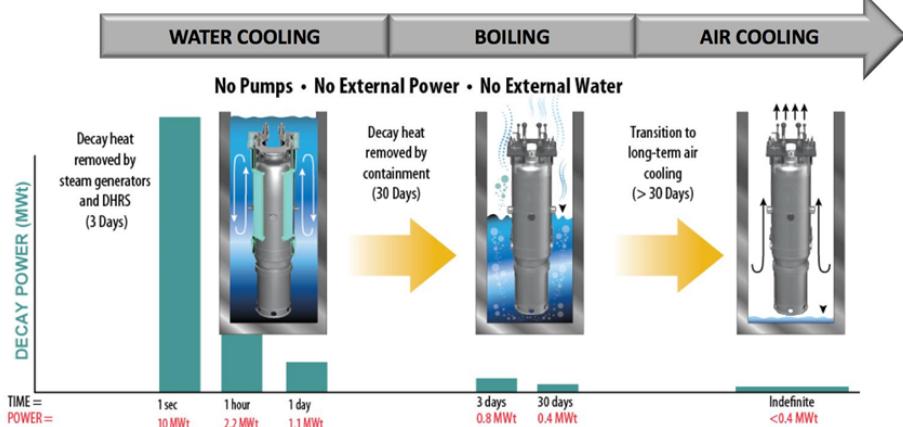
SMR은 현장 건설공정을 최소한 줄이며, 연료교체를 하지 않고 장기간 운전한다는 장점 때문에 오지나 극한지역에 전력이나 에너지를 안정적으로 공급할 수 있다. 이러한 환경에서는 안전 운전에 필요한 훈련된 유자격 인력을 대형 원전처럼 확보하는 것이 용이하지 않다. 따라서 SMR의 주요 설계요건은 고유 안전성이 뛰어나고, 피동안전개념의 안전정지 및 보호계통의 자동작동에 의해 안전정지상태가 유지할 수 있도록 운전원이 상주하지 않고 정상가동이 가능할 것을 요구한다.

〈그림 8.1.2〉는 2017년 현재 미국 NRC에서 설계인증을 검토 중인 설계출력 50MWe급 SMR NuScale이 후쿠시마 사고의 원인인 발전소의 완전 정전사고가

발생하고, 외부로부터의 비상냉각수 공급이 차단되었다고 가정할 때, 운전원의 도움 없이도 원자로가 안전하게 유지될 수 있을 보여준다.

**(그림 8.1.2) NuScale SMR 발전소의 정전사고 후 장기냉각 능력**

Reactor cooled indefinitely without Operator Action, AC/DC power, or Additional Water



엄격한 품질보증과정을 거치면서 설계, 제작되는 SMR의 가동 중 안전성은 고준위 방사선원인 핵분열생성물질 원자로 내 재고량이 대형 원전에 비해 10~30% 수준에 불과하므로 노심용융을 일으키는 중대사고 상황에서도 외부로 유출될 수 있는 방사성물질이 매우 적다는 점도 SMR의 고유 안전 특성 중 하나이다.

대부분의 SMR 설계는 다수의 원자로를 동일한 지하원자로격납구조물 안에 병렬 또는 직렬로 연결하여 배치하는 개념을 채택한다. 그러므로 원자로 격납 지역에 출입을 통제하는 것이 매우 용이한 반면에 현장에서 연료를 교체하는 어려움을 극복하기 위해 초장주기 교체노심 혹은 원자로계통 집합체를 통째 교체하는 방법을 선택해야 하는데, 핵통제 대상물질의 도난이나 테러 가능 경로가 획기적으로 줄어들어 핵확산 저항성이 우수할 것으로 평가된다.

다수호기 SMR 발전소 건설방법은 전력수요전망에 맞추어 초기부터 단계적으로 확장하는 방안과 초기부터 전호기를 건설하고 부하면동에 따라 가동 기수를 조정하여 운전하는 두 가지 방안을 고려할 수 있다.

---

전자는 대형 상용원전 건설 사업이 안고 있는 초기투자 리스크를 크게 완화시킬 수 있고 반복설계와 건설로 얻는 경험축적으로 경제적, 기술적 이득도 기대된다. 반대로 후자는 부하추종운전 능력이 매우 우수해서 재생에너지 전원의 비중을 높이려면 반드시 확보해야할 보조전원 및 에너지저장설비의 역할을 폭넓게 대체가 가능하다.

현재 SMR 개발 동향은 1970년대 제1세대 원전이 개발될 당시와 유사한 점이 많다. 우선 원자로의 기본 구성요소나 설계요건의 스펙트럼이 매우 넓어서 검증된 최적 로형이 선별될 때까지 상당한 시간과 노력이 필요할 것으로 예상된다. 또한 아직 대형 원전에 비해 경제적 경쟁력이 취약하고 건설 및 운전을 위해서 반드시 통과해야하는 인허가 경험이 없다는 점이 선결 문제점들이다.

### ○ 대용량 신형경수로(ALWR)

앞서 언급했듯이 제3세대 원전인 대형 경수로가 현재 안전성과 경제성 관점에서 ‘state of art energy technology(최신첨단기술)’ 중 하나임을 인정하지만, 핵확산방지 및 사용 후 핵연료관리의 투명성이 미해결 과제로 남아있다. 이에 미래 에너지원으로서의 신뢰성을 확고히 할 수 있는 방안이 아직 해결과제로 잔존하고 불확실하다. 그럼에도 불구하고 지금껏 인류문명의 발전이 주는 교훈은 과학적 발견 없는 기술혁신은 없으며, 기술혁신 없는 기술발전은 없다는 것이다. 따라서 지난 60년을 거치면서 진화한 경수로 원전의 지속가능한 미래를 추론하면서 SMR 기술혁신 방향을 추론하면 다음과 같다.

지난 3차에 걸친 산업혁명을 인간과 기계와의 관계변화를 가져온 기술혁신이며 이를 가능하게 한 것은 에너지원의 변화였다. 이의 연장선상에서 4차 산업혁명은 인간과 기계간의 확대된 공유영역이 데이터라는 에너지원에 의해 만들어지는 기술혁신이라고 볼 수 있다.

후쿠시마 사고의 불가항력적 원인인 인적오류의 마지막 퍼즐인 의사결정구조의 불완전성을 보완할 기계와의 공유영역을 개척하는 것이 경수로 원전의 안전성에 대한 확률론적 해답까지 마무리하는 길이 될 것으로 추론된다.

에너지는 보존되고 변환되는 자연재화로서 단지 기술이라는 방법을 이용하여 인간의 요구사항에 맞게 기술적 변환(엔지니어링)을 거치면서 인간 필요를 충족 시키게 된다. 결국 대형 경수로 원전이 미래 에너지기술로서 걸림돌이 되는 사용후 핵연료로 인해 파생된 고준위폐기물관리나 핵 안보 문제도 미래 세대의 요구에 맞추어 새로운 기술개발로 발전적인 방향으로 해결될 것은 역사를 통해 확신할 수 있다. 이러한 추론이 SMR의 미래를 낙관적으로 보는 본 연구진의 일관된 견해이다.

---

## 부록 2. 우주 기반 태양광 발전

### □ 세계 에너지 수급여건과 미래전망

국제에너지기구(IEA, International Energy Agency) 보고서, World Energy Outlook 2014에 의하면 2012년의 전 세계 최종 에너지 소비량은 133.6억toe (Tonne of Oil Equivalent) 정도라고 추산하고 있다. 세계 인구를 대략 70억 명이라고 하면, 1인당 년 간 약 1.9toe를 사용한 것으로 계산된다.

〈표 8.2.1〉 세계 1차 에너지 수요량

(단위: Mtoe / %)

	1990		2012	
Coal	2,231	25.40	3,879	29.03
Oil	3,232	36.80	4,194	31.39
Gas	1,668	19.00	2,844	21.29
Nuclear	526	5.98	642	4.81
Hydro	184	2.10	316	2.37
Bioenergy*	905	10.31	1,344	10.05
Other Renewables	36	0.41	142	1.06
Total	8,782	100.00	13,361	100.00

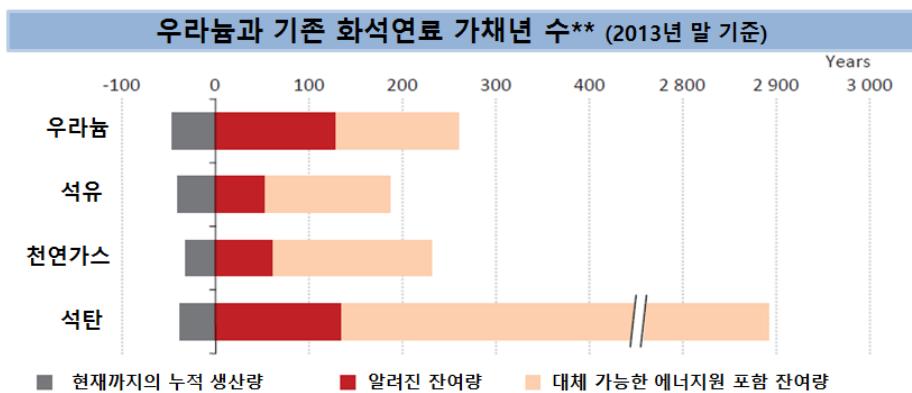
\* Includes traditional and modern uses of biomass

전 세계 에너지원의 채굴 가능 년수가 아래 〈그림 8.2.1〉에 나타나 있다. 구체적으로 석유를 살펴보면 전 세계에서 경제성이 있다고 판단되는 채굴가능 석유 매장량은 현재 약 1.2조 배럴 정도라고 보고 있다. 그렇다면 전 세계의 1일 석유 사용량이 약 1억 배럴(2013년 기준 9133만 배럴)이기에, 12,000일, 즉, 불과 40년이 안되어 전부 소진된다는 것이다. 이러한 추산은 이제 막 경제개발을 시도하고 있는 인도와 수년 내에 개발도상국이 될 아프리카 제국들의 에너지사용 증가속도를 무시한 수치이다. 만약 현재에도 전기 공급의 혜택을 받지 못하고 있는 약 15억여 명이 향후 전기를 사용하기 시작하면 에너지 소비는 더욱 늘어나

화석에너지 매장량의 소진은 더욱 가속화될 전망이다. 물론 석유의 채굴기술 발전과 일부 지역에서의 새로운 유전개발은 계속적으로 이루어질 것이다. 하지만 그렇게 된다 하더라도 짧게는 40~50년, 길게는 100년 뒤에는 결국 현재의 주력 에너지원 중 하나인 석유의 자원이 고갈될 것이라는 사실은 자명하다. 이러한 고갈의 징후를 보이는 것은 석유뿐만이 아니다. 석탄, 천연가스의 다른 화석연료들이나 우라늄도 몇십 년의 차이는 있겠지만 동일한 한계에 봉착하게 된다.

물론 이 자료에 반론을 펴는 많은 분들도 있다. 40, 50년 전에도 석유는 앞으로 40~50년이면 고갈된다고 했는데 40~50년이 지난 현재에도 비슷한, 아니 더 늘어난 매장량이 있다고 하니 우린 걱정할 필요가 없다고 생각한다는 것이다. 계속 새로운 석유가 발견되어 매장량이 유지될 것이라는 낙관적인 관점이다. 아마 이솝 우화 양치기 소년의 사례처럼 석유고갈 주장은 과대포장이라고 간주 한다. 혹은 석유가격을 유지하려는 석유 메이저 기업들의 농간일 것이라 치부하기도 한다. 그러나 어쨌건 매장량이 유한한 것은 어김없는 사실이고, 새로운 석유가 발견되더라도 몇십 년의 차이가 있을지 모르지만 석유는 결국 동나게 되어 있다.

〈그림 8.2.1〉 기존 에너지원의 한계



\* 출처: IEA, World Energy Outlook 2014

---

대체에너지원으로는 먼저 풍력, 지상태양광발전, 지열, 바이오매스 등을 들 수 있지만 아직까지는 기술적 문제, 경제성부족, 대용량화의 어려움 등으로 대체의 역할을 충분히 하고 있지 못하다. 특히 대용량화가 가능한 원자력 발전에 비교해서 경쟁력을 가지려면 하나의 발전 단지가 적어도 수 GW급 수준의 용량을 가져야하는데 에너지 추출원의 밀도가 높지 않아 기존의 base-load power를 대체하기에는 어려움이 많다. 아래 표에서 볼 수 있듯이 풍력과 지상태양광 발전들은 단위 면적에서 발전할 수 있는 기본의 에너지양도 적은데다가 발전을 못하는 시간도 많기에 불완전한 에너지원이라고 할 수 있다는 것이다.

〈표 8.2.2〉 각 에너지원 별 에너지 밀도

에너지원	에너지 밀도, W/m <sup>2</sup>	비고
태양광(지상), 지구적도	1000	태양광 직각 면에서 수치
태양광(지상), 일반지역	150~300	위도에 따라 다를 것
실제 태양광 발전단지, 평균치	6.7	흐린 날과 해진 후를 고려한 값
태양광(지구정지궤도)	1360	이론적 최대치
풍력 5m/s	76.	이론적 최대치
풍력 10m/s	612.	이론적 최대치
풍력 15m/s	2067	이론적 최대치
실제 풍력발전소(해상), 평균치	2.5	London Array wind farm

전력 사용 피크타임 부담률에도 문제가 많다. 전력사용량이 제일 많은 “바람 한 점 없는 무더운 여름날”에는 풍력발전이 불가능하고, 난방 수용이 많은 추운 겨울날에 지상태양광발전을 못하여 결국 여분의 보조 발전 시스템을 구비하여야 하는 단점도 더해진다.

아래 〈표 8.2.3.〉에서 볼 수 있듯이, 수력발전을 포함한 기타 신재생에너지의 전력 생산량은 세계 전력 생산량의 약 21%에 불과하다. 수력의 전력 생산량을

제외하면 약 5% 정도의 적은 비중을 차지하고 있다. 가장 큰 발전량을 가진 신재생 에너지인 수력발전 또한 세계 물 자원의 한계로 인하여 무제한적으로 용량을 늘릴 수는 없는 실정이다. 다시 말하면, 수력, 풍력, 지상 태양광 혹은 태양열, 바이오 매스, 조력, 파력, 지열 등의 요즈음 각광 받고 있는 신 재생에너지원들은 전력 공급의 필수요건인 지속성과 가용 발전량에 있어서 주력 전력 (Base Load Power) 에너지원으로써 화석연료의 역할을 대체하기에는 한없이 부족하다. 결국 화석연료 에너지의 수명을 조금 연장시키기 위한 보조적인 에너지원밖에 되지 못한다는 결론이다.

**〈표 8.2.3〉 연료별 세계 전력 생산량**

	1990		2012	
<b>Fossil fuels</b>	7,495	63	15,452	68
Coal	4,425	37	9,204	41
Natural gas	1,760	15	5,104	22
Oil	1,310	11	1,144	5
<b>Nuclear</b>	2,013	17	2,461	11
<b>Hydro</b>	2,144	18	3,672	16
<b>Other Renewables</b>	173	1	1,135	5
<b>Total</b>	11,825	100	22,721	100

\* 자료출처: IEA

이 시점에서 필자는 제반 문제들을 해결할 수 있는 미래의 에너지원으로 우주 기반 태양광을 제안하고자 한다. 지구 대기권 바깥에서의 태양광에너지는 평방미터당 1.4Kw 수준으로 지상보다 훨씬 높고 정지궤도에서 발전한다면 1년 내내 밤낮 구분 없이 발전 가능하고 또한 대용량화가 가능하기에 경제성도 조만간에 확보할 수 있을 것으로 분석된다.

---

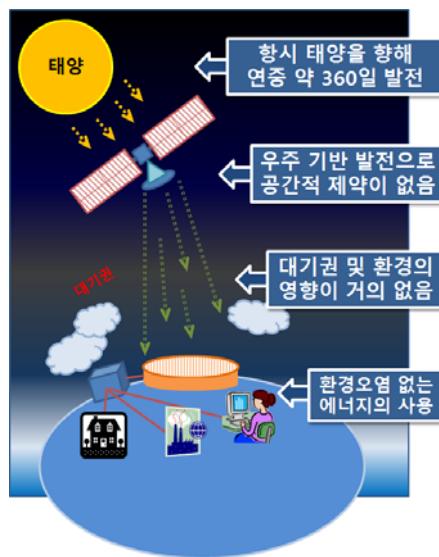
## □ 우주기반 태양광 발전 시스템

우주기반태양광발전(Space Based Solar Power, SBSP) 시스템은 거의 50년 전에 이미 미국의 Peter Glaser에 의해 제안되었다. 아폴로호의 달 착륙 이전인데도 이미 아폴로 프로그램이 성공적으로 진행되고 있었고, 새턴5 로켓의 막강한 파워를 목격한 여러 사람들이 우주산업의 가능성을 낙관적으로 보고 있었던 것이다. 1974년에는 Glaser가 타당성 연구를 비용관점에서 수행했는데 발전위성 자재를 우주궤도에 올리는데 드는 비용 때문에 당장은 어렵지만 앞으로 더 조사 연구가 필요하다고 보았다. 1978년에 드디어 미 의회가 에너지성에 예산을 주고 본격적으로 개념연구를 시켜서 1986년까지 당시예산으로 5,000만 달러를 들여 세밀한 기술적 타당성 검토를 거쳤다. 당시 미 의회는 ‘기술적, 경제적, 환경적인 부분에 불확실성이 많다’라는 결론을 내렸고, 그 이후 새로운 행정부가 들어서면서 계속적인 연구를 하지 못했다.

1997년에는 NASA가 다시 “Fresh Look”이라는 프로그램을 통해 그간의 기술발전을 감안한 재검토를 수행한 결과, 기술적인 문제보다는 경제적인 타당성이 문제이고, 주된 비용인 발사비를 대폭 낮출 수 있는 조치가 필요하다고 결론을 내렸다. NASA는 계속해서 SERT라 불리는 우주태양광발전 관련 연구를 수행하여 기술적 타당성 검토와 1GW급 발전위성의 개념 설계도 수행하게 된다. 그 결론으로 “우주태양광 발전은 미래 에너지 공급을 위해서 중요한 고려대상이다. 특히 화석에너지의 역할을 대신할 기저전력공급원으로 유망하다. 기술개발 이니셔티브를 가지기 위해 공격적인 예비계획을 가져야한다. 그리고 경제성확보에 가장 중요한 발사비용이 저궤도 기준으로 1Kg당 100~200달러 수준이 돼야 한다고 주장했다. 그 이후에도 NASA에서는 여러 차례 기술타당성 검토를 거치면서 관련 기술개발도 일부 수행했으며, 마이크로웨이브를 이용한 장거리 전력전송에 성공하기도 했다. 에너지 문제에 항상 민감한 일본은 JAXA를 중심으로 타당성 연구를 수행했고, 최근에는 1.8Kw 전력을 50미터 떨어진 리시버에 보내 전력을 성공적으로 회수했다고 발표했다.

유럽 역시 우주기관인 ESA는 2000년대 초부터 미래기술로써 기술적 타당성 검토와 관련 워크숍을 통해 개발 가능성은 저울질하고 있다. 2005년에는 'Earth & Space-Based Power Generation Systems a Comparison Study'를 통해 0.5GW부터 500GW의 우주태양광 발전 설비에 대한 단계적 개발 가능성을 검토하며, 지상 태양광 및 태양열 발전과의 발전효율 및 경제성을 검토하는 보고서를 작성한 바 있다. 최근에 들어서는 중국과 인도도 우주기반 태양광발전 사업에 국가적인 관심을 보여 2012년에는 중국이 인도대통령 방문 시에 SBSP 개발에 협력할 것을 제안하기도 했었다.

〈그림 8.2.2〉 우주태양광발전의 장점

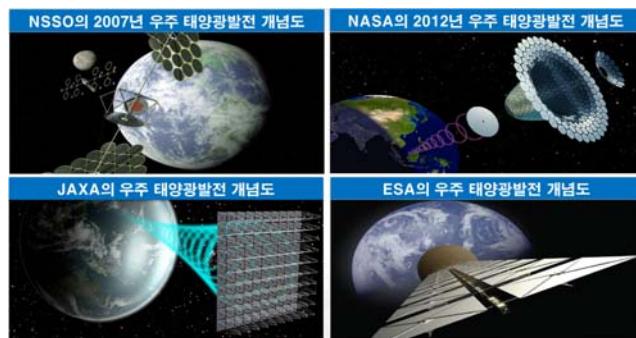


우주태양광발전 시스템을 구현하기 위해 필요한 인공위성 및 태양전지기술, 로켓 발사체기술 등의 필요기술들은 이미 수십 년 전부터 상당한 수준의 기반이 마련된 상태다. 마이크로웨이브를 이용한 원거리 무선전력전송기술(Wireless Power Transmission, WPT)도 1960년대부터 연구되기 시작하였고, 그 후에도 연구 개발 시험을 통해서 그 전송효율 또한 향상되어 왔다. 다시 말하면 우주태

---

양광발전 시스템에 관련된 필수기술들은 어느 정도 우리 가까이에 와 있고 이들을 구체적으로 구현할 실용적인 개발 단계만 남아 있는 현황이다.

### 〈그림 8.2.3〉 태양광발전시스템 : 발전위성, 무선전송시스템, 수신용 렉테나

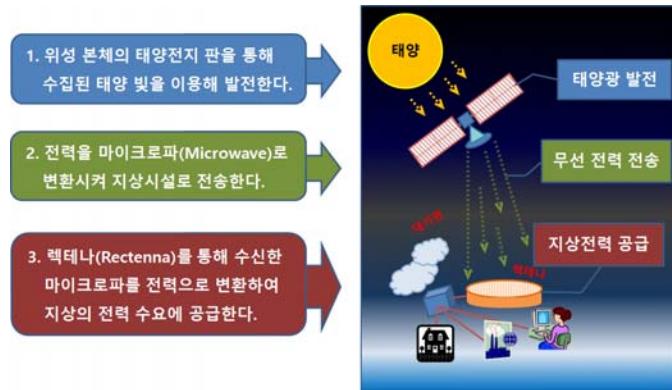


\* 출처 : NASA, JAXA, NSSO, ESA

앞에서 언급한 바와 같이 우주기반 태양광발전 개념이 1960년대 말부터 나오기 시작했지만 그 발전에 큰 진척이 없었다. NASA에서 여러 번의 연구가 있었고 일본에서도 기초연구를 했었지만 늘 타당성 검토 선에서 끝나고 말았다. 그 가장 큰 이유가 거대한 위성을 궤도에 올리는데 필요한 발사비용이었다. 대부분의 우주태양광발전 용호자들은 발사체 기술에 대한 전문성이 적어 단지 발전위성과 에너지 송수신 기술부분을 주로 논의를 하면서도 경제성의 가장 큰 열쇠를 쥐고 있는 저렴한 발사체 기술에는 구체적인 해법 제시가 없었다. 따라서 여러 번의 타당성 검토 연구를 해왔던 NASA 내부에서 조차도 공감을 얻지 못하면서 일부 NASA 고위층의 강한 반대에 부딪쳐 진도가 나가지 않고 있는 것으로 알고 있다.

그러나 최근 들어 Elon Musk의 SpaceX를 비롯해 몇몇 우주 벤처 기업들이 우주관광 사업을 목표로 저렴한 발사체 기술을 개발하고 있다. 대한민국도 현재 개발 중인 한국형 발사체가 SpaceX의 Falcon 로켓과 유사하여 우리도 단계별 기술개발을 지속적으로 추진하면 아주 저렴한 발사체로 거듭 날 수 있는 좋은 모델로 생각된다.

〈그림 8.2.4〉 우주기반 태양광 발전 개념도



우리 한국형발사체가 비록 개발비는 많이 소요되고 있지만 1회성 비용이기 때문에 개발 후 양산가격만 저렴하게 되면 발사비를 대폭 낮출 수 있게 된다. 무게가 1만 톤에 이를 2GW급 초대형 인공위성을 20-30톤의 모듈로 올려서 궤도에서 조립하는 경우, 발전위성 궤도 투입만을 위해서도 1년에 수천회의 발사가 필요할 것이기 때문에 자동차 제작처럼 대량생산기술을 철저히 적용하면 지금의 발사비용의 20 내지 30분의 1로도 낮출 수 있을 것이라는 생각이다.

소형엔진(100톤급) 9개가 장착된 모듈 3기를 1단으로 하고, 2단에 같은 엔진 2개, 그리고 3단에 정지궤도 안착용 엔진 1개 등 30개 엔진 형 KSLV(Korean Space Launch Vehicle)를 제안해 본다. 엔진 하나 제작원가를 1억 원으로 상정하면 엔진 가격 30억에 기타 제비용을 합치더라도 1회 발사비를 100억 원 정도로 맞출 수 있다고 필자는 생각한다. 그러면 20톤씩 500회 발사비용에 5조원, 발전위성 제작비용과 기타 부대비용에 5조원 정도로 생각하면 발전위성 1기를 궤도에 올리는데 약 10조원 정도면 가능할 것으로 생각된다. 이 위성이 발전을 시작하여 1년 약 8,000시간 가동할 수 있다고 가정하면,  $2,000,000\text{KW} \times 8,000\text{시간} \times 100\text{원}$ 으로 전기료 수입이 년 1.6조원이 되고 20~30년 수명을 생각하면 최소 36조원이 되어 유지비용을 감안하더라도 충분히 경제성이 있다고 본다. 이런 발전위성을 3천기 정도 정지 궤도에 올려 운용하게 되면 6TW의 전력을 지속적으로 지구상

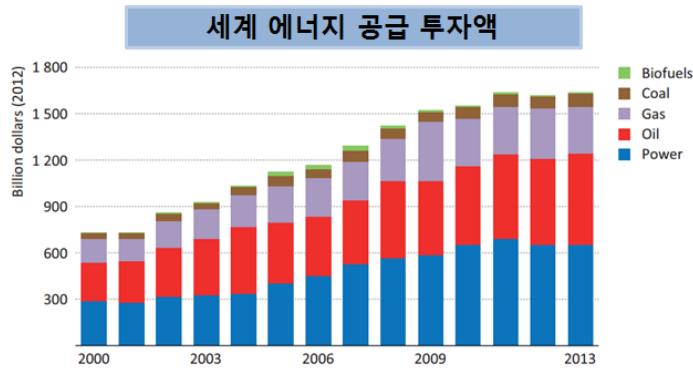
---

으로 보낼 수 있게 되어 전 세계의 전기 에너지 수요를 감당하게 되지 않을까 생각한다. 물론 이를 이루기 위해서는 기술적, 경제적, 사회적, 정치적인 난관들이 있을 것이라고 본다. 그러나 인류 생존을 좌우하는 안정적인 에너지 공급을 보장하는 사안이기 때문에 결국에는 해결될 것이라고 생각한다.

국제에너지기구(IEA, International Energy Agency)의 보고서, World Energy Outlook 2014에 의하면 전 세계적으로 현재 에너지 개발을 위한 투자액과 에너지 효율 개선, 신재생 에너지에 대한 투자액을 모두 더하면 이미 매년 2조 달러에 이르고 있다고 한다.

따라서 일단 전 세계적으로 각국 정부와 에너지 기업들 사이에 공감이 이루어져 우주기반 태양광 사업이 시작된다면 1기당 발전 위성 가격 10조원 정도의 투자는 큰 문제가 아닐 것이다. 아마 매년 100기의 발전 위성 궤도 투입도 가능할 것이다. 다시 말하면 엄청난 금액의 새로운 시장이 생겨나게 되는 것이다. 2조 달러 수준의 세계 시장이 생겨난다면 우리 대한민국도 손 놓고 있을 수는 없다. 전 세계적인 미래의 성장 동력이기 때문이다. 대한민국과 같은 작은 국가가 이런 지구적 대형 사업에서 중요 역할을 하기 위해서는 관련 분야에서 기술을 선점한다는 생각으로 확보하여 우위의 경쟁력을 가져야 하기 때문이다. 지금부터라도 우주기반 태양 광발전에 필요한 기초 기술 개발을 시작하여야 한다고 본다. 이미 중요한 요소인 저렴한 발사체 기술을 개발하고 있으니까 이의 기술 개발을 가속화하면 좋을 것이다. 그리고 우주공간에서 사용할 태양전지개발, 우주궤도에서의 초대형 위성조립기술, 효율적인 전력/마이크로웨이브 전환 기술 대형 안테나 기술, 지구상의 수신 안테나(렉테나) 개발기술 등을 위한 제반 기초 기술들의 개발에 우리의 국가 출연 연구기관들이 대거 참여해야 할 것으로 본다.

〈그림 8.2.5〉 에너지 공급을 위한 전 세계 투자액



\* 출처: World Energy Investment Outlook 2014

#### □ 우주태양광 발전의 경제성 확보방안

그럼 이제부터 좀 더 자세히 우주기반 태양광발전의 경제적 타당성에 대해 검토해 보자.

이제까지 우주 태양광 발전 시스템이 공론화를 거쳐 실제 개발로 진행되지 못하고 제안서로만 존재하게 된 가장 큰 이유는 천문학적 액수의 개발비용을 정당화하고 설득할 수 있는 경제적 타당성의 확보였다

큰 발전용량을 가진 거대한 크기의 발전위성 자체를 제작하고 조립하는데도 많은 비용이 들겠지만 이들을 우주공간으로 올리기 위한 엄청난 금액의 발사비용은 더 큰 장애물이었다. 현재 정지궤도에 5톤 정도의 인공위성을 올리기 위해서는 1억에서 3억 달러의 비용이 든다. 그렇다면, 현재의 1GW급 원자력발전소 1기의 발전량과 대등한 수준의 발전위성 1기의 무게가 적어도 1만 톤 정도는 된다고 보면 2,000회의 로켓발사가 필요하다. 현재 시가로 최소 발사비용인 1억 달러만 잡아도 발전위성 1기당 총 2000억 달러의 발사비가 산출되니 시작부터 경제성부족이라는 큰 난관에 봉착하게 되는 것이다.

그러나 이 상황을 반대의 논점으로 바라보면 낙관적인 해답이 바로 나올 수

---

있다. 즉 현재의 고가의 개발비와 제작비용을 줄일 수 있는 방안을 찾으면 해결될 수 있지 않겠느냐는 것이다. 이제까지의 로켓발사체 개발은 대부분 군용 미사일 개발기술을 전용하는 형태이었거나, 미국의 유인 달 착륙을 위한 아폴로 프로그램처럼, 국가 정책방향에 따라 비용을 신경 쓰지 않고 무한정의 예산을 성공적인 개발이라는 목표만으로 개발이 진행되어 왔다. 그러니 경제성에 대한 고려가 전혀 없었다고 해도 과언이 아니다. 미국과 소련이 벌인 체제 우월성을 보이기 위한 경쟁적인 우주개발 이후에야 본격적으로 발사체를 개발한 유럽, 일본 등의 후발주자들도, 미국의 개발비용을 토대로 해서, 손쉽게 국가로부터 예산을 받아낼 수 있었으니 저렴함을 목표로 쓸데없이 애쓸 필요가 없었다. 또한, 1회용 발사체는 발사 후 3분에서 길어야 10분정도만 버티면 바다로 버리는 로켓 부품들 인데도 실패에 대한 부담을 줄이고자 본능적으로 과도한 수준의 고급 부품들을 쓰고 있기도 하다. 어느 나라나 국민 세금을 들여 개발한 물건인 로켓이 발사에 실패하게 되면 당연히 각종 조사, 감사가 뒤따르고 누군가는 책임져야 할 것이고 결국 관련연구자는 아주 어려운 상황에 처할 수 있기 때문이다.

SpaceX는 세계최초로 민간 자본으로 정지궤도 위성 발사용 로켓(즉, 발사체) 팰컨9을 단 3억 달러의 비용으로 성공적인 개발을 마쳤고, 이를 토대로 로켓 1기의 제작비용을 크게 낮추었다. SpaceX는 팰컨9 개발 시에 가능한 한 시장에서 구할 수 있는 기존 부품을 쓰고 하청, 재하청을 통한 비용증가도 없었기에 최저 비용의 발사체 개발에 성공했다. 다시 말하면 필요 부품 조달을 수직계열화하고, 양산성을 최대로 높여 저비용의 로켓 발사를 구현해 가고 있는 것이다. SpaceX사의 표현을 빌면, LA 남서쪽의 Hawthorne에 있는 본사에는 “원재료가 들어와서 로켓이 되어 나간다! (Materials in Rocket out!)”라고 말할 정도로 효율적인 운영 기술을 보여주고 있다. 저렴한 로켓이라 많은 사람들이 성공적인 발사에 대해 의구심을 가지고 바라보았지만, 지금까지 시험발사부터 44회 발사에 2015년 6월의 단 한번 실패만 있었으니 발사 성공률은 96.5%에 이른다. 2016년 9월 1일 발사대에서 연료 주입 중에 폭발사고가 있었지만 로켓 발사 실패가 아니라 발사 준비중의 실수로 판단된다.

어쨌건 이것도 실패로 포함하더라도 29회 중 2번 실패로 성공률은 93% 이상으로 준수한 수치이다. 천문학적인 국가의 예산지원을 받아 개발해온 지금까지의 로켓 개발사를 살펴보아도 시험발사부터 시작해서 이러한 대단한 성공률을 거둔 적은 거의 없었다는 것이다. 사실 NASA 당국자도 실토했었다. “만일 팰컨9을 NASA가 직접 주관해 개발했더라면 최소 36억 달러는 들었을 것”이라고 말이다.

SpaceX의 Elon Musk는 전 세계에 경제성 확보라는 대 명제 아래서 발상 전환을 이룬다면 발사체 사업에서도 개발비만이 아니라 대당 양산가도 드라마틱하게 낮출 수 있다는 것을 보였다. Elon Musk의 목표가 1회 발사비를 10분의 1로 낮추는 것이기 때문에 재사용 발사체 개발 등 비용을 낮추기 위한 노력을 현재에도 계속하고 있다. 게다가 우주태양광 발전 사업이 시작되면 대량의 발사체 수요가 있을 것이기에 발사체의 제작 단가를 줄일 수 있는 더 많은 요인이 생겨나 1회 발사비용을 현재의 10분의 1 이하로 줄이는 것도 충분히 가능한 일이라고 본다.

#### □ 대한민국의 저렴한 발사체 개발방안

우주태양광발전 구상의 경제성 확보를 위해서는 1회 발사 무게는 3~4배 증가 시키면서 발사비용은 현재의 10분의 1 정도로 감소시킬 수 있으면 가능하다고 본다. 예를 들어, 현재의 팰컨9의 1단보다 추력을 좀 증가시키고 2단 추력은 2배 정도 증가시키면 1회 탑재체 무게가 20톤 정도로 커질 수 있고 대량 생산 기술을 최대로 도입하면 양산 제작비가 크게 줄여질 수 있어 1회 발사비용이 최대 1000만 달러(즉, Kg당 500달러의 발사비) 정도로 충분히 내려갈 수 있을 것이고 그러면 우주태양광사업은 경제성을 확보할 수 있으리라고 본다.

가격경쟁력이 있는 발사비라는 면에서는 대한민국은 매우 유리한 위치에 있다고 필자는 생각한다. 현재 대한민국은 2조원의 예산을 들여 고유설계 발사체를 자체 개발하고 있다. 전 세계에서 상업용 발사체 개발에 국가적으로 거금을 투자하고 있는 거의 유일한 국가이다. 이러한 국가의 지원을 토대로 SpaceX의 발사체

---

제작비용, 감소 방안을 타산지석으로 삼아 우리의 발사체 개발 사업에 적용하면 충분한 경쟁력이 생길 것이다. 한국형발사체는 SpaceX사의 성공적인 팰컨 로켓과 아주 유사한 기술적 제원을 가지고 있다. 저렴한 소형 석유연료 로켓엔진을 기반으로 하여 1단에 여러 개 둑어 큰 추력을 달성하고 2단에도 같은 엔진을 사용함으로써 대량생산을 통한 가격의 저렴화가 가능한 설계구조다. 차이는 우리의 한 개 엔진추력이 SpaceX의 멜린(Merlin) 엔진 보다 좀 더 크다. 우리가 이 발사체를 설계 개발 단계에서부터 가격경쟁력이 있어야 한다는 절박한 당위성을 가지고 개발에 매진하여 너무 늦지 않은 시기에 완성한다면 대한민국이 우주기반 태양광 발전 사업에서의 발사체 공급의 주도적 국가도 될 수 있다는 논리이다.

우주기반 태양광발전 시스템 구축에는 매년 조 달러 단위의 투자가 필요하게 될 것이다. 그러나 이미 전 세계적으로 에너지 관련 연구 개발 투자로 매년 2조 달러 가까이 쓰고 있다는 사실을 상기하면 금액 자체는 큰 문제가 아닐 수 있다. 경제성과 당위성이 설득만 된다면 실제 투자가 충분히 가능하다는 얘기다.

미래에 우주태양광발전 시스템이 확보가 되면 현재 다른 에너지원을 사용하고 있는 분야들도 사용하기 편한 전기 에너지 사용으로 바뀌게 될 것이다. 난방, 취사, 자동차 등의 운송 수단들이 그 대표적인 분야다. 그러면 세계 전력에너지 시장은 5조, 10조 달러 이상으로 성장하게 될 것이고 이의 80~90%를 우주 태양광 발전으로 충당한다고 가정한다면 아마 오늘날의 전자, 자동차 산업과는 비교할 수도 없는 거대한 미래 산업 분야가 될 것이다. 아마도 세계 각국이 생존과 번영을 위해 각축을 벌이는 산업분야의 주요 접전지가 될 것이 아니겠는가?

#### □ 우주태양광 발전 시스템 관련 대한민국의 기술 경쟁력

이제 대한민국은 이 엄청난 미래의 세계에너지 시장에서 일익을 담당할 수 있도록 하기 위해서는 누구보다도 먼저 필요한 기술개발에 앞장설 준비를 해야 한다고 본다. 전 세계 초대형 석유메이저들과 강대국들이 선점해 버리면 우리의

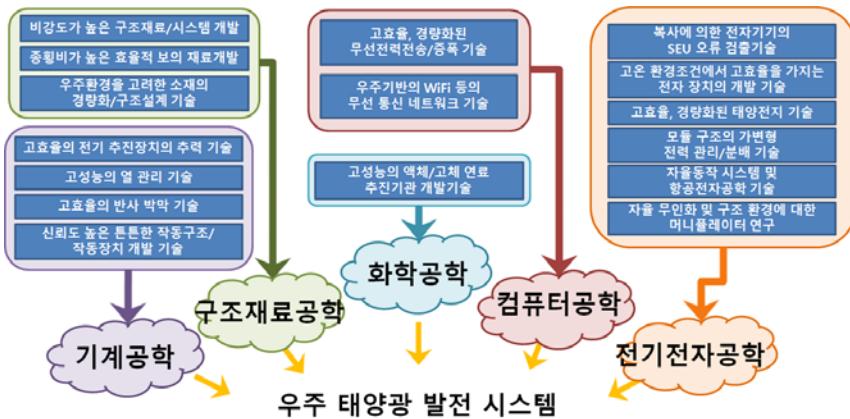
입지가 무척 좁아질 수 있다.

이 우주태양광발전 기술 확보는 어떻게 보면 우리 대한민국을 역사상 처음으로 무한대의 풍부한 에너지자원을 보유한 국가로 변화시킬 수 있다. 작은 크기의 나라에다 석유, 천연가스는 애당초 없고 석탄도 너무 깊은 곳에만 남아 있어 목숨 걸고 캐야 하는 상황이다. 좁은 국토라서 수차가 크지 않아 수력자원도 빈약한데다 지상태양광은 여름에는 장마로 하루 몇 시간 발전도 힘들어 시설비 건지기도 힘든 형편이다. 풍력 발전을 위한 바람도 지속적으로 적정한 설계 속도로 부는 곳이 별로 없어 설치해 놓은 풍력발전소들도 국가 지원 끊기면 지속적인 운영이 불가능하다. 그렇다고 다른 부존자원들이 풍부해서 국내에는 없는 에너지원을 충분히 사올 수 있는 것도 아니다. 뾰족한 부존자원도 없는데다가 식량 자급률마저도 형편없이 낮은 나라에서 이 많은 인구가 먹고 사느라 얼마나 허둥대며 살아왔는가? 이런 상황이니 우리 후대들의 미래 생존을 생각하면 항상 가슴이 답답하고 불안한 게 사실이다.

그래서 대한민국의 미래를 위해서라도 현재는 무주공산의 에너지원인 우주 태양광 발전의 가능성을 능동적으로 살펴봐야 한다. 우리가 우주에서 태양에너지를 가져올 수 있는 기술만 확보한다면 이 엄청난 잠재력을 가진 거대한 세계 에너지 산업 분야에서 주요한 플레이어가 될 수도 있다는 확신을 가질 수도 있다.

대한민국도 우주 태양광 발전 시스템을 위한 주요기술인 태양전지 기술, 무선 송신기술은 어느 정도 기반을 가지고 있다. 기존에 진행 중인 태양전지 고효율 기술 개발을 상용화, 실용화 관점에서 더욱 매진하면 세계정상 수준의 수직 계열화된 국내 태양전지 산업체와 합심해서 충분히 경쟁력 있게 될 것이다. 무선 전송기술 개발도 전송효율 개선을 위한 연구가 필요하다. 원거리 전송 효율을 높이기 위한 연구에 덧붙여 pilot위성을 통한 무선전송 시스템의 효율을 검증하는 등의 실용연구도 시작돼야 한다고 본다.

〈그림 8.2.6〉 우주항공기술만 아니라 전 분야의 필요기술들



지금 우리는 앞으로 다가올 우주태양광발전이라는 미래 비전에 국가 차원의 지원 계획을 세울 필요가 있다. 멀지 않은 미래에 적도의 공해상에서는 수백 척의 해상 로켓발사선이 하루에도 수백 번씩 우주로 발전위성 모듈들을 쏘아 올릴 것이다. 이를 위해선 매년 수십만 개의 저렴한 로켓엔진이 자동차엔진처럼 대량 생산되고 이를 토대로 저렴해진 발사비용에 힘입어 우주로 올려진 수많은 발전위성의 부품 모듈들이 우주에서 로봇기술을 이용하여 조립될 것이다. 전기, 전력 기술, 전자 IT기술, 기계기술, 정밀제어기술, 첨단재료기술, 로켓 발사선을 위한 조선기술, 그리고 이들을 집대성하는 우주기술 등이 새로운 세상의 주역을 활용되고, 이는 대한민국 그리고 전 세계에 수많은 일자리를 제공하게 될 것이다. 20~30년 후, 아니 더 빠르게는 10년 후에는 전 세계의 산업분야들이 우주 태양광 발전과 함께 가고 있을지도 모른다.

더욱이 우주태양광위성들이 본격적으로 정지궤도에 배치되기 시작하면 부가 경제적 활용도 충분히 가능할 것이다. 우선 정지궤도에 무한한 전원을 가진 거대한 크기의 위성이 올라가 있으므로 현재의 통신, 방송, 기상, 해양관측용 정지궤도 위성들의 임무를 완전히 대치할 수 있을 것이다. 더 나아가 훨씬 정밀하고 강력한 성능의 카메라를 크기, 무게에 큰 제약 없이 수용할 수 있어 현재의

대부분의 관측용 저궤도위성의 역할도 상시적으로도 수행할 수 있을 것이다. 그리고 장기적인 우주궤도 체류를 위한 우주호텔도 설치 가능해져 본격적인 우주 관광의 문이 활짝 열리게 될 것이고 우주탐사를 위한 전초 기지로도 활용될 수 있을 것이다.

이 우주태양에너지는 대한민국 역사상 처음으로, 우리가 지금부터 노력만 한다면, 무한대로 가질 수 있는 자원이다. 여기에는 국가 면적이 작다는 것도 전혀 문제가 되지 않는다. 이미 우주태양광산업의 기반이 되는 제반 기술도 어느 정도 수준에 올라와 있다 하지 않는가? 조금만 미리 미래를 향해 준비하고 움직인다면 세계적인 수준으로 도약할 수 있고, 어쩌면 우위를 점할 수도 있다.

**〈그림 8.2.7〉 우주태양광 발전위성 구상도**



에너지 문제는 한국뿐 아니라 당장 전 세계 누구에서도 가장 중요한 이슈다. 인류의 생존과 직결되는 문제이니까. 우리나라만 피하자고 한다고 피해질 수 있는 일도 아니다. 휴대폰, 자동차 등은 정 어려우면 없이도 살 수 있다. 그러나 에너지는 바로 생존이기에 포기하는 것은 바로 죽음을 의미하는 것일지도 모른다. 그러기에 한국인의 장점을 살려 우리는 이런 미래 상황에 능동적으로 대처해 나가자는 것이다. 50년, 100년 뒤의 한국의 미래를 위해서라도 미래의 기술을 선도할 필요가 있다. 우주 기반태양광발전이 결코 먼 미래의 이야기는 아니기 때문이다.

---

### 부록 3. IEA<sup>21)</sup>의 재생에너지 보급정책(OECD/IEA(2014))

#### □ 개요

- 재생 에너지의 보급 확대를 위해서는 재생에너지 비용감소와 출력변동성 극복이 우선적으로 해결되어야 할 중요한 과제, 재생에너지를 주도하고 있는 풍력과 태양광의 발전단가는 점차적으로 감소하고 있으며 풍력발전 단가의 경우 화력 발전과 거의 같거나 그 이하로 수준
- 최근에는 세계적으로 우수한 재생에너지발전기가 건설되고 있음
  - 미국의 경우 감세에도 불구하고 풍력 발전량은 kWh당 2.5~3센트, 태양광도 4~6센트 대에서 장기 계약을 맺은 사업이 등장
  - 독일은 소매가가 높은 지역에서는 지붕 태양광의 발전비가 전기요금보다 낮은 지역이 등장
- 태양광이나 풍력은 기후에 따라 출력이 변동하기 때문에 이에 대한 백업 발전기 건설 등으로 국가별 또는 전력시스템 단위별로 보급 한계가 존재
  - EU의 경우 2020년에 30%, 2030년에 45%의 재생에너지 확대목표

#### □ 재생 에너지 보급정책(IEA)

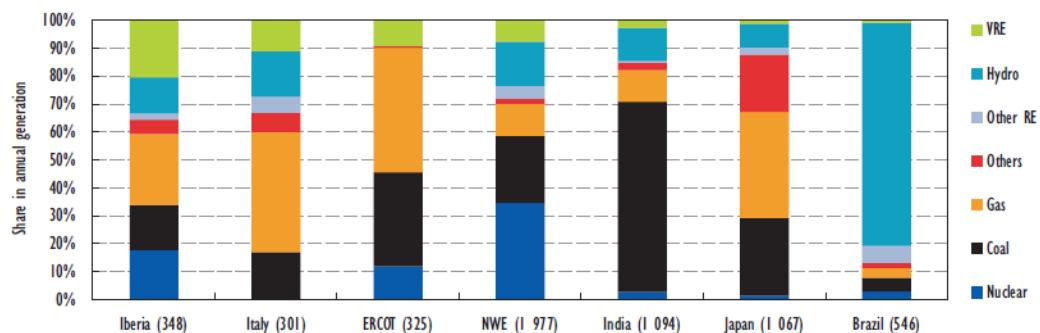
- 2014년 IEA는 국가별 재생에너지 보급에 따른 경제적 기술적 영향을 조사 분석하여 발표
  - 장기적인 관점에서 적절한 조치가 취해지면 재생에너지를 45%까지 보급 가능할 것으로 전망
- IEA는 세계 15개 주요 국가를 7개 영역으로 나누고, IEA의 세계 장기에너지 예측(WEO 2013)을 이용하여 국가별 현황을 분석

---

21) 국제에너지기구(International Energy Agency)

- 7개 지역: 북동유럽(NWE: 독일, 프랑스, 덴마크, 영국, 아일랜드, 덴마크, 노르웨이, 스웨덴, 핀란드), 이베리아 반도(스페인, 포르투갈), 이탈리아, 미국 텍사스, 브라질, 인도, 동일본(도쿄, 토호쿠, 홍카이도)
- 재생에너지는 안정적으로 전기를 생성하는 에너지와 변화하는 에너지로 구분
  - 전자는 유입형 수력 발전소, 지열 발전소, 바이오매스 등이며 후자는 풍력 및 태양광이 대표적
  - IEA에서는 후자를 변동형 재생에너지(VRE<sup>22</sup>)로 정의하고 이에 대한 영향 분석
- <그림 8.3.1>은 7개 국가별로 VRE를 포함한 전원별 발전량 구성을 나타내고 있음
  - VRE 발전량 비중을 보면 이베리아가 약 20%로 가장 높고 이어서 이탈리아 → ERCOT → NWE 순임

<그림 8.3.1> 국가별 2012년 발전량 점유율 비교(OECD/IEA(2014))

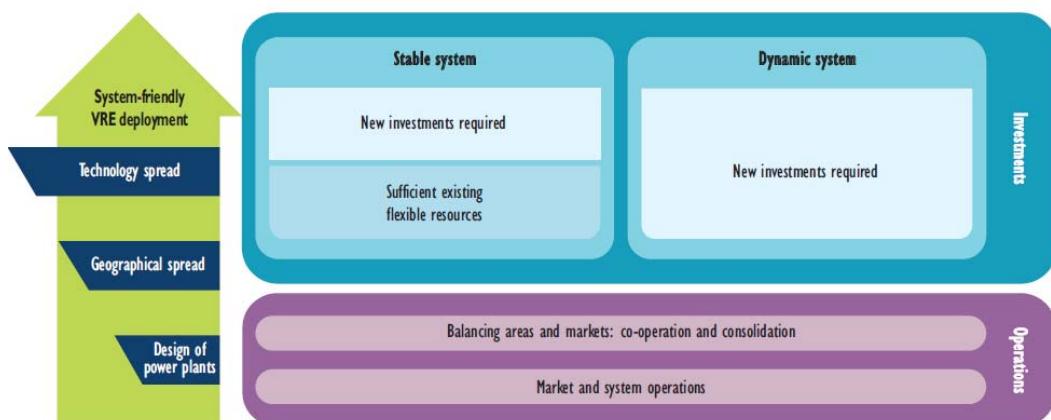


\* 주: RE=Renewable energy, ( )내 숫자는 발전량(TWh)

22) Variable Renewables Energy

- 시스템 비용증가를 최소화하면서 VRE 보급을 최대화하기 위한 핵심사항으로 IEA 보고서에서는 <그림 8.3.2>와 같이 세 가지 기술의 축, 즉 ① 전력시스템 특성을 고려한 재생 에너지 최적배치, ② 전력계통 운영 기술고도화, ③ 유연한 에너지 자원의 적기 확보를 제시

<그림 8.3.2> 재생에너지 확대를 위한 인프라 개선요소(OECD/IEA(2014))



- ①, ②는 비교적 단기간에 추진할 수 있는 영역인 반면 ③은 다소 시간을 요하는 영역
- 제1축: 시스템 친화적인 재생 에너지 배치
  - 재생 에너지의 설치 및 배치방식에 따라 계통구성 및 관련비용은 크게 달라질 수 있음
  - VRE는 전력계통을 운용을 복잡하고 어렵게 할 수도 있지만 다음과 같이 이를 긍정적으로 적절히 관리하면 전력계통 운용에 기여 가능
    - 1) 설치시기: 인프라 건설 일정에 맞추어 건설함으로써 총 비용 최소화
    - 2) 위치와 재생 에너지 믹스: 최소비용의 재생 에너지를 단순히 자연조건을 고려하여 선택하고 설치하는 것만으로는 불충분
      - \* 공급용량이 충분하지 않은 지역에 설치하면 보다 큰 가치발휘

- \* 계통연계를 반영한 전체 비용판단이 중요
- \* 지붕 태양열은 일반적으로 대규모 발전소보다 원가 부담이 높지만 시스템 용량이 큰 도시 지붕에서는 장거리 송전선로 건설과 관련된 발전소 규모사업보다 전체비용에서 효과적일 수 있음
- \* 풍력과 태양광이 상호 보완적인 지역에서는 단일 효율이 좋지 않을지라도 두 가지를 모두 설치하면 효과적일수도 있음

### 3) 재생 에너지 기술의 새로운 활용: 자체 조정 기능 활용

- \* 최근의 풍력 및 태양광 시스템은 단시간의 수급변동이나 전압변동을 안정화시키는 기능을 갖고 있음
- \* 종래는 이러한 기능을 기존 설비에 의존하기 때문에 재생 에너지가 늘어나면 그만큼 비용을 필요로 한다는 생각이 일반적, 그러나 안정화 기능을 제대로 평가하는 시스템을 갖추고 적절히 운용되는 관련비용은 줄어들 전망

### 4) 시스템에 적합한 설계

- \* 기존 전력시스템과 효과적으로 조화되어 운전되는 개념의 새로운 성능을 가진 재생에너지 설비들이 등장
- \* 적당한 바람으로도 전기를 생산하는 긴 날개 풍차, 태양의 고도에 따라 패널의 기울기를 조정하는 태양광발전, 모듈용량과 인버터 용량 간의 비율을 조정하는 태양광이 등장
- \* 상기와 같은 기능을 가진 재생전원들은 출력변동을 최소화하고 전력설비로서의 가치를 제고

### 5) 운전정지: 수요가 낮은데 바람과 햇빛이 강한 경우 또는 출력변동이 너무 클 경우는 풍력과 태양광 전원은 운전을 정지(무리하게 운전할 경우 이에 대응한 고가의 조정력 확보로 인하여 비용 부담이 커짐)

- 
- 제2축: 전력시스템 운용개선
    - 기존 전력시스템을 이용하여 가능한 낮은 비용으로 VRE의 변동을 조정 할 수 있다면 가장 바람직
    - 전력시스템 운영은 시시각각으로 변하는 수요에 맞춰 공급력을 조절하는 것으로써 주파수 및 전압을 일정 범위내로 유지하는 것이 주요목표
    - 지역적으로 편재되어 있는 재생에너지의 출력이 변동하는 경우 송배 전망의 전력변동은 점차 증가하게 되며 이에 대한 합리적 감시 및 제어가 매우 중요
    - 재생 에너지 확대를 위해서는 계통운영 시스템의 개선이 필수적
      - 1) 스페인은 재생 에너지의 운영을 예측(즉, 날씨를 예측)하는 시스템을 구축하고 기존 시스템과 연계운전
      - 2) 독일은 전국을 4개의 조정영역(주파수 매칭 범위)나누어 4개의 송전 회사가 담당, 전국적으로 조정하기 위해 4개 업체가 협조하는 구조 체계 구축, VRE가 증가하더라도 일정한 예비전력 유지가능
  - 제3축: 유연한 에너지 자원의(flexible resources) 적기 확보
    - VRE의 점유율을 높이려면 변동을 조정할 수 있는 설비(유연자원)의 장기적 투자가 필수
    - 유연자원으로는 화력 및 수력(양수포함) 등과 같은 기존의 발전설비 외에도 이를 이용하기 위한 송배전망 설비(인프라 설비), 단기 및 장기간 충·방전이 가능한 축전지가 대표적. 또한, 수요측면의 수요반응 자원들도 유연성자원으로 활용이 가능
    - DSI(Demand Side Integration: 수요측 조정): 수요 측에 설치된 조정 설비로서, 특히, 분산형 열저장 시설의 경우 다른 옵션에 비해 비용효율성이 뛰어나며 매우 유망, 그러나 실제 생활에서 제대로 작동할 것인지는 불확실

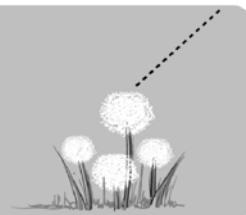
- 대규모 축전지(Storage)

- 1) 단기 및 장기적으로 비교적 넓은 범위의 변동을 효율적으로 조정할 수 있는 우수한 기능을 가짐
- 2) 비용 대비 효과 면에서는 기존의 저수식 수력 발전에 양수 발전기를 증설하는 것이 가장 유망한 방법임
- 3) 대규모 축전지(배터리)는 현재 가격이 고가이나 상황에 따라 탄력적으로 설치할 수 있는 장점이 있으며, 기술 혁신으로 인한 기능 개선 및 가격 하락이 기대됨

- 광역계통 연계(Interconnection): 지역간 계통을 상호 연계하는 것으로서 분산형 전원을 보다 효율적으로 사용할 수 있고 대규모 저장장치와 DSI 간의 시너지 효과를 얻을 수 있음
- 기존 발전설비(Existing Power Plant) : 기존의 발전설비 개선을 통하여 조정능력을 높이는 것도 강력한 조정수단 중 하나로서 경우에 따라 비용 대비 효과에 차이가 날 수 있음

# IX

## WASP모형의 설명



### 1. 기존발전설비모형(FIXSYS)

- 기존발전설비모형(FIXSYS: Fixed System Module)은 발전설비획장계획 기간 초기의 기존 발전기에 관한 정보, 계획기간 동안 건설계획이 확정되어 있거나 또는 건설 중인 발전기에 관한 정보를 입력시키는 프로그램
- 이 프로그램에서는 각 발전기를 유형 별로 분류하고, 용량(MW), 대수, 연료비, 열소비율, 고장정지율, 예방정비 소요일수 등을 입력함
- 계획기간의 초기에 존재하는 발전기는 이 프로그램에서 입력되며 최대 100 개의 발전소를 대상으로 할 수 있음
- 취급 가능한 발전기의 유형은 원자력발전, 화력발전, 가스터빈, 수력발전, 양수발전 등임
- 화력발전기는 사용하는 연료 별로 나누어짐
- 확률적 운용비 계산 프로그램(MERSIM)에서 순동예비력을 고려한 운용비의 변화를 고려하기 위하여 화력발전기의 용량을 기저블록과 부하추종블록으로 구분하여 고려할 수 있음
- 이 자료는 운용비계산을 할 때에 순동예비력을 고려하여 발전기의 투입 순위를 조정하고 비용의 변화를 반영하는 데에 이용됨
- 각각의 블록 별로 열소비율이 주어짐

- 기저부하 열소비율은 기저부하로 운전할 때에 적용되며, 평균증분열소비율은 부하추종블록에서 사용되는 열소비율임
- 수력발전기는 계산대상기간 별로 저수지 용량으로 인한 발전량의 제약이 있어 각 발전기 별로 시뮬레이션 하는 것이 이론 상 어려우므로 1개의 가상발전기로 묶어서 취급함
- WASP는 1개의 에너지저장 발전기(양수발전기)를 고려할 수 있음
- 계획년도 초기에 여러 개의 양수발전기가 있다면, 이들을 합하여 하나의 양수발전기로 정의함
- 이미 건설이 확정된 발전기의 계획 및 수명기간이 다른 발전기의 폐지에 관한 자료는 FIXSYS에 입력됨

## 2. 후보발전기모형(VARSYS)

- 후보발전기 프로그램(VARSYS: Variable System Program)은 발전설비화장 계획의 후보로 되는 발전기에 대한 입력데이터를 작성하는 프로그램임
- 후보발전기의 입력데이터는 FIXSYS 프로그램의 입력데이터와 같음
- 각종 후보발전기(후보 종류는 20개가 최대)에 관한 자료는 비록 각종 후보의 자료가 FIXSYS에 입력된 자료와 같더라도 모두 기록되어야 함
- 만약 수력발전기 및 양수발전기와 같은 후보발전기가 추가되면, 이들은 기존 합성발전기와 합쳐져서 하나의 발전기로 취급됨
- 수력발전기 및 양수발전기는 다른 발전유형보다 발전량 및 출력에 제약을 받으므로 각 발전기 별로 용량의 계절별 지수 및 발전량의 계절 별 지수를 명시해 주어야 함

- 
- 후보발전기의 갯수는 최대 20임
  - 양수 발전기의 건설시기는 최적화 프로그램에 의하여 결정될 수 있는데 미리 정해진 순서 내에서 발전설비획장계획에 고려되어야 함
  - 계획기간의 종료년도에서 후보발전기의 수명이 남아 있는 부분에 대한 부분의 건설비는 잔존가치로서 회수되는 것으로 함

### 3. 후보발전기 조합 모형

(CONGEN: Expansion Configuration Generator Program)

- 이 프로그램은 계획기간 중에 년도 별, 후보발전기 별로 존재 대수를 나타내는 후보발전기조합을 작성하여, 운용비계산 모형에 사용하도록 하는 프로그램임
- 후보발전기조합은 동적계획법에서 하나의 state에 해당함
- 운용비계산 모형에서는 기존 발전설비와 후보발전기조합에서 주어진 후보 발전기를 합하여 운용비 및 신뢰도를 계산함. 예로서, 후보발전기조합을 작성하여 보면 다음과 같음
- FIXSYS에서 만들어진 기존 발전설비 용량을 B(MW)라 하고, VARSYS에 정의된 후보발전기로서 1000MW 원자력(N), 500MW 석탄화력(C), 100MW 가스터빈(P)이 있다고 함
- <표 8.3.1>에는 B(MW)와 (B+ 2000)MW 사이의 74 개의 가능한 후보발전기 조합이 열거되어 있음
- 만약 더 많은 예비력 또는 더 많은 후보발전기가 고려된다면 가능한 후보발전기조합의 수는 대단히 많아질 것임

〈표 8.3.1〉 후보발전기조합의 예

용량 (MW)	용량 별 가능한 후보발전기조합			
B	B			
B+ 100	B+P			
B+ 200	B+2P			
B+ 300	B+3P			
B+ 400	B+4P			
B+ 500	B+5P	B+C		
B+ 600	B+6P	B+C+P		
B+ 700	B+7P	B+C+2P		
B+ 800	B+8P	B+C+3P		
B+ 900	B+9P	B+C+4P		
B+ 1000	B+10P	B+C+5P	B+2C	B+N
B+ 1100	B+11P	B+C+6P	B+2C+P	B+N+P
B+ 1200	B+12P	B+C+7P	B+2C+2P	B+N+2P
B+ 1300	B+13P	B+C+8P	B+2C+3P	B+N+3P
B+ 1400	B+14P	B+C+9P	B+2C+4P	B+N+4P
B+ 1500	B+15P	B+C+10P	B+2C+5P	B+N+5P B+3C B+C+N
B+ 1600	B+16P	B+C+11P	B+2C+6P	B+N+6P B+3V+P B+C+N+P
B+ 1700	B+17P	B+C+12P	B+2C+7P	B+N+7P B+3V+2P B+C+N+2P
B+ 1800	B+18P	B+C+13P	B+2C+8P	B+N+8P B+3V+3P B+C+N+3P
B+ 1900	B+19P	B+C+14P	B+2C+9P	B+N+9P B+3V+4P B+C+N+4P
B+ 2000	B+20P	B+C+15P	B+2C+10P	B+N+10P B+3V+5P B+C+N+5P B+4C B+2C+N B+2N

- 만약 〈표 8.3.1〉에서 가능한 시설용량 범위를 B+500과 B+1500으로 정하면 가능한 후보발전기조합의 갯수는 74에서 36으로 줄어듦
- 또한 사용자는 한 년도의 어떤 종류의 후보발전기의 변화폭(tunnel width)을 축소하여 한 년도 내의 후보발전기조합의 수를 줄일 수 있음
- 이것은 “tunnel”이라는 입력 데이터를 지정함으로써 가능함
- 수요를 만족시키는 데 있어서 발전계통의 신뢰도는 각 발전기의 용량 및 고장정지율의 함수임
- 이것을 고려한 신뢰도는 MERSIM에서 계산되지만, 미리 년도 별 후보발전기조합의 갯수를 제한하기 위하여 CONGEN은 사용자가 최소 및 최대 예비율을 지정하도록 하고 있음
- CONGEN의 사용자는 예비율이 가장 낮은 기간의 예비율 상한에 제한을 주어야 함

- 
- 이것은 어떤 년도의 가능한 건설계획을 위한 후보발전기조합을 결정하는데 있어서의 제약조건이 됨
  - 이 제약조건에서 벗어나는 후보발전기조합들은 CONGEN 프로그램에서 제외됨
  - 최적화 프로그램(DYNPRO)의 결과는 CONGEN의 입력을 조정하여 다음의 최적화를 할 수 있도록 함
  - 이것을 위하여 tunnel의 크기는 2로 하는 것이 편리함
  - 또한, 사용자가 첨두부하용 발전기 4대 이하, 석탄화력 2대 이하, 원자력 1대 이하로 어떤 년도의 후보발전기의 존재 대수를 유지하는 것이 바람직하다고 생각하면 이에 대한 제약조건을 줄 수 있으며, 이 경우에 CONGEN 프로그램에서는 이 범위를 벗어나는 후보발전기조합은 제외함
  - 년도 별, 유형 별로 가능한 최대 존재댓수와 예비율을 조정하면 가능한 상태(state)의 수는 다음 <표 8.3.2>과 같이 16 개로 줄어듦
  - 사용자는 또한 후보발전기 별 발전기의 존재 대수를 지정할 수 있음
  - 만약 사용자가 원하는 갯수의 후보발전기가 존재하지 않는 후보발전기조합을 제외시킬 수도 있음
  - 이것은 <표 8.3.2>에서 석탄화력을 포함하지 않은 5 개의 후보발전기조합을 제외시킨 경우이며, 이때에 가능한 후보발전기조합은 11개로 됨
  - 요약하면, CONGEN 프로그램은 최적화 프로그램에서 최적 경로를 찾아내는데 필요한 후보발전기조합들에 대하여 사용자로 하여금 제약을 가할 수 있도록 하고 있음

- 이러한 제약을 가함으로써 계산시간이 많이 소요되는 확률적 시뮬레이션의 대상 개수를 줄이고 발전설비확장계획에 있어서 타당하지 않은 스테이트를 제외함

〈표 8.3.2〉 유형 별 누적대수 제한 시의 후보발전기조합

용량(MW)	후보발전기조합	
B+500	B+C	
B+600	B+C+P	
B+700	B+C+2P	
B+800	B+C+3P	
B+900	B+C+4P	
B+1000	B+2C	B+N
B+1100	B+2C+P	B+N+P
B+1200	B+2C+2P	B+N+2P
B+1300	B+2C+3P	B+N+3P
B+1400	B+2C+4P	B+N+4P
B+1500		B+C+N

〈표 8.3.3〉 CONGEN 입력자료의 예시

입력자료	설명
2	index-2 : 최소 존재대수 지정
3 2 0 0 3 0 1 8	후보발전기의 년도 별 최소 존재대수 (VARSYS 후보발전기의 입력 순서와 같음)
3	인덱스-3 : Tunnel
0 0 0 2 2 2 2 0	년도 별 존재 댓수의 범위(width)를 나타나는 수 (VARSYS 후보발전기의 입력 순서와 같음)
1 End of Year 2017	인덱스-1 : 해당 년도의 자료가 끝남을 알림

- 
- <표 8.3.3>과 같이 입력되었다면 MERSIM에서 시뮬레이션해야 할 총 후보발전기조합의 수는 81개( $=3\times3\times3\times3$ )임
  - Tunnel은 존재댓수의 하한치에 추가로 더하여 후보발전기의 존재 댓글수를 작성할 범위 즉, 존재 댓글수에서 상한 존재댓수까지의 폭을 결정하는 요소임
  - 따라서 후보발전기조합은 존재댓수를 기준으로 하여 상한까지 tunnel의 범위 내에서 생성됨
  - 네 번째 후보발전기부터 일곱 번째 후보발전기까지 tunnel은 2이므로, 3 가지 상태(최소존재댓수, 1 대 더 존재하는 상태, 2 대 더 존재하는 상태)가 존재하므로 34 개만큼의 후보발전기조합이 생성됨
  - 최소존재댓수는 당해년도에 발전계통에 존재하는 댓글수의 하한치를 말하는 것임
  - 그런데, WASP가 검토하는 후보발전기조합의 갯수가 제한되어 있는 점을 감안할 때, tunnel을 너무 크게 지정할 수 없고(보통, 2를 사용함), 또한 최소존재댓수 이하의 영역도 후보발전기조합 작성범위에서 제외되므로 결국 WASP가 한 번에 찾아내는 해는 국부적 최적해(local optimum)임

#### 4. 운용비 및 신뢰도 평가모형 프로그램(MERSIM)

- 운용비 및 신뢰도 평가모형(MERSIM: Merge and Simulate Module)의 주요 기능은 CONGEN에서 만들어진 년도 별 후보발전기조합에 대하여 운용비 및 공급신뢰도를 계산하는 프로그램임
- 운용비의 계산에 앞서, 년도의 각 운용비계산 기간 별로 발전기 예방정비용량에 해당하는 출력을 감소하기 위해서는 예방정비계획이 운용비 및 신뢰도 평가 앞 단계에서 결정되어야 함

- 발전기 예방정비계획은 비용 계산 및 신뢰도계산에 영향을 미치므로 무시할 수 없음
- 그리고 MERSIM에서는 이전의 WASP 프로그램(LOADSY, FIXSYS, VARSYS, CONGEN)에서 작성된 파일들을 읽어 확률적 시뮬레이션을 하기 위한 자료를 준비함

## 5. 최적화 프로그램(DYNPRO)

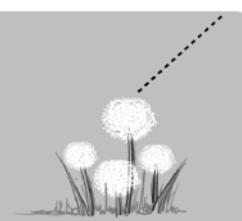
- 최적화 프로그램의 목적은 최적 발전설비확장계획을 찾아내는 것임
- 최적 경로를 찾기 위하여 년도의 state마다 여기에 도달하기 위한 운용비와 투자비의 현가를 계산하고 최적경로를 동적계획법에 의하여 찾아냄
- DYNPRO 프로그램의 출력을 검토한 다음에 CONGEN의 입력 자료를 수정한 다음에 새로 생성된 후보발전기조합을 포함하여 시스템운용비계산을 하고 DYNPRO를 다시 실행하여 최적경로를 찾음
- MERSIM에서 도출된 LOLP는 DYNPRO 프로그램에서 최적경로를 찾아갈 때 신뢰도 제약을 만족하지 못하는 state를 제외시키는 데에 이용됨
- DYNPRO 프로그램을 실행하면 최적경로를 검토하여 다음의 최적화를 위한 CONGEN의 수정 방향을 알려줌
- DYNPRO의 결과에서 하한값을 상향 또는 하향 조정하라는 메시지를 출력함
- 이 메시지에 따라 운용자는 CONGEN의 최소 존재대수를 수정하여 메시지가 더 이상 발생되지 않을 때까지 반복하여 수정 실행하여야 함

- 
- 5번째 발전기의 경우, DYNPRO를 실행하여 최적경로를 찾았을 때, 3, 4, 5 가운데 하나의 존재댓수가 최적경로에 포함될 수 있으며, 3이 나오면 CONGEN에서 2로 고치고 5가 나오면 최소존재댓수 3을 4로 고쳐서 다시 MERSIM과 DYNPRO를 실행함
  - 4가 나온다면 이것은 경계선에 부딪치지 않은 것으로 하여 CONGEN에서 이 후보발전기의 최소존재댓수를 수정하지 않음
  - 이와 같이 하면 목적함수의 값이 계속 감소하며 경계선에 부딪쳤다는 메시지가 없어지면 작업을 종료함
  - tunnel을 2로 하면 후보발전기조합을 많이 생성하지 않고서도 최적경로에 부딪치는지를 판별할 수 있으므로 2를 사용하는 것을 권장함
  - 그런데, 위의 과정은 반복이 요구되는 작업으로서 WASP 실행시간의 대부분을 차지함
  - 따라서 WASP를 효율적으로 운용하기 위해서는 후보발전기조합의 생성범위가 어느 영역에서 시작되도록 할 것인지를 WASP 운용자의 경험적 판단에 따라 설비예비력의 범위를 적절히 조정하여야 함<sup>23)</sup>
  - LOADSY, FIXSYS, VARSYS는 CONGEN, MERSIM, DYNPRO를 실행하기 위한 예비작업이라고 볼 수 있으며 DYNPRO 실행 후의 출력물을 검토하여 최적화를 더 이상 진행할 것인가 종료할 것인가를 판단함

---

23) EGEAS 모형은 선형계획법 또는 Generalized Benders Decomposition을 이용하여 초기해를 구한 다음, 동적계획법을 시작함. WASP 모형은 CONGEN을 이용하여 사용자가 넌도 별 후보발전기조합을 작성하여 확률적 시뮬레이션을 실행하고 동적계획법에 의하여 최적계획을 찾은 다음에 출력물을 검토하여 다시 CONGEN 모형의 입력자료를 수정하여 실행하도록 함

## 참고문헌



- 김남일(2017). “에너지정책과 전력수급”.
- 송승호(2017). 대규모 풍력발전을 위한 계통연계 워크샵 2017 WTW Report.
- 에너지공단(2016). 2016 신·재생에너지 백서.
- 한전경제경영연구원(2017). KEMRI 전력경제 REVIEW, 2017년 제18호.
- 한국에너지경제연구원(2016-17). 각종 에너지 관련 보고서 및 통계 연-월보 각호.
- 한전전력연구원(2017). “국내 신재생 최적개발 시나리오 수립연구”.
- ADEME(2016). Climat, Air et Energie.
- Bebic, J.(2008). “Power System Planning: Emerging Practices Suitable for Evaluating the Impact of High-Penetration Photovoltaics,” NREL/SR-581- 42297.
- British Petroleum(2016). Statistical Review of World Energy.
- Cochran, Jaquelin et al.(2014). “Flexibility in 21st Century Power Systems”, NREL/TP-6A20-61721.
- EPRI(2017). “Operational Simulation Tools and Long Term Strategic Planning for High Penetrations of PV in the Southeastern United States”, Final Report.
- EWEA(2013). TWENTIES project Final report.
- IMF(2017). Working Paper on “Riding Energy transition”.
- Jones, Lawrence E.(2017). “Renewable Energy Integration Practical Management of Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids”, Second Edition, Academic Press.

- 
- OECD/IEA(2014). “The Power of transformation, Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems”.
- OECD/IEA(2016). World Energy Outlook.
- OECD/IEA(2017). World Energy Access Report.
- OECD/IEA(2017). World Renewable Energy.
- OECD/IEA(2017). “電力市場の リパワリング(日本語版)”.
- Paul Denholm, Matthew O’Connell, Gregory Brinkman, and Jennie Jorgenson (2015), “Over Generation from Solar Energy in California: A Field Guide to the Duck Chart”, NREL/TP-6A20-65023.
- Smith, J. Charles(2016). “Renewable Resource Integration”, CEE Symposium with NEDO, October 19, 2016 Tokyo, Japan.
- U.S. Energy Information Administration(2016). International Energy Outlook.
- World Energy Council(2016). World Energy Industry.
- Yabe, Akira et al.(2016). “Grid Integration Strategy for Variable Renewable Energy Highly Penetrated Energy System - Japanese Case”, 25th CEE Symposium with NEDO, October 19th, 2016.
- 省エネルギー・新エネルギー部(平成29年). “再生可能エネルギーの大量導入時代における政策課題)について”.

한국과학기술한림원에서는 다음과 같은 정책자료를 발간하고 있습니다.

- 한림연구보고서(KAST Research Report)
- 한림원탁토론회 기록집(KAST Roundtable Discussion)
- 한림원의 목소리(Voice of the KAST)

## 한림연구보고서

### 원자력발전과 신-재생발전의 공생전략

A Study on the Win-Win Strategy Scheme for the  
Energy Transition In Korea

– With a Special Attention on Nuclear Power and NRSE  
(New and Renewable Source of Energy) –

**발 행 일** 2017년 12월 8일

**발 행 처** 한국과학기술한림원

**발 행 인** 이명철

전화 031) 726-7900

팩스 031) 726-7909

홈페이지 <http://www.kast.or.kr>

E-mail [kast@kast.or.kr](mailto:kast@kast.or.kr)

**편 집** (주)범신사

**인쇄** (주)범신사

ISBN 979-11-86795-21-7

ISBN 978-89-88706-06-0 (세트)

- 이 책의 저작권은 한국과학기술한림원에 있습니다.
- 한국과학기술한림원의 동의없이 내용의 일부를 인용하거나 발췌하는 것을 금합니다.





**KAST** 한국과학기술인협회  
The Korean Academy of Science and Technology

[13630] 경기도 성남시 분당구 둘마로 42 (구미동)  
Tel: (031)726-7900 Fax: (031)726-7909

E-mail: [kast@kast.or.kr](mailto:kast@kast.or.kr)  
Website: [www.kast.or.kr](http://www.kast.or.kr)

본 사업은 과학기술진흥기금 및 복권기금으로 지원되고 있습니다.



9 791186 795217  
ISBN 979-11-86795-21-7  
ISBN 978-89-88706-06-0(세트)

