

# KEMRI 전력경제 REVIEW

2020년 제11호  
2020. 11. 2

## ▶ Research Issue

1. 해외 주요국의 변동성 재생에너지 수용비용 비교
2. 계통 복원력(Grid Resilience) 관련 미국 정책동향과 국내 현황 검토

## ▶ Research Activities

- ❄️ 균등화발전비용(LCOE) 국제 동향
- ❄️ 영국의 계통 안정도 제고를 위한 프로젝트 진행 현황
- ❄️ 재생에너지 증가에 따른 Virtual Power Lines의 추진 동향
- ❄️ 미국 대선결과에 따른 에너지기후변화 정책의 영향

## ▶ Research News

- ❄️ 경영도서 요약 : 신도 주사위 놀이를 한다

## 【 Highlight 】

### 1. 해외 주요국의 변동성 재생에너지 수용비용 비교

- 재생에너지 보급 확대가 전력망에 미치는 영향에 관해 많은 연구가 이루어지고 있으며 최근 유럽과 북미를 중심으로 재생에너지 수용비용 및 System LCOE 산정사례 증가
- 수용비용은 변동성 재생에너지(태양광, 풍력)의 시장·계통 영향을 비용화하여 발전량 당 단가(원/kWh)로 환산한 개념
  - 재생에너지 설비를 전력망에 접속시키고, 발전한 전기에너지를 고객에게 전달·이용하는 과정에서 발생하는 비용
  - System LCOE는 기존 LCOE와 수용비용의 합으로 정의
- 주요 기관의 수용비용 산정 결과 : 태양광 11~97원/kWh, 육상풍력 17~74원/kWh
  - 수용비용은 국가별 계통 운영조건 및 재생에너지 발전량 비중 등에 따라 다양함
  - 대부분 연구 결과에서, 태양광이 육상풍력보다 수용비용이 높으며, 주요 원인은 덕 커브 현상 대응을 위한 백업 비용 및 배전설비 보강 비용에 기인

### 2. 계통 복원력(Grid Resilience) 관련 미국 정책동향과 국내 현황 검토

- 최근 미국은 기후환경 변화로 인한 재해·재난의 증가와 이에 따른 전력산업 피해에 대응하기 위하여 이해관계자들을 중심으로 계통 복원력에 대한 논의를 진행
  - (에너지부) 전력산업 연구기관의 복원력 가치평가 및 투자에 대한 연구비 지원
  - (연방에너지규제위원회) 계통운영자와 협업을 통해 복원력의 개념 정의, 향상방안 등 논의
  - (북미신뢰도위원회) 전력계통 안정성을 평가하는 신뢰도 기준에 복원력 개념 고려·관리
  - (주 정부) 복원력 로드맵 등의 규제 정책을 마련하여 복원력 향상 노력
  - (유틸리티) 공급 측면의 연료 확보 및 보안·재난 대응전략을 수립하고, 복원력 향상을 위한 기업 차원의 지속적인 실증 투자 등을 계획
- 우리나라는 재해·재난에 대한 대응방안으로써 전력관제 체계 및 재해 예측을 시행하고 있으나, 복원력에 대한 논의는 미흡한 상황으로 복원력에 대한 연구를 본격적으로 진행해야 할 필요성 존재

# 【 목 차 】

## Research Issue

### ■ 해외 주요국의 변동성 재생에너지 수용비용 비교

- 정지홍 책임연구원, 이순정 선임연구원, 문국현 선임연구원

I. 검토 배경 .....	1
II. 수용비용 개념 .....	2
III. 주요 기관 산정사례 .....	3
IV. 산정 결과 비교 .....	7
V. 결론 및 시사점 .....	8

### ■ 계통 복원력(Grid Resilience) 관련 미국 정책동향과 국내 현황 검토

- 조호진 인턴연구원

I. 검토 배경 .....	10
II. 계통 복원력(Grid Resilience) 정의 .....	12
III. 복원력 향상을 위한 미국의 기관별 동향 .....	13
IV. 국내 복원력 대응현황 .....	19
V. 결론 및 시사점 .....	23

## Research Activities

### ■ 균등화발전비용(LCOE) 국제 동향 .....

- 김범규 선임연구원

### ■ 영국의 계통 안정도 제고를 위한 프로젝트 진행 현황 .....

- 김종인 일반연구원

### ■ 재생에너지 증가에 따른 Virtual Power Lines의 추진 동향 .....

- 황재홍 일반연구원

### ■ 미국 대선결과에 따른 에너지기후변화 정책의 영향 .....

- 이슬아 선임연구원, 홍혜빈 일반연구원

## Research News

### ■ 경영도서 요약 : 신도 주사위 놀이를 한다 .....

- 정진영 일반연구원

## Issue 1 : 해외 주요국의 변동성 재생에너지 수용비용 비교

### I. 검토 배경

- 주요국에서는 안전하고 깨끗한 에너지 공급체계로의 전환을 위해 태양광과 풍력 등 재생에너지 비중을 확대하는 추세
  - 변동성 재생에너지의 출력 특성(예측·제어 불가, 높은 출력 변동)과 분산적 입지 특성은 전력망에 부정적 영향 및 추가 비용을 야기
- 재생에너지 보급 확대에 따른 전력망 영향에 대한 인식 증가로 최근 유럽과 북미를 중심으로 수용비용 및 System LCOE 산정사례 증가
  - 발전원 간 경제성 비교를 위해, 변동성 재생에너지의 전력망 영향을 고려한 수용비용 (Integration Cost) 검토 필요

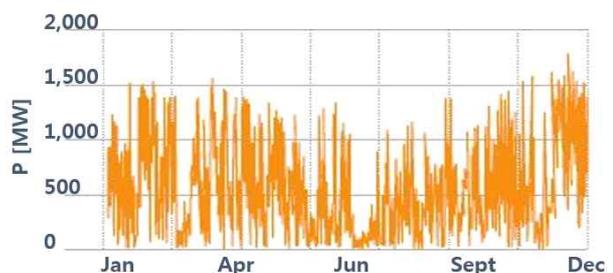
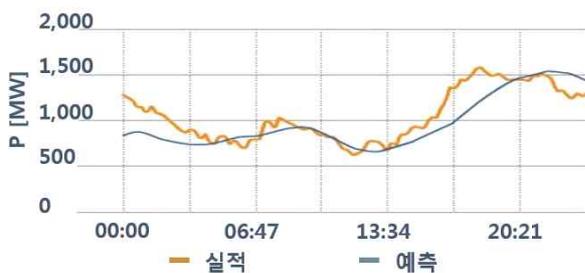
#### < 변동성 재생에너지의 특징 >

- 변동성 재생에너지(Variable Renewable Energy)는 일사량·풍속 등 자연조건에 의존적인 태양광 및 풍력 에너지를 의미하며, 불확실성 및 변동성을 내재
  - 변동성 재생에너지가 일정 수준 이상 전력망에 투입될 경우, 공급 불확실성이 확대되어 수요-공급 불균형, 전기품질 저하 및 순간 정전 문제 발생

< 아일랜드 일간 풍력 출력 ('13) >

[ 불확실성 사례 ]

[ 변동성 사례 ]



특 성	배 경	전력망 영향	대응 방안
Unpredictable	• 기상 예측 어려움	• 수요-공급 불균형	• 예비력 자원 확대
High-Volatility	• 높은 출력 변동 발생	• 전기품질 저하	• 백업 공급 설비 확충
Uncontrollable	• 급전지시 불가	• 순간 정전 발생	
Distributed	• 계획되지 않은 입지	• 수용용량 초과	• 송배전 설비 보강

\* 출처 : The figures behind wind energy in Ireland (The journal-ie, 2014)

## II. 수용비용 개념

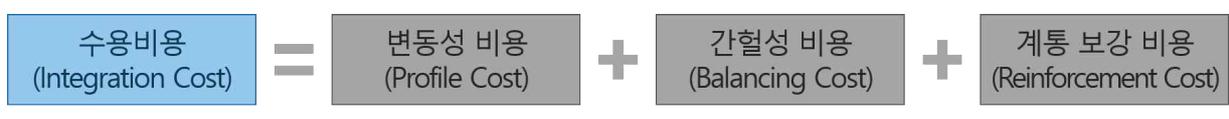
### 가. 개념 및 구성 요소

- 수용비용(Integration Cost)은 변동성 재생에너지의 시장·계통 영향을 비용화하여 발전량 당 단가(원/kWh)로 환산한 개념<sup>1)</sup>

○ 재생에너지 설비를 전력망에 연결하고, 전기에너지를 고객에게 전달 및 이용하는 과정에서 발생하는 비용을 의미

- 수용비용은 변동성, 간헐성 및 계통보강 비용\*으로 구성되며, 구분 방법은 기관별 일부 상이\*\*

○ 변동성 재생에너지<sup>2)</sup>의 간헐성 대응 및 계통 설비 보강에 따른 비용을 반영



구분	① 변동성 비용	② 간헐성 비용	③ 계통보강 비용
발생 원인	• 백업 공급설비 확충	• 예비력 기준 상향	• 송배전 설비 보강
비용 요소	• 공급안정용 백업 설비 (화력, ESS) 투자·운영비	• 실시간 수급 유지를 위한 예비력 운영비	• 재생에너지 수용을 위한 설비 투자비

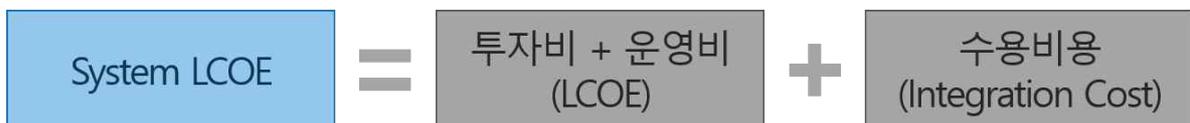
\* 국제에너지기구 및 포츠담연구소의 3가지 비용 요소 구분 방법 참조

\*\* 계통접속(Connection) 비용은 통상 발전소 내부비용으로 분류하나, 일부 기관에서는 수용비용에 포함

### 나. System LCOE 산정

- LCOE는 발전설비의 전 수명에 걸친 투자비 및 운영비를 발전량 당 단가로 환산한 개념으로 발전소 단위 비용만을 의미하고 있으나, 최근 수용비용을 반영한 System LCOE 산정 요구 증가

○ System LCOE는 기존 LCOE와 수용비용의 합으로 정의되며, 발전원 간 비교를 위해 발전소 단위에서 수용비용을 반영하여 시스템 비용으로 확장



\* 출처 : IEA, Projected Costs of Generating Electricity, 2015

- 1) 기존 해외 연구에서는 'hidden cost', 'system-level cost', 'integration cost' 등 여러 용어가 혼용되고 사용되어 왔으나, 최근에는 국제에너지기구 보고서(Projected Costs of Generating Electricity, IEA, 2015)에서 명시한 'integration cost' 개념이 가장 보편적으로 사용되고 있음
- 2) Variable Renewable Energy(VRE) : 기상 영향을 받아 출력 변동성 및 불확실성이 발생하는 태양광, 풍력

### Ⅲ. 주요 기관 산정사례

#### 가. NEA (OECD)

\* (참고문헌) 'Nuclear Energy and Renewables : System Effects in Low-carbon Electricity Systems', 2012

#### ■ NEA<sup>3)</sup>는 2012년 연구에서 주요 OECD 국가별/발전원별 수용비용을 산정

- 수용비용은 변동성, 간헐성, 계통접속, 계통보강의 4가지 비용 요소로 구분
- 6가지 발전원을 대상으로 수용비용 산출(원자력, 석탄, 가스복합, 태양광, 육상/해상풍력)

#### ■ 미국 태양광 17.3~33.0원/kWh, 육상풍력 19.0~23.2원/kWh, 해상풍력 24.0~33.0원/kWh

- 미국의 수용비용은 독일, 영국보다 적으며, 특히 간헐성 비용에서 차이가 큼

< 미국 발전량 비중에 따른 발전원별 수용비용 비교 > (단위 : 원/kWh)

발전원	변동성 재생에너지						전통 발전원						
	태양광		육상풍력		해상풍력		원자력		석탄		가스		
발전량 비중	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	
항목	변 동 성	0.0	12.2	6.6	7.2	2.5	8.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
	간 헐 성	2.3	5.8	2.3	5.8	2.3	5.8	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	계통접속	11.7	11.7	7.5	7.6	17.8	17.8	1.8	1.8	1.2	1.2	0.6	0.6
	계통보강	3.3	3.3	2.6	2.6	1.4	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>총 수용비용</b>	<b>17.3</b>	<b>33.0</b>	<b>19.0</b>	<b>23.2</b>	<b>24.0</b>	<b>33.0</b>	<b>2.0</b>	<b>1.9</b>	<b>1.3</b>	<b>1.3</b>	<b>0.6</b>	<b>0.6</b>	

\* 환율 : 1,167원/달러(2019년 평균 환율)

#### ■ 독일 태양광 41.6~96.8원/kWh, 육상풍력 22.6~51.2원/kWh, 해상풍력 32.6~50.0원/kWh

- 독일의 계통보강 비용은 미국의 약 2~10배이며, 계통접속 비용은 유사

< 독일 발전량 비중에 따른 발전원별 수용비용 비교 > (단위 : 원/kWh)

발전원	변동성 재생에너지						전통 발전원						
	태양광		육상풍력		해상풍력		원자력		석탄		가스		
발전량 비중	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	
항목	변 동 성	22.4	23.0	9.3	10.4	9.3	10.3	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
	간 헐 성	3.9	7.5	3.9	7.5	3.9	7.5	0.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
	계통접속	11.0	11.0	7.4	7.4	18.3	18.3	2.2	2.2	1.1	1.1	0.6	0.6
	계통보강	4.3	55.3	2.0	25.9	1.1	13.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>총 수용비용</b>	<b>41.6</b>	<b>96.8</b>	<b>22.6</b>	<b>51.2</b>	<b>32.6</b>	<b>50.0</b>	<b>2.8</b>	<b>2.6</b>	<b>1.2</b>	<b>1.2</b>	<b>0.6</b>	<b>0.6</b>	

3) Nuclear Energy Agency (NEA) : OECD 산하의 국제 원자력 에너지 기구

■ **🇬🇧 영국** 태양광 67.8~83.7원/kWh, 육상풍력 21.7~35.3원/kWh, 해상풍력 39.8~53.0원/kWh

- 미국보다 전력망 수용비용이 더 많으며, 특히 변동성 비용에서 큰 차이가 발생
- 발전량 비중이 증가할수록, 태양광의 전력시장·계통에 미치는 비용 영향이 육상풍력 및 해상풍력보다 더 큼

< 영국 발전량 비중에 따른 발전원별 수용비용 비교 > (단위 : 원/kWh)

발전원	변동성 재생에너지						전통 발전원						
	태양광		육상풍력		해상풍력		원자력		석탄		가스		
발전량 비중	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	10%	30%	
항 목	변 동 성	30.4	31.3	4.7	8.1	4.7	8.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
	간 혈 성	8.9	16.5	8.8	16.5	8.9	16.5	1.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
	계통접속	18.2	18.2	4.6	4.6	23.1	23.1	2.6	2.6	1.5	1.5	0.7	0.7
	계통보강	10.3	17.7	3.4	6.1	3.1	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>총 수용비용</b>	<b>67.8</b>	<b>83.7</b>	<b>21.7</b>	<b>35.3</b>	<b>39.8</b>	<b>53.0</b>	<b>3.6</b>	<b>3.2</b>	<b>1.6</b>	<b>1.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	

※ 태양광은 야간 시간대에 백업 공급설비가 필요하여 일반적으로 변동성 비용이 육·해상풍력과 비교하여 높게 나타남

**나. Potsdam Institute (독일)**

\* (참고문헌) 'System LCOE : What are the Cost of Variable Renewables?', 2013

■ 포츠담연구소는 2013년 연구에서 독일 풍력발전의 수용비용 및 System LCOE를 산정

- 수용비용은 변동성 비용, 간헐성 비용, 계통보강 비용으로 구성된다고 가정
- 육상풍력의 수용비용은 47.2~95.0원/kWh, System LCOE는 126.4~174.2원/kWh
- 변동성 비용의 비중이 가장 높고 다음으로 계통보강 비용, 간헐성 비용 순으로 나타남
- 수용비용 단가는 풍력발전량 비율이 확대될수록 증가
  - \* 풍력 발전량 비율이 30%일 때 수용비용은 73.9원/kWh로, 10%일 경우의 47.5원/kWh 보다 약 56% 증가

< 발전량 비중에 따른 독일 육상풍력 수용비용 비교 > (단위 : 원/kWh)

풍력발전량 비율	10%	20%	30%	40%
수용비용 ㉠	47.2	63.4	74.0	95.0
LCOE ㉡	79.2			
System LCOE ㉠+㉡	126.4	142.6	153.2	174.2

\* 환율 : 1,320원/유로 (2019년 평균 환율)

### 다. Agora Energiewende (독일/오스트리아)

\* (참고문헌) 'Renewables Versus Fossil Fuels - Comparing the Costs of Electricity Systems', 2015

■ 아고라-에네르기벤데 연구소는 2015년 연구에서 독일과 오스트리아 연계계통의 태양광, 육상·해상풍력 수용비용을 산출

- 수용비용은 간헐성 비용, 계통접속 및 보강 비용으로 구성되고, 변동성 대응 비용은 산정대상에서 제외
- 유연성 비용 산정 시 전력시장 통계 데이터를 사용한 분석 방법론과 모의 프로그램을 이용한 방법론을 각각 적용하여, 중부 유럽에서의 수용비용을 산정함

■ 수용비용은 태양광 11.2원/kWh, 육상풍력 17.1원/kWh, 해상풍력 48.8원/kWh

- 계통접속 및 보강 비용이 간헐성 비용보다 많으며 해상풍력은 태양광의 4.4배 수준

< 독일/오스트리아 발전원별 수용비용 > (단위 : 원/kWh)

발전원	태양광	육상풍력	해상풍력
간헐성 비용 ①	1.3	2.6	2.6
계통접속·보강 비용 ②	9.9	14.5	46.2
수용비용 ①+②	11.2	17.1	48.8

\* 환율 : 1,320원/유로 (2019년 평균 환율)

### 라. KU Leuven (벨기에)

\* (참고문헌) 'Determining the Impact of Renewable Energy on Balancing Costs, Back Up Costs, Grid Costs and Subsidies', 2016

■ 벨기에의 뢰번 가톨릭 대학교에서는 2016년 자국의 재생에너지 수용비용을 산정

- 발전원(태양광, 풍력) 구분 없이 변동성 재생에너지의 수용비용을 산정함
- 수용비용은 변동성 비용, 간헐성 비용, 계통접속·보강 비용으로 구성된다고 가정함
- 월전 폐지 여부, 온실가스 배출 목표 등을 반영한 시나리오를 설계하고, 시나리오별 재생에너지 용량, 부하, 연료비 등을 다르게 설정

■ 변동성 재생에너지의 수용비용은 13.1~33.2원/kWh의 범위에서 형성

< 벨기에 변동성 재생에너지 수용비용 > (단위 : 원/kWh)

구 분	변동성	간헐성	계통보강	계통접속		수용비용
				송전	배전	
수용비용	4.0~10.6	2.6~6.6	1.1~1.2	2.1~2.9	3.3~11.9	13.1~33.2

\* 환율 : 1,320원/유로 (2019년 평균 환율)

### 마. The University of Texas at Austin (미국 텍사스)

\* (참고문헌) 'Competitiveness of Renewable Generation Resources', 2017

■ 텍사스 오스틴 대학교에서는 2017년 연구를 통해 수용비용 및 System LCOE를 산정

- 재생에너지 수용비용은 간헐성 비용, 변동성 비용, 계통접속 비용의 합으로 정의
  - \* 변동성 비용에는 백업 설비 투자비, 운영비 증가분, 공급과잉 비용(Curtailment)을 반영함
- 텍사스 독립계통에서 태양광과 육상풍력, 해상풍력을 대상으로 수용비용을 분석

■ 변동성 재생에너지 수용비용은 태양광 34.7원/kWh, 육상풍력 29.4원/kWh, 해상풍력 38.2원/kWh, System LCOE는 태양광 107.5원/kWh, 육상풍력 91.4원/kWh, 해상풍력 169.1원/kWh,

- 동일한 조건일 경우, 해상풍력의 수용비용이 태양광, 육상풍력보다 더 높음
- 변동성 재생에너지의 수용비용을 반영하면 기존 LCOE에서 약 30~40원/kWh 증가

< 미국 텍사스 발전원별 System LCOE 비교 > (원/kWh)

발전원	태양광 (유틸리티 급)	육상풍력	해상풍력
수용비용 ㉠	34.7	29.4	38.2
LCOE ㉡	72.8	62.0	130.9
System LCOE ㉠+㉡	107.5	91.4	169.1

\* 환율 : 1,167원/달러(2019년 평균 환율)

### 바. Energy Research Centre of the Netherlands (네덜란드)

\* (참고문헌) 'Integration Costs and Market Value of Variable Renewables : A Study for the Dutch Power Market', 2017

■ 네덜란드 에너지 연구센터에서는 2017년 연구를 통해 네덜란드 육상풍력의 수용비용 및 System LCOE를 분석

- 육상풍력 발전량 비중 25%, 60%에 따른 수용비용 및 System LCOE를 산정
- 변동성과 간헐성 비용만 반영하고, 계통보강·접속 비용은 고려하지 않음

■ 육상풍력의 수용비용은 32.7~42.0원/kWh, System LCOE는 102.7~121.4원/kWh

- 수용비용 중 변동성 비용의 비중이 65~85%로 가장 높음
- 국가 간 상호연결과 전력거래는 변동성 재생에너지의 수용비용을 감소시키는 효과가 존재하는 것으로 분석

< 발전량 비중에 따른 네덜란드 육상풍력 System LCOE 비교 > (원/kWh)

발전량 비중	25%	60%
수용비용 ㉠	32.7	42.0
LCOE ㉡	70.0	79.4
System LCOE ㉠+㉡	102.7	121.4

\* 1유로 : 1,320원 (2019년 평균 환율)

## IV. 산정 결과 비교

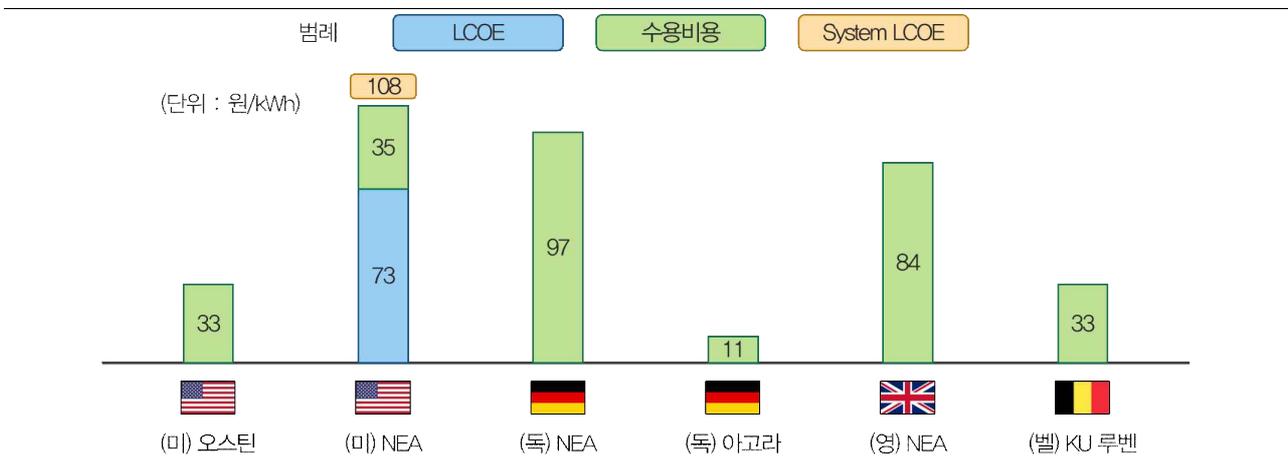
### 가. 태양광

#### ■ 주요 기관의 태양광 수용비용 산정 결과 : 11~97원/kWh

- 태양광 수용비용은 국가별 계통 운영 환경 및 재생에너지 발전량 비중 등에 따라 다양하게 나타남
- 발전량 비중이 증가할수록, 태양광의 시장·계통 영향 증가에 따라 단가가 더 높아짐

#### ■ 수용비용을 반영하면 기존 태양광 LCOE에서 약 50% 증가

< 주요국 태양광 수용비용 및 System LCOE 산정 결과 비교 >



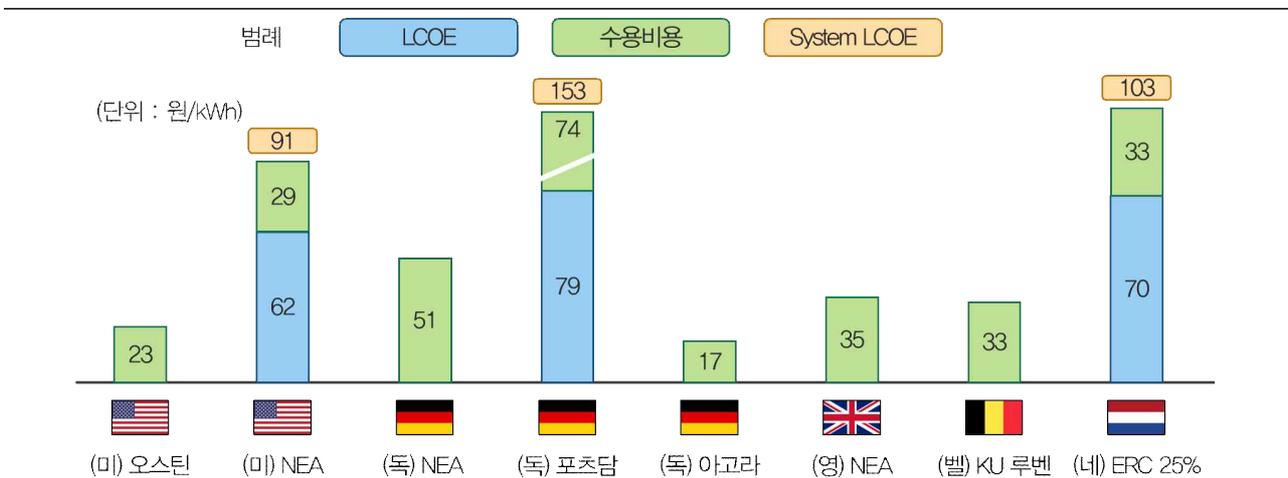
### 나. 육상풍력

#### ■ 주요 기관의 육상풍력 수용비용 산정 결과 : 17~74원/kWh

- 동일한 발전량 비중 가정 시, 태양광의 시장·계통에 미치는 비용 영향이 육상풍력보다 더 큼
- ※ 태양광은 낮에만 발전하고 밤에는 발전할 수 없으므로, 야간 백업 공급설비가 필요하여 수용비용이 높음

#### ■ 수용비용을 반영하면 기존 육상풍력 LCOE 대비 약 50~100% 증가

< 주요국 육상풍력 수용비용 및 System LCOE 산정 결과 비교 >



## V. 결론 및 시사점

### ■ 주요 기관에서는 국가별 고유 환경을 반영한 수용비용 및 System LCOE를 산정

- 연구기관에 따라 분석 전제가 상이하여 결과에 영향을 미침

< 연구사례별 분석 전제 차이점 >

구분	차이점
수급환경	· 설비 규모, 유연성 자원용량, 전력망 운영기준, 송·배전망 설비 여건
재생에너지 모델	· 보급 비율, 일조량, 풍량/풍속, 입지 조건, 신재생 설비모델
기타 경제변수	· 할인율, 계통한계가격(SMP), 송·배전 설비 투자비 등

### ■ 수용비용은 태양광 11~97원/kWh, 육상풍력 17~74원/kWh 수준으로 나타남

- 동일한 조건을 가정하면, 태양광의 수용비용이 육상풍력보다 높음  
 ※ 주요 원인 : '덕 커브 현상' 대응을 위한 백업 비용, 배전설비 보강 비용 등

### ■ 재생에너지의 발전량 비중이 증가할수록 전력망 수용비용은 상승

- 재생에너지의 지역편중, 변동성 중첩, 운영 예비력 가용자원 감소 등의 영향으로 전력망 신뢰도 유지에 필요한 단위 비용 증가
- 기존 LCOE가 시간의 흐름에 따라 지속해서 하락하는 추세를 보인 것과는 반대로, 수용비용은 현재보다 미래에 더 증가할 가능성이 있음 (포츠담연구소, 2013)

### ■ 전력망 영향을 고려한 System LCOE 반영 시, 그리드패리티 달성 시점이 지연될 것으로 예상

- 전력망 영향 고려 시 재생에너지 설비의 LCOE가 최대 2배 가까이 상승  
 ※ 변동성 재생에너지의 수용비용 = 기존 LCOE의 약 50~100% 수준

### ■ 재생에너지 수용비용은 기존 전력구입비, 설비 투자비에 내재 되어 있어, RPS 정산 비용 등과 달리 비용 규모를 정확히 인지하는데 어려움이 존재함

- 기존 예비력 비용 및 설비 투자비에 포함되어 있으므로, 사후에도 소요 비용을 정확히 추산할 수 없음
- 재생에너지 수용에 따른 부담 비용 발생을 정확히 인지하지 못할 경우, 전력회사의 비용 미회수 문제가 발생할 수 있음

### ■ 향후 시장 및 계통 영향을 반영한 System LCOE 산정 및 활용 필요

- 수급계획 수립 및 발전원별 경제성 비교 시 전력망 영향을 고려한 System LCOE 적용·검토 필요

## 【참고문헌】

- ▶ (2019) NEA, "The Costs of Decarbonisation : System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables"
- ▶ (2018) The University of Texas at Austin, "Competitiveness of Renewable Generation Resources"
- ▶ (2018) Open University, "The Cost of Power – Moving Beyond LCOE"
- ▶ (2018) IRENA, "Renewable Energy Statistics"
- ▶ (2017) Forbes, "The Cost of Wind and PV Intermittency"
- ▶ (2017) Energy Research Centre of the Netherlands, "Integration Costs and Market Value of Variable Renewables: A Study for the Dutch Power Market"
- ▶ (2016) KU Leuven, "Determining the Impact of Renewable Energy on Balancing Costs, Back Up Costs, Grid Costs and Subsidies"
- ▶ (2015) UK Government, "Levelised Cost of Electricity"
- ▶ (2015) Potsdam Institute, "Integration Costs Revisited - An Economic Framework for Wind and Solar Variability. - Renewable Energy"
- ▶ (2015) Agora Energiewende, "Renewables Versus Fossil Fuels - Comparing the Costs of Electricity Systems"
- ▶ (2014) Agora Energiewende, "The Integration Costs of Wind and Solar Power"
- ▶ (2013) Potsdam Institute, Energy Journal, "System LCOE : What are the Cost of Variable Renewables?"
- ▶ (2012) NEA, Nuclear Energy and Renewables : System Effects in Low-carbon Electricity Systems

작성자 : 한전 경영연구원 정지홍 책임연구원, 이순정 선임연구원, 문국현 선임연구원

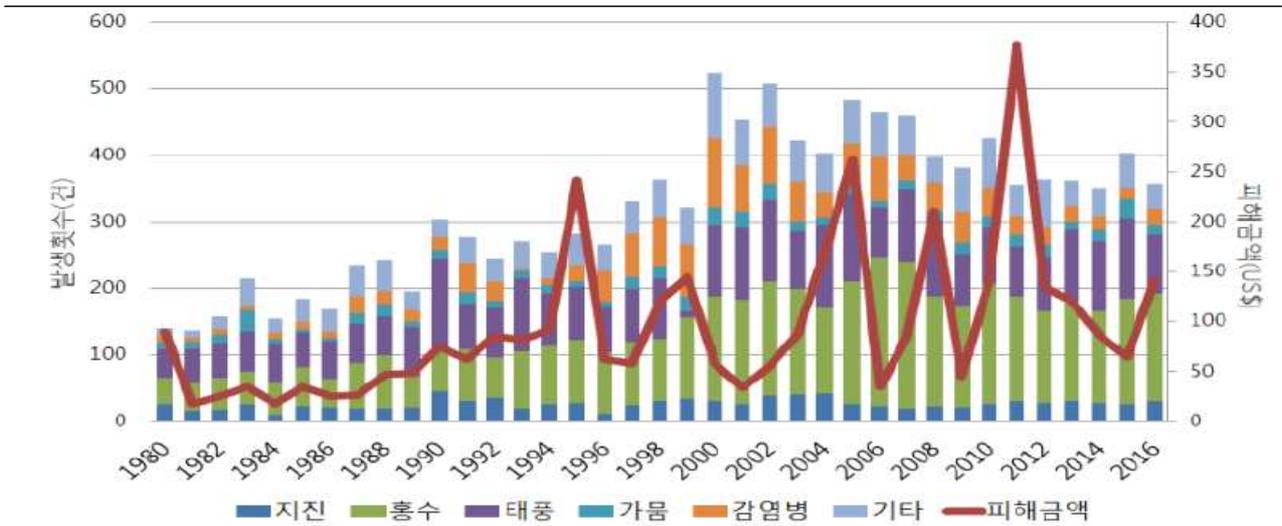
## Issue 2 : 계통 복원력(Grid Resilience) 관련 미국 정책동향과 국내 현황 검토

### I. 검토 배경

- 최근 전 세계는 기후변화로 인한 재해/재난이 점차 증가하고 있으며, 경제 발전에 따른 도시·산업화로 피해규모도 전반적으로 증가 추세를 보이고 있음

○ 최근 글로벌 재해/재난 발생 건수는 지난 30년 대비 약 4.5배 가까이 증가<sup>4)</sup>

< 글로벌 재해/재난 발생건수 및 피해 추이 >



\* 출처 : 국가과학기술심의회, 제3차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획안('18 ~ '22), 2018

- 이러한 재해/재난은 전력산업 부문에 있어 발전소 가동 중단, 송·배전망 손실, 대규모 정전 피해를 발생시키므로, 재해/재난에 취약한 전력설비에 대한 선제적인 대응 방안이 필요함

< 전력산업의 재해/재난 피해사례 >

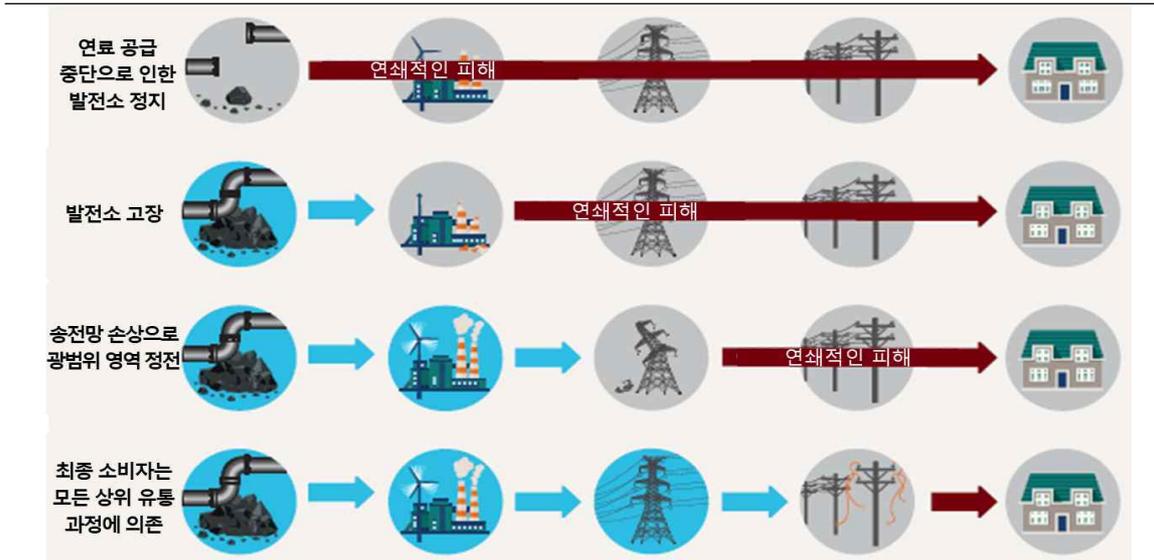
구분	재난개요	피해규모
 <b>산불</b>	<b>캘리포니아 대형 산불 (2020)</b> ■ [발생] 2020년 8월 15일 ■ [지역] 美 서부 캘리포니아 전역 ■ [원인] 고온건조 및 강풍 → 대형화재	- 약 8,500건 화재 발생 (180만 ha) (피해규모 약 \$1조 8080억, 사망자 31명) - 州 전력비상사태선언 → 정전조치 시행
 <b>태풍</b>	<b>허리케인 '플로렌스' (2018)</b> ■ [발생] 2018년 9월 14일 ■ [지역] 美 동남부(NC, SC 州) ■ [원인] 지구온난화 → 태풍세력 강화	- 폭우, 홍수 등 추가피해 발생 (18명 사망, 1,000여명 구조요청) - 송전선 훼손 → 100만 가구 정전 발생
 <b>이상기온</b>	<b>빅토리아주 폭염 (2018)</b> ■ [발생] 2018년 1월 28일 ■ [지역] 호주 빅토리아주 멜버른市 ■ [원인] 이상고온에 따른 고기압 형성	- 약 5만 가구에 대규모 정전 발생 (새벽 4시까지 30도 이상으로 고온유지) - 수요증가 → 배전망 과부하 → 정전 발생
 <b>홍수</b>	<b>베니스 홍수 (2019)</b> ■ [발생] 2019년 11월 12일 ■ [지역] 이탈리아 북동부 베니스 ■ [원인] 해수면 상승 → 도시 범람	- 수위 상승(해발 1.87m), 도시 85% 침수 (총 10억 유로 피해 추정) - 침수에 의한 감전사고 사망자 발생

4) 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC ; Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 보고서 (2007)

**< 전력산업 부문의 재해/재난의 취약성 및 영향 >**

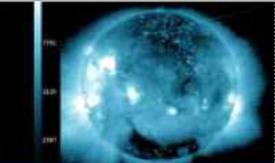
- 전력산업은 기본적으로 수직적 단일유통 (연료공급 → 발전 → 송전 → 배전)의 형태를 가지고 있어 재해 / 재난에 취약한 구조적 특성을 가지고 있음

< 전력계통의 구조상 취약성 >



- 최근 美 연구기관 MARK DYSON And Becky Li는 전력계통에 있어 광범위한 정전을 발생시킬 수 있는 재해/재난 요인을 ① 극심한 날씨로 인한 자연재해 ② 물리적 공격 ③ 사이버 공격 ④ 전자기펄스(Electromagnetic Pulse) 및 지자기 장애 등 4가지로 정의

< 전력계통에 영향을 미칠 수 있는 재해 / 재난 >

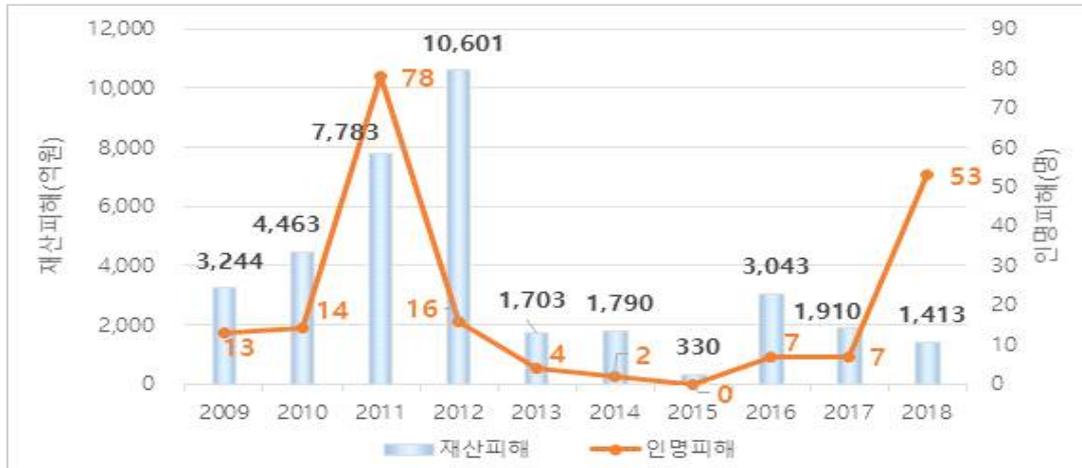
	 극심한 날씨와 자연재해	 물리적 공격	 사이버 공격	 전자기펄스(EMP) 및 지자기 장애
예시/정의	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 한파</li> <li>• 허리케인</li> <li>• 산불</li> <li>• 지진</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 폭격</li> <li>• 총격</li> <li>• 선로 절단</li> <li>• 방화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 계통 손상을 위한 해킹 공격</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EMP(Electromagnetic Pulse) : 핵융합 폭발로 인해 발생</li> <li>• 지자기 장애(GMD**) 태양 폭발으로 발생</li> </ul>
잠재적인 피해 범위	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 망손상 또는 파괴</li> <li>• 산불을 막기 위한 예방 정전(PSPS*)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지역 정전 수준</li> <li>• 동시다발적 공격은 대규모 피해</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 계통제어 시스템을 차단하여 정전 및 설비 손상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 송·배전망 광역 피해</li> <li>• EMP의 경우, 전자 장비에 대한 대규모 손상</li> </ul>
적용중인 대비책	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 중요 설비에 대한 비상계획</li> <li>• 계통 보강</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 물리적 보안 지침</li> <li>• 예비 변압기 구비</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사이버 보안 지침 및 절차</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 신뢰도 기준</li> <li>• 시나리오 기반 시뮬레이션</li> </ul>

\* 출처 : BY MARK DYSON AND BECKY LI, Reimagining Grid Resilience, 2020

\* PSPS ; Public Safety Power Shutoff      \*\* GMD ; Geomagnetic Disturbances

- 미국은 재해 / 재난 대응 방안의 일환으로 대규모 사고를 예방하거나 사고 발생 후 신속하게 대응하는 능력을 계통 복원력 (Grid Resilience)으로 정의, 이를 향상시키려는 노력을 추진 중
- 국내 역시 최근 기후변화로 인한 재해 / 재난이 증가하고 있으며, 분산자원 확대와 고립 계통의 국내 전력산업 환경 등을 고려할 경우, 계통 복원력에 대한 논의가 필요

< 국내 재해 / 재난에 따른 인명/재산 피해 추이 >

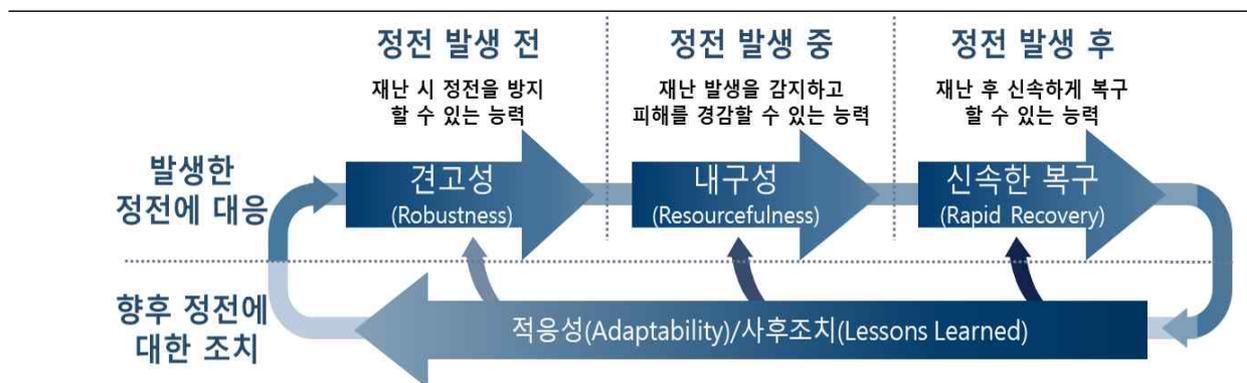


## II. 계통 복원력(Grid Resilience) 정의

- 일반적으로 과거 복원력의 사전적인 의미는 정전 발생 후 전력을 재공급하는 능력으로 인식  
미국의 경우, 계통 복원력의 개념을 정전 발생 이전 예방차원까지 확장하여 활용하고 있음
- 초기 美 DOE\*는 계통 복원력을 전력 설비의 손상으로부터 신속하게 복구하는 능력으로 정의하였으나, FERC\*\*는 복원력을 “정전예측·대응·피해감소 및 신속하게 복구할 수 있는 능력”을 포함하여 “파괴적인 사고의 규모 및 기간을 줄이는 능력”으로 정의, 포괄적인 의미의 계통 복원력의 필요성을 강조

\* 에너지부 : Department of Energy    \*\* 연방에너지규제위원회 : Federal Energy Regulatory Commission

< 美 Grid Resilience Framework >



\* 출처 : NIAC<sup>5)</sup>, A Framework for Establishing Critical Infrastructure Resilience Goals, 2010

5) 국가기반체계 자문위원회(NIAC ; National Infrastructure Advisory Council) : 2001년 설립된 자문위원회로 중요 인프라에 대한 리스크 감소 방안을 대통령에게 조언하는 백악관 산하 위원회

- 이러한 복원력은 전력산업에서 주로 활용하는 계통 신뢰도(Reliability) 개념과 일부 유사하나, 복원력은 사고 발생을 예방하고 대응하는 능력까지 포함하고 있어 정량적인 측정이 어려움

○ FERC는 신뢰도와 복원력 개념 비교를 위해 규모·대응·계획 차원의 차이점을 제시

< 복원력과 신뢰도의 정의 및 차이점 >

구 분	복원력 (Resilience)	신뢰도 (Reliability)
정 의	정전예측, 대응, 피해감소 및 신속하게 복구할 수 있는 능력을 포함하여 파괴적인 사건의 규모 및 기간을 줄이는 능력	계통운영 시 일상적인 불확실성에 직면하여, 고객에게 전력 공급을 유지할 수 있는 능력(NERC)
기 준	통일된 기준이 존재하지 않음	전압 및 주파수
차 이 점	피해 규모	대규모 광역 정전
	대응	정전을 발생시킬 수 있는 재난 및 피해규모 경감을 고려
	계획	재난과 변화하는 계통의 특성을 고려한 장기계획

\* 출처 : ECOLOGY LAW QUARTERLY, Federal Regulation for a "Resilient" Electricity Grid, 2019

### Ⅲ. 복원력 향상을 위한 미국의 기관별 동향

- 계통 복원력에 관하여 가장 활발하게 논의가 되고 있는 미국의 경우에도, 현재 복원력을 평가하고 규제하는 담당기관이 존재하지는 않지만 연방정부, 州 정부 및 유틸리티 등 전력 산업의 이해관계자들은 복원력 향상을 위한 노력을 다각적으로 추진하고 있음

○ [DOE] 전력산업 연구기관의 복원력 가치평가 및 투자에 대한 연구비 지원

○ [NERC\*] 미국 전력계통 안정성을 평가하는 신뢰도 기준(CIP ; Critical Infrastructure Protection)에 복원력 개념을 함께 고려하여 관리

\* 북미신뢰도위원회 : North American Electric Reliability Corporation

○ [유틸리티] 안정적인 전력공급을 위한 연료 확보 및 보안 / 재난 대응전략을 수립하고, 상업용 마이크로그리드 등 복원력 향상을 위한 기업 차원의 지속적인 투자를 계획 중

< 미국의 복원력 향상을 위한 정책 동향 >

일시	기관	주요 내용
'17.9월	DOE	전력공급의 복원력 향상을 위한 발전소 보조금 제도 제안
'18.1월	FERC	보조금 제도 승인 거부, 복원력의 필요성을 인정하고 각 전력기관에 정보 제공을 요청 및 향후 조치 여부 검토
'18.5월	NERC	신뢰도에 복원력을 포함시키기 위하여 프레임워크 제안
'18.9월	RTO/ISO	복원력 정보를 제출하고, 평가기준 및 법적보상을 FERC 요청

\* 출처 : FERC, 'Grid Resilience in RTO/ISO' Docket Nos. AD18-7-000, 2018

## 가. 에너지부 (DOE)

- '17.9월, 에너지부(DOE)는 전력공급 측면의 계통 복원력에 대한 필요성을 언급하며, 계통 복원력 향상을 위한 발전소 보조금 제도 수립을 FERC에 권고
  - DOE는 복원력 확보에 대한 이슈를 근거 규정으로 90일간 전력을 공급할 수 있는 발전소를 소유한 발전사업자에게 보조금을 지급하는 제도 수립을 권고
  - 해당 권고사항은 석탄 / 원자력 설비에만 일방적으로 유리한 특혜가 주어질 수 있음을 이유로 제도화되지 않음 (FERC가 거부 입장을 표명)\*
    - \* FERC는 도매전력시장의 가격제도 변경을 요구하기 위해서는 연방전력법(FPA ; Federal Power Act) 상의 법적 근거가 필요하나, 기존 RTO/ISO의 가격결정시스템이 불공정하다는 것을 입증할 수 없다는 입장 표명
  - 결국 FERC는 DOE가 권고한 복원력 보조금 제도를 신설하지는 않았으나, 복원력 향상의 필요성을 인정하여, 전력 기관들에게 복원력 자료를 요청, 복원력 고려를 지시
- \* 출처 : 'Grid Reliability and Resilience Pricing' Docket Nos. Rm18-1-000, 2017

## 나. 연방에너지규제위원회(FERC)

- '18.1월, 연방에너지규제위원회(FERC)는 지역별 복원력에 대한 이해 수준을 검토하기 위해 지역 / 독립송전계통운영자(RTO/ISO)에게 복원력 관련 정보 제공을 요청
  - 해당 요청사항은 전력기관의 복원력을 구체적으로 평가하는 행정절차로서 복원력 관련 약 30가지의 질문으로 구성되어 있으며, 이를 통해 다음과 같은 사항을 파악하고자 함
    - 1) 전력계통 복원력 정의 및 필요성 이해
    - 2) 각 RTO/ISO의 지리적 특성을 고려한 복원력 평가 방법 필요성 이해
    - 3) 향후 위원회의 추가 조치 여부 평가 등
- '18.9월, RTO/ISO는 복원력 정의, 평가방법, 법적 보상방안 등에 대한 기준을 FERC에 요청
 

< RTO/ISO의 복원력 향상을 위한 요구 >

RTO/ISO	주요 내용
CAISO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 주요 재난과 전원구성이 다른 지역적 차이를 고려할 수 있는 유연한 복원력 평가 기준을 FERC에 요청</li> <li>• 복원력과 NERC의 신뢰도 기준의 차이점에 대한 정의 요청</li> </ul>
MISO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 향후 복원력 향상을 위해 FERC의 조치 필요성을 제시               <ul style="list-style-type: none"> <li>- NERC의 필수 신뢰도 기준(CIP)의 개정</li> <li>- 사이버 보안을 위한 기술 및 피해 사례 공개를 요청</li> <li>- 송전부문 규제에서 복원력을 평가하는 방안 요청</li> </ul> </li> </ul>
PJM Interconnection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 복원력 향상계획을 실행하기 위한 법적 보상방안 마련 및 기관별 취약점을 식별하기 위한 프로세스를 FERC에 요청</li> </ul>

**다. 북미신뢰도위원회 (NERC)**

- '18. 5월 북미신뢰도위원회(NERC)는 신뢰도 기준 내 복원력의 개념이 포함되어 있으므로, 신뢰도를 통해 복원력을 관리할 수 있다는 입장을 표명

○ NERC는 신뢰도 기준 및 장기 신뢰도를 평가하는 규제기구로 다음과 같은 정의를 활용

구 분	정 의
공급적정성 (Adequacy)	발전설비의 고장 등을 고려하여 최종 소비자에게 전력을 상시로 공급할 수 있는 능력
운영 신뢰도 (Operation Reliability)	송전선로 고장과 같은 예상치 못한 계통 설비가 고장에 견딜 수 있는 계통 운영 능력

\* 출처 : NERC, Definition of "Adequate Level of Reliability", 2007

○ 이러한 신뢰도 정의를 바탕으로 정전 사례의 원인을 분석하고, 전원 구성변화에 따른 대응방안을 마련하는 등 신뢰도 기준에서 계통 복원력을 고려 중

**< NERC가 제안한 복원력 프레임워크 >**

- NERC는 신뢰도 구성요소에 복원력을 포함시키기 위하여 공급적정성 기준인 ALR\*을 정의하고 계통안정성위원회(RISC\*\*)에 검토를 지시

\* ALR ; Adequate Level of Reliability      \*\* RISC ; Reliability Issues Steering Committee

○ RISC는 국가기반체계 자문위원회(NIAC) 프레임워크에 내용을 추가하여 다음과 같이 제시

**< RISC의 복원력 프레임워크(2018.5) >**

구 분	정 의	비 고
내구성 (Robustness)	재난 시 충격을 흡수(absorb)하고 운영을 유지하는 능력	낮은 확률, 큰 사고(HILF*)에 견딜 수 있도록 투자/유지 능력 *High-Impact, Low-Frequency Event
자원부존성 (Resourcefulness)	재난 시 감지하고 관리할 수 있는 능력	피해경감을 위한 작업 지시 능력 (인적자원)
신속성 (Rapid recovery)	재난 후 제어된 방식으로 피해의 정도를 고려하여 복구할 수 있는 능력	비상 계획, 적절한 인력 및 자원 배치
적응성 (Adaptability)	재난 후 대응방안을 향상시키는 능력	계획수정, 견고성, 복원기능 개선 등

\* 출처 : NERC, Reliability Issues Steering Committee, 2018

Comments of the North American Electric Reliability Corporation(AD18-7), 2018

## 라. 유틸리티 (Utility)

- 유틸리티는 산불 등 재난/재해가 예상되는 지역에 대한 안전운영센터를 설립하고, 잠재적 화재 위험에 대한 실시간 감시와 방지대응 업무를 수행하는 등의 복원력 강화를 위한 투자 시행
  - 캘리포니아 유틸리티 PG&E는 대규모 산불 화재 이후, 산불안전운영센터를 설립하고 산불 발생이 예상될 때 선제적 전력차단(PSPS: Public Safety Power Shutoff)을 시행\*
    - \* 공공유틸리티위원회(Public Utility Commission)는 공공유틸리티법을 근거로 전력회사가 제출한 전력차단 기준을 검토 및 승인
  - 또한 FPL(Florida Power and Light)은 태풍/장마에 따른 전력 설비 피해를 최소화하기 위해 선로 지중화 계획을 수립하고, PUC가 이를 승인

< 화재 고위험 지역 지도\* 및 PG&E의 PSPS 시행기준 >

화재 고위험 지역 지도(HFTD)	PSPS 시행기준
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 국립기상청 Red Flag Warning 선포 (산불발화 및 급속한 확산 위험 발생 경보)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 풍속 레벨 : 시속 40km/h 이상 바람 지속 또는 시속 72km/h 이상 돌풍</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 습도 레벨 : 일반적으로 20% 미만, ▶인화성이 높은 건조한 수목이 많은 지역</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 화재가능성지수 : 매우높음~극단적(기상조건 및 연료조건을 종합적 고려한 지수)</li> </ul>

\* 전력회사, 통신사, 지역 공공 안전기관 등의 정보를 바탕으로 캘리포니아 소방국에서 개발

- 또한, **州 정부, 공공유틸리티위원회와 협력하여 중장기 복원력 향상 계획을 수립하고 유틸리티 차원에서의 복원력 강화를 위한 상업용 마이크로그리드와 같은 실증사업을 추진**
  - [통합자원계획] 유틸리티는 지역별 전력계통 수급계획 내 복원력 향상에 기여하는 기술 및 자원을 포함하겠다는 계획서를 공공유틸리티위원회에 제출
    - \* 플로리다는 '05년에 발생한 허리케인 Sandy 이후 3년간의 복원력 강화 계획을 PUC에게 제출
  - [복원력로드맵] 州 정부의 장기 복원력 향상방안 로드맵에 유틸리티 기업들 참여
    - \* 미주리 지역은 3개 도시의 통합 복원력 로드맵을 개발하여 재해/재난 정전 대응을 계획을 수립
- 또한 **유틸리티 차원에서의 복원력 강화를 위한 실증사업을 추진**
  - 시카고 ComEd(Commonwealth Edison)는 상업용 마이크로그리드를 구축하여 계통 격리 및 분산자원 활용을 통해 정전방지 능력을 입증, 복원력을 강화
  - 유틸리티간의 협동조합을 구축하여 재해/재난 대응 차원의 전력발전 설비 및 인력자원 공유 프로그램을 시행

**마. 국립재생에너지연구소(NREL)**

- 국립재생에너지연구소(NREL)는 군사지역, 대학, 병원 등 중요 지역에 지역별 재난과 계통 취약성을 평가·분석하여 복원력 향상방안 및 우선순위를 제공하는 TRN 프로그램\*을 개발

\* TRN ; Technical Resilience Navigator

- TRN 프로그램은 ① 기존 복원력 수준을 평가, ② 향후에 발생 가능한 재난 및 취약점을 식별 ③ 투자비용과 적용 난이도를 고려한 우선순위 산정 절차로 구성

< TRN 프로그램 절차 및 주요내용 >



< Technical Resilience Navigator 절차 상세내용 >

절 차	상세 내용
기존 복원력 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 정전대응 계획, 지리적 특성, 유틸리티 정보 및 기후특성을 고려하여 복원력을 평가하며, 전문가 및 현장 직원과의 인터뷰를 포함</li> </ul>
재해/재난 식별	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기후전망 연구 및 정전대응 실무자와의 인터뷰를 통해 재난 식별 및 가능성 평가</li> </ul>
취약점 식별	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 재난정전 발생 시 피해규모를 증가시킬 수 있는 계통운영 상의 문제점이나 설비 노후화 등을 취약점으로 평가</li> </ul>
리스크 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 재난이 발생했을 때 나타날 수 있는 취약점을 고려하여 산정</li> <li>• 피해규모 및 지역의 취약점 발생가능성을 기반으로 리스크를 수치화</li> <li>- 리스크 = 재난 가능성 × 취약점 × 피해규모</li> </ul>

- TRN 프로그램에서 재해/재난의 범위는 산불, 태풍, 지진과 같은 자연재해부터 사이버 및 물리적 공격, 인적자원 유실로 인한 재난까지 포함
- 대표적인 취약점으로는 송전선로 용량부족, 배전망 노후화, 홍수·화재 관련 대비 미흡, 건조화가 심한 지역, 재해 대응 매뉴얼의 부족, 비상상황 대응 인력의 부재 등이 있음

■ 리스크 평가의 경우, 재난 피해규모 및 해당지역의 취약점 발생 가능성을 기반으로 수치화

- 재난이 발생할 확률과 그로 인한 계통 사고의 발생확률, 그 피해규모를 모두 고려하여 리스크를 평가, 아래의 예시와 같이 하나의 재난에 다수의 취약점이 존재할 수 있음

< 리스크 평가 예시 >

재난	발생 확률	취약점	발생 확률	피해 규모	계산	리스크
태풍	4	송전 선로 파손	2	10	$4 \times 2 \times 10$	80
		대응 방안 미흡	1	1	$4 \times 1 \times 1$	4
		예비력 부족	1	4	$4 \times 1 \times 4$	16

- 계통 복원력 향상 방안은 해당 지역의 리스크, 적용 난이도 및 비용을 기준으로 평가

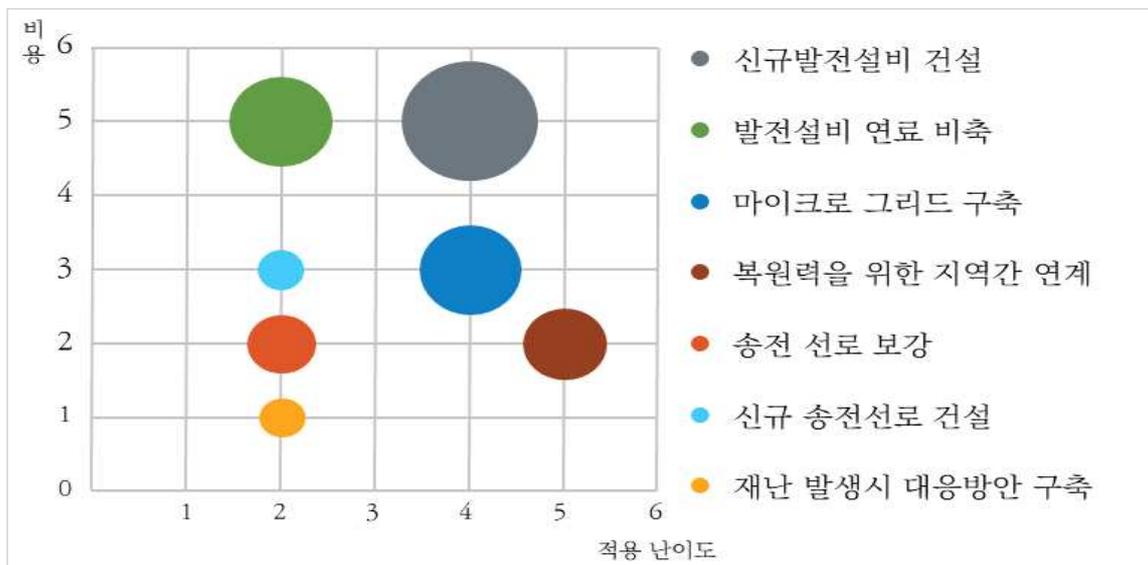
< 계통 복원력 향상 방안 평가 예시 >

방안	적용 난이도 (수치가 클수록 어려움)	비용 (수치가 클수록 고비용)	리스크 감소효과
신규 발전설비 건설	4	5	높음(80%)
재난 발생 시 대응 방안 구축	2	1	낮음(20%)
복원력을 위한 지역간 연계	5	2	보통(50%)

- 리스크 완화방안별 비용, 적용 난이도, 개선효과 등을 고려하여 우선순위를 지정

- TRN 프로그램은 리스크 계획팀을 구성하여 해당 지역을 정기적으로 방문하고, 문헌 조사와 이해관계자와 협업을 통해 계통 복원력 향상을 위한 방안을 강구
- 이렇게 산정된 향상방안은 군사기지와 같은 주요 지역에 우선적으로 적용

< 리스크 완화방안 우선순위 지정 >



\* 출처 : NREL, Energy Resilience Assessment Methodology, 2019

## IV. 국내 복원력 대응현황

### 가. 국내 규제체계 및 복원력 관련 논의 현황

- 국내 계통운영 기준은 「신뢰도 및 전기품질 유지기준」을 통해 계통 신뢰도를 관리함으로써 고장대응 방안과 정전 시 지역별 세부 계통 복구계획을 수립하고 있음
  - 해당 고시에 따르면, 신뢰도는 전력계통의 정상상태 또는 상정사고 발생 시 전력 수요를 충족할 수 있는 공급 적정성과 고장 시 견딜 수 있는 계통 안정성을 의미
  - 또한, 전기 품질, 상정 고장, 계통 운영, 계통 복구, 보호 시스템, 발전·송전·배전 등 설비별 신뢰도에 대한 각각의 기준을 운영하고 있음
    - \* 자체 기동발전기와 우선공급발전기 간 시송전계통 자체기동 능력 점검 등
  - 또한, 전력거래소는 전력시장운영규칙에 의거해 계통의 안정적인 수급균형을 유지하기 위하여 실시간 예비력을 확보·운영하고 있음

< 국내 계통 운영예비력 기준 >

예비력 분류	확보 시간	유지 시간	기준량 (만kW)	비고
주파수 제어	5분	30분	70	AGC*
1차	10초	5분	100	운전
2차	10분	30분	140	AGC
3차	30분	-	140	운전/정지
<b>운영 예비력</b>			450	
속응성 자원	20분	4시간	200	정지

\* 자동발전제어(AGC ; Automatic Generation Control) : 수요변화에 따라 발전기 출력을 자동제어

- 하지만, 국내는 아직 복원력에 대한 논의가 미진하여 복원력의 정의, 가치평가 및 관리·통제 관련 거버넌스 등이 고려되지 못하는 상황
  - 국내는 신뢰도와는 별도로 복원력의 정의가 존재하지 않으며 전력관제 체계 및 자체개선을 통하여 전력거래소와 한국전력이 대응 방안을 마련하고 있으나, 복원력 향상을 위한 법적 제도\* 및 복원력 로드맵 수립과 같은 국가차원의 노력은 부진
    - \* 자연재해 대응 전력차단의 경우, 전력공급약관에 전기공급 중지·제한에 관한 근거 규정은 있으나 명확한 시행 기준이 없어 산불방지를 위한 전기공급 중지에 현실적인 어려움이 존재함

< 전기공급약관 관련규정 >

**제47조(공급의 중지 또는 사용의 제한)** ① 한전은 다음 중 하나에 해당할 경우에는 부득이 전기공급을 중지하거나 전기사용을 제한할 수 있음

3. 한전의 전기설비에 고장이 발생하거나 발생할 우려가 있는 경우
6. 비상재해 및 기타 불가항력으로 인한 경우
7. 기타 전기안전을 위하여 필요한 경우

② 제1항의 경우 그 내용을 신문, 방송 또는 기타 방법으로 미리 고객에게 통지

## 나. 국내 전력관제 체계

### ■ 국내 전력관제(Grid Control)는 전력거래소(KPX)와 한국전력에서 업무범위를 분담하여 수행 중

- 전력거래소는 발전소 · 154kV · 345kV · 765kV 송전망에 대해 전력관제용 소프트웨어 자동화 시스템인 EMS (Energy Management System)를 활용하여 국내 계통운동을 담당
  - \* '송전망 운영에 관한 합의'에서 정한 154kV 송전망은 감시·운동을 한전 계통운영센터에 위임
- 전력 수요와 공급 균형 유지를 위한 발전력 제어 및 최적 배분 (발전제어, 발전계획)
- 평상시 및 고장대비 안전한 전력공급을 위한 전력계통해석 (전력계통해석, 안전도 제어)
- 급전원 (관제원) 훈련용 모의 시뮬레이터 시스템 (DTS ; Dispatcher Training System)

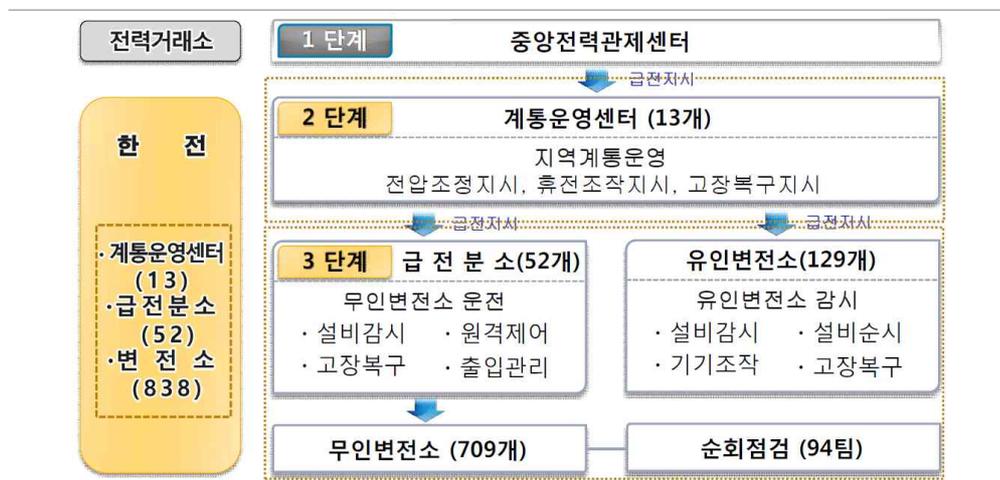
< 전력거래소와 한국전력/발전회사의 업무범위 >



\* 출처 : 한국전기연구원, 우리나라의 전력관제 운영체계에 관한 연구, 2017

- 한국전력은 위임받은 154kV 송전망 및 변전, 배전분야에서 13개 계통운영센터, 52개 급전분소, 129개 유인변전소를 통해서 전압 조정지시, 휴전 조작지시, 고장 복구지시를 포함하는 지역 계통운영 업무를 수행

< 한국전력의 계통운영 체계 >



## 다. 재해/재난 대응체계 현황

- 전력거래소 (KPX)는 재해 / 재난 등에 대응하기 위해 실시간 감시 및 운영 체계인 중앙전력 관제센터를 운영함으로써, 고장 시 조치, 발전기 기동, 송전망 조작, 부하 차단, 발전력 차단, 광역정전 시 자체 기동 발전기 운영 등의 업무를 수행
  - KPX 중앙전력관제센터는 전력 설비에 고장이 발생하면 EMS 및 급전전화를 통해 고장 상황을 인지, 정전 부하와 과부하 발생 유무를 파악하여 과부하 설비의 경우, 즉시 발전기 출력 조정이나, 복구방안(계통운영방안, 휴전승인서)에 따라 EMS 계통 해석 기능 등을 활용하여 계통 복구조치를 수행
    - \* 단, 고장복구에 장시간 소요가 예상될 경우 전력계통 안전성 평가에 의한 전력계통 운영대책을 수립하여 시행하고, 한전의 계통운영센터, 발전소 및 변전소에 전력계통 감시와 운영강화를 지시
  - 또한 전력계통 운영 변화감지 시스템, 기상정보 시스템, 낙뢰정보시스템, 산불 상황 관제 시스템 등을 활용하여 계통에 미칠 수 있는 위험을 사전적으로 대비하고, 위급 상황 발생 시 신속히 대응
- 한국전력 (KEPCO)은 전력설비에 대한 재해 / 재난 대응체계를 강화하기 위해 ① 지역본부 단위 안전재난 전담부서 신설 ② 스마트 재난관리 통합시스템 구축 ③ 자율안전점검 실천 강화 ④ 재난교육 및 훈련 ⑤ 전력설비 점검활동 등을 수행
  - [재난전담부서 신설] '19.5월 지역본부에 안전재난 전담부서를 신설하여 재난관리 체계를 강화, 재해 / 재난 사고로 정전을 초래하는 위기상황 발생 시 빠른 대응과 복구를 위한 업무연속성 관리체계의 전사 확대 구축완료 (국제표준 ISO-22301 인증 취득)
  - [재난관리 시스템 구축] '19.2월 빅데이터, 위치정보 기반 재난관리 통합시스템을 구축하여 실시간 재난 정보 모니터링 및 대응체계를 완비, 태풍 등의 재난상황에 선제적 대응

### < 재난관리 통합시스템 주요 기능 >



\* 출처 : 한전 안전보안처, 2020 한전 지속가능경영보고서 - 재난 대응체계 강화

- **[안전점검 실천]** 선제적 지진방재 대응기반 구축을 위해 전력시설물의 내진 기준을 상향하여 관리하고, 송·변전설비, 변전소 건축물, 송배전 전력구 등에 내진설계를 확대·보강하고 면진(지진으로부터 격리시킴) 시스템 등 내진 신공법과 기준을 도입
  - \* 전력시설물 내진 기준 상향 6.3 → 6.6 (중요시설 7.0), 기존 전력설비 내진보강 100% 달성
  - \* 통신설비 면진 시스템 도입, 내진설계 확대 (박체, 유리 등), 지진력 흡수 및 기능유지 등
- **[교육 및 훈련]** 범정부 차원의 재난대응체계 종합점검을 위해 안전한국훈련에 매년 참여
  - \* 재난대응 안전한국훈련이란 국내 지자체, 소방서 및 군인·경찰 등 유관기관과의 통합연계를 통해 대규모 재난 대비 대응체계를 점검하는 훈련으로, '19년에는 345kV 송전 철탑이 집중호우 및 지진에 의해 넘어졌다 등의 대규모 정전이 발생하는 재난상황을 가정하여 설비 복구훈련을 시행
  - 이 밖에도 전력수급, 자연재난, 사이버테러, 전력계통고장 등 재난유형별 자체 훈련을 수시로 시행하고, 안전관리 담당자의 전문성을 제고하기 위해 교육을 진행
- **[전력설비 점검]** 경영진을 포함한 특별 점검팀을 구성하여 자연재해 발생 시 피해가 우려되는 지역의 전력설비를 전수조사하고 위험요인을 정비·보강하는 활동을 수행
  - \* 특히, 태풍과 집중호우에 대비하여 빗물 펌프장과 배수장의 공급선로 등을 집중 점검
- **지자체에서는 한국전력과 협력하여 사전적으로 계통 복원력을 향상시키려는 노력을 추진**
- 울산시는 재난 대비 정전대책 및 대응계획을 통해 전력부문 설비에 대한 사전 정비 및 설비 내구성 강화를 추진 (울산시·한전 재난 대비 정전대책 및 대응계획 보고회, '20.10)
  - 배전선로 근접 수목전지작업 강화, 단계적 선로 지중화 사업 적극적 검토 등

< 한전 울산지사 2021년 지중화 시행예정 지역 >



- 강풍에 따른 이물접촉 예방을 위한 순시 강화, 태풍 등 강풍 대비 내구성 강화
- 해안가 같은 강풍 취약지역 및 주요 배전선로\*에 과학화진단 및 설비보강 시행
  - \* 변전소인출 선로, 전원측 간선, 부하밀집지역과 같이 고장발생 시 영향이 큰 배전선로
  - \*\* 열화상 및 영상초음파, 광학카메라 등을 활용하여 노후전선 교체 및 장주형태 변경(내장형) 시행



\* 출처 : 한전 부산울산본부, 재난대비 정전대책 및 조치계획, 2020

## V. 결론 및 시사점

- 미국 전력산업 이해관계자들을 중심으로 재해·재난사고가 빈번해지고, 간헐성 자원이 증가함에 따라 계통 복원력에 대한 논의가 진행 중

< 복원력 향상을 위한 기관별 동향과 관점(의견차이) >

기관	동향 및 관점
DOE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 복원력 향상에 대한 금전적 보상의 필요성을 제기</li> <li>• 지역별 리스크 평가, 복원력 향상의 우선순위 방안과 같은 복원력 가치평가 연구를 지원</li> </ul>
FERC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 복원력의 필요성을 인식하고 지역별 계통운영자와 협업을 통해 복원력의 개념 정의부터 향상 방안까지의 논의를 진행</li> <li>• 신뢰도와 복원력의 차이를 제시하고 향후 조치 여부를 고려</li> </ul>
NERC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기존 신뢰도 개념에 복원력이 포함된다는 입장을 표명하고, 신뢰도 관리 체계 안에서 복원력을 관리하려 시도 및 노력</li> </ul>
州 정부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 복원력 로드맵 등의 규제 정책을 마련하여 복원력 향상 노력</li> </ul>
RTO/ISO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 복원력의 보상방안 및 평가방안을 연방에너지규제위원회에 요청</li> <li>• 규제를 받는 계통운영자(RTO/ISO)의 입장에서 신뢰도 기준으로 복원력을 고려할 수 있다는 입장이 대다수</li> </ul>
유틸리티	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공급 측면의 연료 확보 및 보안·재난 대응전략을 수립하고, 복원력 향상을 위한 기업 차원의 지속적인 실증 투자 등을 계획</li> <li>• 복원력의 개념에 대한 논의보다는 전력계통의 재해·재난에 대한 대응력을 강화하는 방안에 집중</li> </ul>

- 국내 역시 기후 환경적 변화에 따라 복원력의 필요성이 높아지고 있으나, 논의가 미흡한 상황이며, 복원력에 대한 논의와 연구를 본격적으로 진행해야 할 필요성이 커지고 있음

- 최근 대규모 자연재해의 지속적 발생과 같이 재해·재난이 증가하는 추세
  - \* 고성 산불('20.5월), 태풍 마이삭('20.9월), 하이선('20.9월) 등
- 또한 간헐성을 갖는 재생에너지의 전원비중이 증가함에 따른 전력계통의 안정성 저하\* 및 전력 수입(Import)이 불가능한 고립계통 특성으로 인한 재해·재난에 대한 대비 필요성이 커지고 있음
  - \* 계통 관성의 하락 및 기상예측 불확실성으로 인한 전력공급 위험 가중

< 향후 복원력 관련 연구 주요 이슈 >

- 국내 전력계통의 환경(신재생 전원비중 확대, 고립계통) 하에서 재해·재난의 증가 추세를 고려한 복원력의 개념 정의
- 복원력의 가치평가 방법론 및 복원력 향상 투자에 대한 보상 방안
- 복원력 향상을 위한 국가차원의 중장기 계획(복원력 로드맵)

## 【참고문헌】

- ▶ (2020) NARUC, "Advancing Electric System Resilience with Distributed Energy Resources: A Review of State Policies"
- ▶ (2020) BY MARK DYSON AND BECKY LI, "Reimagining Grid Resilience"
- ▶ (2020) 한국전력, 지속가능경영보고서, 한전 부산울산본부, 재난대비 정전대책 및 조치계획,
- ▶ (2020) 전력거래소, "수급운영 환경 변화에 따른 실시간 예비력 운영 현황"
- ▶ (2019) ECOLOGY LAW QUARTERLY, "Federal Regulation for a "Resilient" Electricity Grid"
- ▶ (2019) NREL, "Energy Resilience Assessment Methodology"
- ▶ (2019) World Bank, "Improving Power Sector Resilience to Natural Hazards"
- ▶ (2019) 한국전력 경영연구원, "美 캘리포니아주의 선제적 전력차단제도 및 시사점"
- ▶ (2018) FERC, "Grid Resilience in Regional Transmission Organizations and Independent System Operators, Docket Nos. AD18-7-000"
- ▶ (2018) NERC "Comments of the North American Electric Reliability Corporation(AD18-7)"
- ▶ (2018) NERC, "Reliability Issues Steering Committee"
- ▶ (2018) NERC, "Comments of the North American Electric Reliability Corporation(AD18-7)"
- ▶ (2018) 국가과학기술심의회, "제3차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획안", 기상청, 재해연보
- ▶ (2017) FERC, "Grid Reliability and Resilience Pricing' Docket Nos. Rm18-1-000"
- ▶ (2017) 한국전기연구원, "우리나라의 전력관제 운영체계에 관한 연구"
- ▶ (2010) NIAC, "A Framework for Establishing Critical Infrastructure Resilience Goals"
- ▶ (2007) NERC, Definition of "Adequate Level of Reliability"

작성자 : 한전 경영연구원 조호진 인턴연구원

## 균등화발전비용(LCOE) 국제 동향

\* BNEF ('20.4), IRENA ('20.6)

### BNEF (1H 2020 LCOE Update)

- 태양광과 풍력은 전 세계 많은 국가에서 가장 저렴한 전원으로 자리 잡았으나, 우리나라는 세계 평균 대비 약 2배 이상 높은 수준
- 신재생 발전설비 부품 가격하락과 효율 개선, 경매로 인한 경쟁압력 증대, 프로젝트 규모 확대는 신재생발전 LCOE 하락 요인으로 작용

### 1. 신재생발전 LCOE 현황

- 2020년 상반기 태양광과 육상풍력 LCOE는 평균 \$50/MWh 이하 수준으로, 전세계 인구의 2/3, GDP의 72%, 전력소비량의 85%를 차지하는 국가들에서 가장 저렴한 전원
  - (태양광) 전 세계 평균은 2019년 하반기와 비교해 고정식 태양광은 4% 하락한 \$50/MWh, 추적식 태양광은 17% 하락한 \$39/MWh 수준에 도달
  - (육상풍력) 터빈 대형화와 가격하락에 힘입어 2019년 하반기 대비 9% 하락한 \$44/MWh에 도달하였으며 지난 반년간 낙폭은 2015년 이후 최대치 기록
  - (해상풍력) 2019년 하반기와 동일한 \$78/MWh를 유지하였으며, 지속적인 시장 확대로 2030년까지 41% 하락 전망
- 한국은 태양광(고정식) \$106/MWh, 육상풍력 \$105/MWh로 세계 평균 대비 약 2배 수준

< 세계 신재생 LCOE 추이 (\$/MWh, 2019 real) >



< 국가별 가장 저렴한 발전원 >



\* 출처 : BNEF, 1H 2020 LCOE Update, '20

< 주요국 신재생발전 평균 LCOE 비교 (\$/MWh) >



## 2. 전통발전 LCOE 현황

- 석탄은 한국, 일본 및 대부분의 동남아 지역에서 가장 저렴한 발전원으로 이용되고 있으나 2025년경에는 재생에너지가 그리드패리티에 도달할 것으로 전망
- 전통화력발전 LCOE 세계 평균은 석탄 \$61/MWh, 가스 \$70/MWh이며, 우리나라는 세계 평균과 비슷한 석탄 \$62/MWh, 가스 \$85/MWh 수준

< 주요국 전통발전 평균 LCOE 비교 (\$/MWh) >



- 중국 경제성장 둔화, 코로나19 대유행 등의 요인으로 글로벌 시장에서 석탄, 가스 가격이 하락하여 신규 신재생발전설비 대비 기존 전통발전설비 경쟁력이 상대적으로 증대

## 3. 신재생발전 LCOE 하락 요인

- 기술 발달에 따른 태양광, 풍력 발전설비 부품 가격하락과 효율 개선으로 발전비용 감소
  - 2020년 상반기 태양광 모듈 가격은 \$21만/MW로 2019년 하반기 \$26만/MW에 비해 19% 감소하였으며, 모듈 효율성 증대에 따라 설비가 소형화되고 건설단가 하락
  - 육상풍력 터빈 가격은 2020년 상반기 \$70만/MW 수준이며, 프로젝트당 평균 터빈 크기는 4.1MW로 2019년의 3.1MW에 비하여 대형화
- 신재생발전 경매로 인하여 태양광 및 풍력 발전비용 절감 압력 발생
  - 2019년 전 세계에서 약 78GW 규모의 신재생발전 경매가 이루어졌으며, 이 가운데 태양광이 51GW, 육상·해상풍력이 26GW를 차지
  - 신재생발전 경매는 가치사슬 전반에 걸쳐 경쟁을 유발하여 개발자, 설비 제조업체, O&M 제공업체 등의 참여자에게 원가절감을 하도록 유도
- 신재생발전소 건설 프로젝트 규모 확대는 ‘규모의 경제’로 이어져 LCOE 하락을 견인
  - 유틸리티 스케일 태양광 프로젝트 평균 규모는 2010년 6MW에서 2019년 27MW로 급성장하였으며, 육상풍력도 2010년 32MW에서 2019년 73MW로 증대
  - 태양광, 풍력 산업이 확장기를 거쳐 안정기에 접어들면서 프로젝트 수는 감소하는 반면에 단위 프로젝트 규모는 대형화되는 추세

## IRENA (Renewable Power Generation Costs in 2019)

- 2021년 태양광·육상풍력의 경매가격은 다수 기존 석탄발전의 운영비용보다 낮을 전망
- 2019년 신규 태양광·풍력발전 투자규모는 2,124억 달러로 2010년 대비 1.4배 증가
- 2019년 전 세계 신재생 LCOE 평균은 태양광 \$68/MWh, 육상풍력 \$53/MWh, 해상풍력 \$115/MWh로 2010년 대비 최대 82%(태양광) 하락

- 태양광, 육상풍력의 경매가격은 꾸준히 하락하여 2021년 이후에는 기존 석탄발전소의 운영비용보다 저렴한 수준에 도달할 것으로 전망
  - 2021년에 가동예정인 전 세계 신규 신재생 프로젝트 평균 경매가격은 유틸리티 규모 태양광이 \$39/MWh이며, 육상풍력의 경우 \$43/MWh
  - 2021년 전 세계 2,000GW 규모의 석탄발전소 가운데 약 1,200GW는 태양광 경매가격보다 운영비가 비싸며, 약 850GW는 육상풍력 경매가격에 비해 높을 것으로 추정됨
- 2010년 이후 신재생 발전설비 누적 규모가 2배로 늘어날 때마다 평균 LCOE 감소율은 해상풍력 10%, 육상풍력 29%, 유틸리티 규모 태양광 40% 수준
- 태양광, 풍력 발전에 대한 투자액은 2010년 1,495억 달러에서 2019년 2,124억 달러로 증가
  - 같은 기간 신규 태양광 설비 구축 규모는 17.5GW(2010년)에서 97GW(2019년), 풍력은 31GW(2010년)에서 58GW(2019년)로 확대

< 세계 신규 신재생 발전설비 투자규모 추이 (십억 달러) >



- 2010년 대비 2019년 신재생 프로젝트 구축단가 하락 폭은 유틸리티 규모 태양광이 4.7배로 가장 크며, 분산형 태양광 3.1배, 육상풍력 1.3배, 해상풍력 1.2배 순

< 십억 달러 투자 시 구축 가능한 설비용량 (MW) >

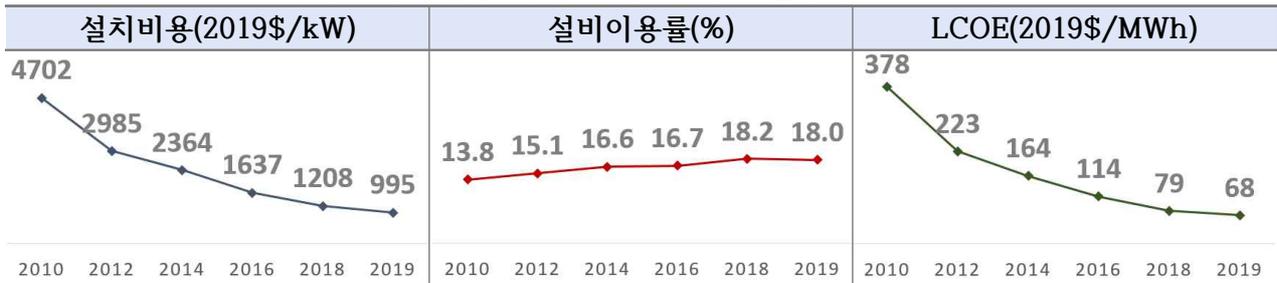
태양광(유틸리티 규모)		태양광(분산형)		육상풍력		해상풍력	
2010년	2019년	2010년	2019년	2010년	2019년	2010년	2019년
213	1,005	196	603	514	679	215	263

□ (태양광) 세계 평균 LCOE는 2010년 \$378/MWh에서 2019년 \$68/MWh로 82% 하락

○ 태양광 모듈 가격은 2009년에서 2019년 사이 90% 하락하여 LCOE에 영향

○ 모듈과 인버터를 제외한 BOS(Balance of System) 비용은 총설치비의 64%를 차지

< 세계 태양광(유틸리티 규모) 주요 지표 변화 (2010-2019) >



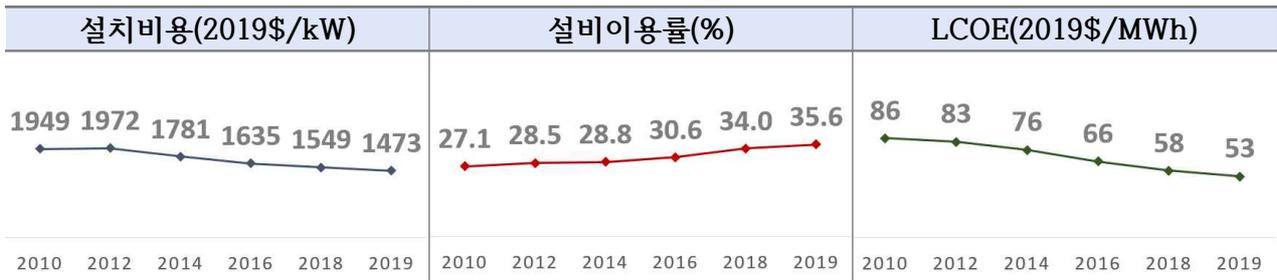
\* 한국 태양광 LCOE(2019\$/MWh) : 502(2010) → 91(2019)

□ (육상풍력) 세계 평균 LCOE는 2010년 \$86/MWh에서 2019년 \$53/MWh로 39% 하락

○ 터빈 평균가격은 2019년 \$850/kW로 2009년에 비해 65% 하락

○ 2019년 육상풍력 설치비용은 지역에 따라 \$1,055/kW(인도)에서 \$2,368/kW(아시아 기타 지역)로 차이가 큼

< 세계 육상풍력 주요 지표 변화 (2010-2019) >



□ (해상풍력) 세계 평균 LCOE는 2010년 \$161/MWh에서 2019년 \$115/MWh로 29% 하락

○ 터빈 대형화, 블레이드 길이 증가, 풍황이 우수한 지역 확보 등의 영향으로 해상풍력 설비이용률은 2010년 36.8%에서 2019년 43.5%로 향상

< 세계 해상풍력 주요 지표 변화 (2010-2019) >



작성자 : 한전 경영연구원 김범규 선임연구원

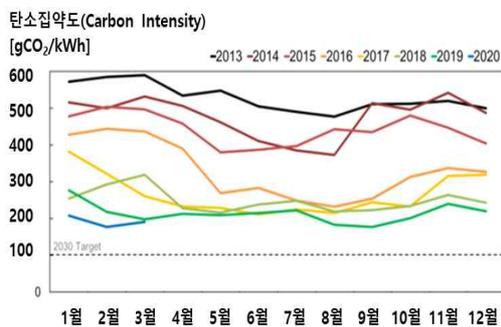
## 영국의 계통 안정도 제고를 위한 프로젝트 진행 현황

\* Current ± 외 ('20.7)

- 영국은 2050년 탄소중립 달성을 목표로 하고 있으며, 발전 전원 믹스 내 재생에너지 비중 증가<sup>6)</sup>에 따른 계통 안정도 확보를 위해 프로젝트(Stability Pathfinder) 진행 중
  - Drax Group은 양수발전을 활용한 전력시스템 안정성 제공서비스 첫 시작('20.7)
- 영국은 계통 관성을 제공해 오던 기존 화전기 기반의 석탄 발전기가 전력전자 기반의 재생 에너지 발전기로 대체됨에 따라 계통 관성 및 회복력(Resilience) 저하 관련 문제점을 인식
- 정부의 탈석탄 정책과 강한 환경 규제로 탄소 집약도(Carbon Intensity)는 큰 폭으로 감소하였으나, 계통 관성(Inertia) 및 회복력 저하 등 계통의 강건도 및 안정도 문제 우려

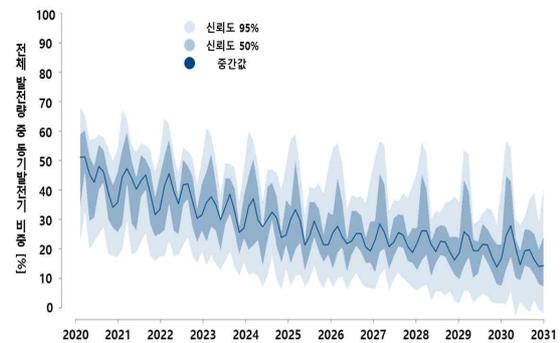
< 영국 Carbon Intensity 추이 >

< 동기(synchronous) 발전량 비중 전망 >



59.4% decrease from 2013 to 2019

2013	529 gCO <sub>2</sub> /kWh
2014	477 gCO <sub>2</sub> /kWh
2015	443 gCO <sub>2</sub> /kWh
2016	330 gCO <sub>2</sub> /kWh
2017	266 gCO <sub>2</sub> /kWh
2018	248 gCO <sub>2</sub> /kWh
2019	215 gCO <sub>2</sub> /kWh
*2020	192 gCO <sub>2</sub> /kWh



\* 출처 : National Grid ESO, National Grid ESO-Operability & Future Inertia Trends, '20

- '19년 8월 발생한 최대규모의 정전사고로 시스템의 안정적 운영에 대한 중요성 인식 강화
- (개요) '19.8.9. 17시경 약 50분간 잉글랜드, 웨일스, 스코트랜드 일부 지역 정전 발생
  - (원인) 낙뢰 이후 전력 공급의 손실 규모(2.67GW)가 계통 보호 시스템 및 예비력으로 책정된 용량을 초과하여 계통 보호 목적의 1GW 부하 차단 (저주파수 수요 차단 동작)
  - \*\* 낙뢰로 인한 전원 분리 및 공급감소가 갑작스럽게 동시에 발생해 예기치 못한 사고로 분석
  - (정부의 조치) 영국 계통 신뢰도 규정(Security and Quality of Supply Standard) 재검토를 통해 계통 주파수 및 전압 관련 회복력 수준 확인 지시

→ 영국 NG(National Grid) ESO\*는 전원믹스 변화에 따라 저하된 계통 안정도 제고를 위해 Stability Pathfinder 프로젝트를 수행하고 있으며 현재 1단계 종료 후 2단계 진행 중

\* NG ESO : 영국 National Grid(NG)는 전력망 운영부분(SO)을 법적 분리하여 NG ESO 발족

6) 기후변화위원회는 2050년 탄소중립 달성을 위해 재생에너지 비중을 57%까지 늘리는 시나리오 제시

< 영국 National Grid ESO의 계통 안정도 해결방안 흐름도 >



□ 계통 안정도 제고를 위한 Stability Pathfinder 프로젝트 추진

- (목표) 빠른 설치가 가능하며 비용 효율적인 안정도\* 제공 자원 발굴 및 모집
  - \* 안정도 요소 : 관성(Inertia), 동적 전압 안정도(Dynamic Voltage), 고장 시 전압유지능력(Short Circuit Level)
  - 기존에는 계통 관성 제고를 위해 출력을 내는 동기 발전기의 출력 감소 후 **balancing 모드로의 전환이 필요**하여 비효율적이고, 높은 비용 부담으로 작용
    - ☞ 발전 출력이 0인 (Zero MW firm) 동기 발전기 (Synchronous Tech.) 자원을 활용
- (진행 방식) National Grid ESO는 입찰을 통해 TO(Transmission Owner), DNO(Distribution Network Operator) 또는 기타 Solution Provider에게 안정도 서비스의 제공권 부여
  - 선정기준 : 계통 관성 및 전압 안정도를 위한 무효전력 제공 능력, 전력 출력량
  - 결과 및 현황 : 5개 회사(Drax, Statkraft, Triton, Welsh Power, Uniper) 낙찰
    - 6년 계약으로 총 계약금액은 £328m(4,911억원) 규모이며, 12.5GVAs\* 관성 제공 예상
    - \* 12.5GVAs은 기존 석탄발전 5기가 제공했던 관성 용량과 동일한 규모
- (향후 계획) 기존 1단계는 GB(Great Britain) 지역 안정도를 중심으로 진행되었다면, 2단계는 신기술\*을 사용하여 스코트랜드 등 영국 전역의 계통 안정도 제고로 확대
  - \* 신기술 : HVDC(High Voltage Direct Current), ESS(Energy Storage System) 등

□ Drax는 보유 중인 Cruachan 양수발전소를 통해 해당 프로젝트의 첫 서비스 개시('20.7.15)

- 서비스 기간 6년 동안 이를 통해 전기사용자는 £128m(1,909억원)의 전기요금 절감 가능
- Welsh Power는 '21년 하반기 중 플라이휠 및 동기조상기를 이용하여 서비스 개시 예정
  - \* 플라이휠 : 전기에너지를 플라이휠의 회전 운동 에너지로 변환하여 저장하는 장치
  - \* 동기조상기 : 동기전동기를 무부하로 운전하면서 여자전류를 조정 시 역률 조정 가능

작성자 : 한전 경영연구원 김종인 일반연구원

## 재생에너지 증가에 따른 Virtual Power Lines 추진 동향

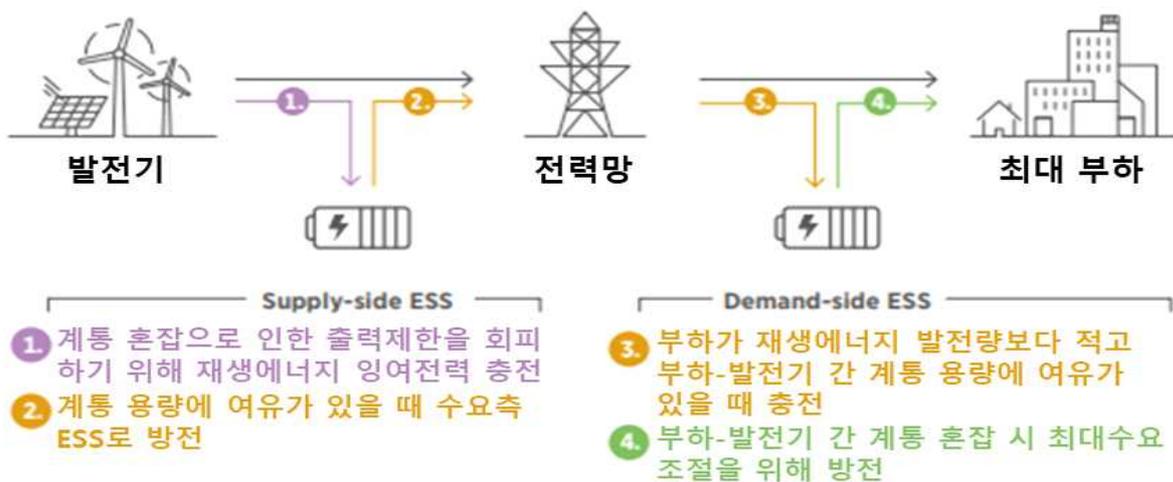
\* IRENA (20.7)

- 미국, 유럽 등 재생에너지 연계 시 전력망 혼잡 완화를 위한 방안으로 Virtual Power Lines를 추진하고 있으며, 이를 통해 계통의 효율적 운영 및 비용 절감 기대
- VPL 도입을 위해 ESS의 운영과 소유에 대한 규제 개정 및 기술적 조건 검토와 계통운영자의 역할과 책임 확립 필요

### 1. Virtual Power Lines(VPL) 개념

- VPL은 재생에너지 증가에 따른 송배전망의 혼잡을 완화하기 위한 새로운 대응방안으로 계통의 효율적 운영 및 비용 절감을 목표로 도입
  - (기존 방식) 추가 전력망을 신설하거나 기존의 전력망을 보강하여 선로 용량을 확보하는 방식으로 많은 비용이 소모됨
  - (신규 방식) 전력망 보강 또는 신설 대신 에너지저장장치(ESS)를 계통의 특정 지점에 연계하여 기존 망 인프라를 보조하고, 계통의 신뢰도 성능 강화
- VPL을 위한 ESS는 공급지역과 수요지역에 설치되며 계통 혼잡 해소 역할 수행
  - (공급지역) 계통 혼잡으로 계통에 투입할 수 없는 재생에너지 발전원의 잉여전력을 저장하기 위해 발전원 인접 지역에 설치
  - (수요지역) 송전 용량에 여유가 있을 때 충전하기 위한 경우로 수요지 근처에 설치 후 송전 용량 한계 도달 시 방전하여 수요에 전력 공급

#### < VPL의 개념 >



\* 출처 : IRENA, Virtual Power Lines, 2020

## 2. 전력부문 개선을 위한 VPL의 핵심 역할

### ① 변동성 재생에너지(VRE)의 출력제한 감소

- 계통 혼잡 시 재생에너지의 잉여전력을 ESS에 저장하여 출력제한을 해소함으로써 계통보강, 수요반응 등 기존의 계통 혼잡 대응방안의 단점 보완

#### < 기존 계통 혼잡 대응방안의 단점 >

구 분	내 용
계통보강	계통 보강은 시행하는데 상당한 시간이 필요하고, 주민 수용성이 문제 되며, 계통 혼잡이 드물게 발생하기 때문에 상대적으로 비용효율이 낮음
급전계획	계통 혼잡 시 발전기를 차단, 혼잡 해소 후 발전기를 투입하는 방식으로 이 경우 차단된 발전기에 대해 보상 필요
수요반응	계통운영자와 소비자 간의 연계를 통해 계통 혼잡을 완화할 수 있으나 기술적 및 경제적 과제가 남아있음
출력제한	출력을 제어할 수 없는 재생에너지 발전기의 접속 차단

### ② 전력망 보강보다 더 신속하고 유연한 해결책

- 기존의 전력망 보강은 장기간 소요되어 수요와 발전량 변화에 신속히 대응하지 못함
- ESS는 계통 혼잡에 즉시 대응할 수 있고, 송전망 보강비용보다 ESS의 비용이 적을 경우 작은 용량의 ESS로 송전망 보강 회피 가능
- ESS는 송배전망과 변동성 재생에너지 설비의 효율성을 높일 뿐만 아니라, 철탑 및 선로와 달리 모듈형으로써 필요한 규모에 맞게 설치 가능

#### < 전력망 보강의 문제점과 VPL의 장점 >

전력망 보강의 문제점	VPL의 장점
승인 및 개발 과정의 장기계획	수개월 내에 ESS 설계, 설치 및 운영 가능 전력망 보강 연기 또는 계획단계 중 계통회복력 제공
부하증가율 및 패턴의 불확실성	ESS는 모듈 구조로 필요한 용량만 소규모로 증설 가능
송전 용량 증가의 단일 기능	ESS는 주파수 조정, 전압 조정, 예비력 등 다양하게 활용하여 발전기 매출 증가 및 계통 운영비 감소에 기여
지역 사회 반대	ESS는 송전선로보다 소형으로 설치 가능하여 반대 감소

### ③ ESS를 활용하여 계통에 추가 서비스 제공

- ESS를 통해 무효전력을 공급하고, 계통운영자가 선로 고장 또는 재난 발생 시 정전 예방으로 계통 성능 유지
- VPL로 주파수 반응에 빠르게 대응하여 보조서비스를 제공하고, 첨두 가스 발전기 대체 가능
- 기존 석탄발전기가 제공해 왔던 시스템 관성(Inertia) 제공

### 3. VPL 도입을 위한 필수 조건

#### ① ESS 소유 및 운영에 대한 규제체계 수립

- ESS의 운영 및 소유권과 관련하여 ESS가 시장 참여 설비인지, 전력망 설비인지에 대한 명확한 기준 수립 필요
  - ESS가 시장 참여 설비로 분류되는 경우, 송배전망 운영자는 계통 보강 회피를 위한 ESS의 소유 또는 운영이 제한될 수 있음
  - ESS가 전력망 설비로 분류되어 VPL로 사용되는 경우, 경쟁 시장환경에서 서비스를 제공할 수 있는 자격이 부여되지 않을 수 있음

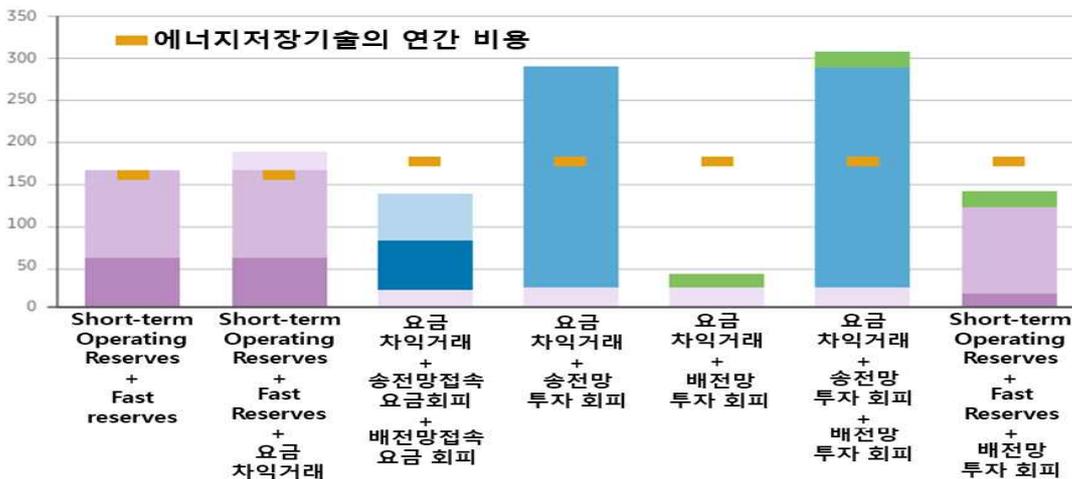
#### ※ ESS 관련 규제 개정 사례<sup>(19)</sup>

- (EU) ESS가 유연성 자원으로 시장에 참여하는 신규 규제체계 수립
- (호주) 에너지안보위원회(ESB)는 ESS에 대한 인센티브 등 규제 재설계
- (미국) 연방에너지규제위원회(FERC)는 ESS가 발전자원으로서 도매, 보조서비스 및 용량 시장에 참여하기 위한 시장규칙 수립 추진

#### ② ESS를 활용한 멀티-서비스 시행

- 다수의 ESS를 활용하여 다양한 이해관계자들이 VPL을 소유, 개발, 관리, 운영하는 형태의 멀티서비스를 제공하여 사회적 가치를 최대화
- ESS를 계통 혼잡 완화뿐만 아니라 주파수와 전압을 조정하는 보조서비스 및 밸런싱 서비스에 활용함으로써 수익성 확보
  - 각각의 서비스별 단일 용도로만 활용할 경우 ESS의 이용률이 낮아지고 매출 감소

< 영국 ESS 활용 방안에 따른 비용/편익 (£/MWh) >



\* Short-term operating reserve : 수요예측 오차나 갑작스런 발전기 고장에 대비하기 위한 예비력

\* Fast reserve : 단시간 내 수요변화 등 계통운영자가 예측하기 어려운 상황에 제공되는 예비력

### ③ VPL로 활용하기 위한 ESS의 디지털화

- AI를 활용한 에너지관리시스템을 통신시스템과 함께 적용하여 더 나은 예측과 의사 결정으로 ESS 관리
- 다양한 서비스 사업에 있어서 ESS 운영에 참여하는 여러 사업자 간의 통신이 핵심
- 배터리와 계통운영자 간의 안전한 통신을 위해 상호운용성 기준의 확보 필요

## 4. VPL 프로젝트 추진 현황

- 현재 여러 국가에서 실증 사업을 추진 중이며, 배터리 가격이 지속해서 하락할 것으로 전망됨에 따라 VPL과 ESS 설치가 확대될 것으로 예상

< 국가별 ESS 실증 사업 사례 ('20) >

국가	사업주체	세부내용
프랑스	RTE (TSO)	재생에너지의 계통연계 확대 및 전력망 최적화를 목적으로 36MW/72MWh 규모의 VPL 프로젝트(RINGO) 실증
미국	PG&E	계통 혼잡을 완화하기 위해 지역 송전계획 수립 시 송전 솔루션의 일부로 10MW 규모 ESS 프로젝트 추진
이탈리아 <sup>(15)</sup>	Terna (TSO)	변동성 재생에너지 출력제한 급증과 계통 혼잡을 줄이기 위해 34.8MW/250MWh의 ESS를 설치했으며, 보조서비스에도 활용
호주	Lyon Group	계통보강 비용 절감과 15%의 송전 용량 추가 확보를 위해 기존의 HVDC 선로에 180MW/720MWh의 ESS 설치

## 5. ESS 활용을 위한 요구사항 : 체크리스트

기술적 사항	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 계통 혼잡 규모와 필수 서비스 제공을 위한 ESS의 기술적 요구사항 충족</li> <li>○ 배터리와 전력망의 최적화를 위한 제어 시스템</li> <li>○ ESS와 계통운영자 간의 협력을 위한 상호운용성 기준</li> </ul>
규제 사항	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ VPL의 소유권과 운영권에 관한 명확한 규정</li> <li>○ VPL의 비용을 반영한 보상 정책</li> <li>○ ESS 활용 멀티서비스 사업이 가능하도록 규제 개정</li> <li>○ 계통운영자가 계통 계획 시 ESS를 망 보강용으로 고려할 수 있도록 개정</li> </ul>
계통운영자의 역할 및 책임	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ ESS를 활용한 VPL의 효과를 평가하기 위해 더 많은 실증 사업에 투자</li> <li>○ 계통 계획 절차에 ESS 고려</li> <li>○ 계통 혼잡 완화를 위해 ESS의 운영 시행</li> </ul>

작성자 : 한전 경영연구원 황재홍 일반연구원

## 미국 대선결과에 따른 에너지기후변화 정책의 영향

\* New York Times 외 (20.7)

### 1. 바이든·민주당의 에너지·기후변화 정책 내용

- **핵심내용 : 2050년까지 100% 청정에너지 경제와 탄소중립 달성을 위해 10년간 연방정부 1조 7천억 달러와 민간, 지방정부 투자를 포함한 5조 5천억 달러 투자**

- 취임 첫째, 의회에 아래 사항을 포함한 입법 요구

- 2050년 탄소 중립 목표달성을 위한 이행준수 메커니즘 수립
- 에너지 및 기후 관련 R&D와 혁신에 역대 규모의 투자
- 경제 전반에 걸쳐 청정에너지 혁신 신속 도입 장려

- 지금까지 대선 후보 중 가장 강력한 것으로 평가(버락 오바마, 힐러리 클린턴보다 급진적이고 상세)

#### □ [에너지] 2035년까지 전력부문 탄소배출 제로 및 청정에너지 산업 일자리 창출

- 태양광·풍력 확대 : 5년 이내 태양광 패널 5억 개, 태양광 지붕 800만 개, 풍력터빈 6만 개를 설치하고, 2030년까지 해상풍력 2배 확대, 바이오 연료 발전소 건설
- 전력부문 혁신과 전기화가 21세기 고용 및 경제적 기회 창출의 가장 큰 원동력
- 에너지효율 및 청정에너지 산업 일자리 창출에 대한 세제 혜택 확대
- '기술 중립적 에너지효율성과 청정전기표준(EECES\*)' 수립
  - \* technology-neutral Energy Efficiency and Clean Electricity Standard
- 탄소배출 제로 에너지로서 미래형 원전에 관한 연구 진행

#### □ [R&D] ARPA-C\* 설립 등 청정에너지와 기후변화 R&D에 10년간 4천억 달러 투자

\* Advanced Research Projects Agency focused on Climate

- 기후 관련 최첨단의 혁신적 기술 연구를 통한 100% 청정에너지 목표 달성
- ARPA-C의 중점연구 분야 : 그리드 규모의 차세대 에너지저장장치, 소규모 모듈형 원자로, 제로 에너지 빌딩, 재생에너지 활용 수소생산, CCUS 등 탄소 감축 기술

#### □ [기후변화] 파리협정 재가입 등 미국 중심의 국제공조 강화

- 기후 세계정상회의를 소집해 주요 탄소 배출국에 기존 감축 목표 초과 달성 촉구
- 청정에너지 수출 및 기후 투자 이니셔티브 발의 : 파리협정에서 높은 감축 목표를 제시한 국가들과 파트너십 강화
- 무역정책과 기후·환경 문제 연계 : 감축 미이행 국가의 탄소 집약적 상품에 수수료 부과, 무역협정 시 파리협정 목표 반영

- 취임 첫해 미국 화석연료 보조금 삭감 및 중국 포함 전 세계 화석연료 보조금 금지 요구
- 중국의 석탄 수출 지원 및 탄소 아웃소싱 방지
  - 美-中 탄소감축 양자협정 체결 : 중국의 화석연료와 탄소배출이 많은 기술의 수출보조금 금지
  - G20·IMF 등 국제 협의체 및 기구를 통해 중국의 일대일로 관련 국가들의 탄소 감축 유도
- 美 상장기업들의 기후 리스크 및 영업활동 과정에서의 탄소 배출량 공개 의무화
- 국가안보 문제와 기후변화 문제 연계
  - 기후변화는 국가안보의 기존의 지정학적, 기상적 위험을 확대하는 위협
  - 녹색기후기금(Green Climate Fund) 지원 재개 및 개발도상국에 green debt relief\* 제공
    - \* 감축약속을 하는 개도국에 대해 부채감면
- 개도국이 기후변화 영향(분쟁, 이주 등)에 더 잘 대처함으로써 미국의 안보 강화

□ [환경정의] 환경 양극화(Climate Gap) 해결 및 기후변화 대응력 강화

- 환경오염과 기후변화의 피해는 저소득층·소수자·원주민·유색인종에 집중되어 불평등 심화
  - 환경보호청(EPA)과 사법부를 통해 환경오염 행위에 대한 법적 책임 강화
  - 청정에너지 사업 관련 혜택을 취약계층에게 우선 지원(일자리 등)
  - 기후적응(Climate adaptation) 의제를 설정하여 자연재해 대비 및 복구체계 구축

※ 지속 가능한 **친환경 인프라**를 구축하기 위해 **4년간 연방 재정 2조 달러** 투자

교 통	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 자동차, 철도, 해운, 항공 등 교통 부문에서 <b>전기화와 탄소 감축 추진</b></li> <li>- 자동차 : 전기차 보급 확대 및 관련 기술개발 가속화</li> <li>✓ 2030년까지 <b>50만 개 전기차 충전소</b> 신설, <b>전기차 구매 세제 혜택</b> 확대</li> <li>- 철도 : 2차 철도혁명 (철도 시스템 전기화 및 탄소배출 감축)</li> <li>- 버스 : 2030년까지 탄소배출 제로 달성 (스쿨버스 50만대 포함)</li> </ul>
건 물	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 에너지효율 기준 개선 및 강화 : 2035년까지 <b>건물 탄소배출 50% 감축</b></li> <li>▪ 2030년까지 모든 신축 상업용 건물에 새로운 탄소 배출량 기준 적용</li> <li>▪ <b>에너지효율 주택 150만 호</b> 신축 및 400만 개 건물 개선</li> </ul>
산 업	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 저탄소 제조업 육성 : 첨단기술 도입과 설비개선을 위한 세제 혜택, 보조금 지원</li> </ul>
일 자리	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 에너지전환 전 분야 및 주기에 걸쳐 새로운 일자리 창출</li> <li>▪ 환경보호와 경제성장 및 고용 창출 양립 가능</li> <li>▪ 전통 발전원(화석연료) 부문 산업 종사자와 지역사회 지원</li> </ul>

## 2. 대선 결과에 따른 정책변화 전망

### □ 기후변화 : 트럼프 행정부의 에너지·환경 관련 폐지 규제 복구

- 탄소배출 감축 목표 초과 달성이 강력히 요구되는 등 파리협정이 관세장벽을 포함해 산업 전반에 걸쳐 규제의 역할을 할 가능성이 커짐
  - 민주당은 광범위한 기후법안을 통과시키려 하기보다 다수의 세부 법안을 제정함으로써 정책목표를 달성하고자 노력할 것으로 보임
  - 화석연료 의존도 감축 : 미국 내 화석연료 수요는 위축 가능성이 있으나, 수출장벽 해소 및 국제유가 등 시장여건에 따라 개발·생산·수출이 이루어질 것
    - 단, 석유·가스 부문 메탄 규제, 대서양 및 북극 시추 규제 등 관련 규제정책 강화 가능성이 커 생산활동 위축 또는 비용 상승 논란 예상
- ⇒ 탄소세 문제 포함, 석유·가스 업계 및 공화계 주 정부의 저항 등 난관 예상

### □ 신재생에너지 및 신산업 : 그린산업 시장 팽창 전망

- 신재생에너지의 경제성이 획기적으로 개선될 때까지, 일몰될 세액공제제도를 대체할 정부 지원정책 지속과 낮은 천연가스 요금 상당 기간 유지
  - 풍력, 태양광 등 재생에너지, 전기차, 수소차 등 그린 산업 전반의 수요 급증
    - ‘Buy America’ : 재생에너지 인프라, 저탄소 수송·건축·제조업 등 에너지전환 수단 전반에 걸쳐 국내 생산 기준 도입으로 경제회복 및 고용 창출 기대
  - 넷-제로 달성의 주요 수단으로 수송부문 집중 : 자동차, 대중교통, 철도 등
    - 캘리포니아식 연비규제 적용 시, 전기·수소차 의무판매제도 및 강력한 연비 규제시행, 연방정부 보조금 지급연장 예상
    - 전기차, 수소차 제조 및 관련 기술개발(배터리 등), 인프라 산업 확대 전망
- ⇒ 일부 정책은 코로나19 여파에서 회복하기 위한 경기부양책의 일부분으로 실현될 가능성도 큼

작성자 : 한전 경영연구원 이슬아 선임연구원, 흥혜빈 일반연구원

## 경영도서 요약 : 신도 주사위 놀이를 한다

### [ 도 서 개 요 ]

- 소개 : 과거부터 현재까지 인간이 수학을 활용하여 사회 및 과학 속의 불확실성을 고려하는 방법과 이를 활용하는 알고리즘 등을 설명
- 저자 : 이언스튜어트(수학자, 대중과학 저술가, 워릭 대학교 교수)

## 1. 미래 예측 및 확률 이론의 태동

- 고대 시대의 인간은 미래의 불확실성을 제거하기 위해 동물 및 사물에 확실성을 부여하는 방법으로 미래를 예측
  - 고대 바빌론시대(BC 1600년 말기)의 바루(바빌론의 사제)는 희생된 양(羊) 간의 특징 및 간 이외의 장기의 특징 및 위치를 통해 미래를 예언함(바루투)
    - \* 바루투는 현재까지 100개 이상의 점토판에 8만가지가 넘는 점괘들이 기록되어 전해짐
  - 에트루리아인, 로마인 등은 닭 또는 양을 희생시켜, 해당 동물의 창자를 통해 (엑스티 시피, 하루스펙스\*) 환자의 질병을 진단하고 미래를 예측함
    - \* 하루스펙스(haruspex) = haru(창자) + spec(관찰)
  - 고대 아랍인, 그리스인 등이 활용한 화살 점(belomancy)은 중요한 문제의 해답을 여러 개 적은 후 공중에 날려 가장 멀리 날아간 화살에 달린 문구를 답으로 간주함
- 확률 이론은 중세시대 만연하였던 주사위 도박에서부터 시작되었으며, 수학자들은 도박을 활용하여 확률, 기댓값 등에 대한 용어를 정립
  - 1450년 주사위가 기존의 직육면체\*에서 정육면체로 표준화되어 각 숫자가 나올 가능성이 동일해짐에 따라 수학자들은 주사위 도박을 연구하기 시작함
    - \* 고대 로마 시대에서 도박에 사용된 주사위는 직육면체여서 숫자마다 나올 확률이 상이했지만, 당시 로마인들은 운명에 대한 믿음을 중요하게 생각했기 때문에 주사위의 형태는 크게 신경 쓰지 않음
  - 의사이자 수학자인 지롤라모 카르다노는 도박을 통해 최초로 확률 연구를 시작하였고 확률을 주사위 도박에 응용하는 방법에 대해 저술함
  - 크리스티안 하위헌스는 도박에서의 승리와 패배의 확률을 고려하여 도박 시, 예상되는 기댓값(expectation)을 계산하는 방법을 고안하였고 베르누이는 동전 던지기를 통해 특정 사건이 발생할 확률을 이항정리\*로 산출함
    - \* 거듭제곱 형태의 이항식( $(a+b)^n$ )을 조합(combination)을 활용하여 일련의 단항식의 합으로 전개하는 정리

## 2. 천문학과 사회학으로부터 통계학의 등장<sup>7)</sup>

- 천문학에서는 동일한 계측에도 불구하고 실제 값과의 오차가 발생함에 따라 오차를 최소화하기 위해 통계학이 적용·발전됨
  - 달의 칭동(libration\*) 현상, 혜성의 궤도 예측 등을 하기 위한 데이터를 수집함에 있어 모델의 연립 방정식 변수의 갯수보다 관측치가 지나치게 많은 방정식이 생겨남(과잉 결정된 연립 방정식)
    - \* 궤도를 선회하는 천체의 특정한 상태 운동(흔들림 등)을 의미하며, 달의 칭동 현상을 통해 지구에서는 달 표면의 50%가 아닌 59% 확인이 가능
  - 천문학자인 요한 토비아스 마이어는 27개의 관측치로 달 궤도의 특성과 관련된 미지수가 3개인 방정식의 해를 산출하기 위해 관측치를 9개씩 3개의 그룹으로 결합시켜 오차를 줄임

### ▣ 미적분학과 마이어의 오차 분석 비교 ▣

- ☞ 기존의 미적분학 관점에서는 과잉 결정된 연립 방정식을 풀기 위해 관측치의 숫자들을 곱하거나 더하는 방법은 오차를 증가시키므로 정확도가 하락한다고 인식함  
ex)  $3x + y = 7$ 인 식에서,  $1.5 \leq x \leq 2.5$ ,  $0.5 \leq y \leq 1.5$  일 때,  $x, y$ 와  $3x + y$ 의 오차 비교  
 $x, y$ 의 각각의 오차는  $\pm 0.5$ 이지만( $x = 2, y = 1$ ),  $3x + y$ 에 대입하는 경우 오차는  $\pm 2$ 로 커짐
- ☞ 마이어는 관측치의 숫자들을 **올바른 방식으로 결합**하면, **오차가 감소**하여 정확도가 개선된다고 인식함  
ex) 10개의 관측치가 4 또는 6일 때, 정확한 해( $x = 5$ )와의 개별 값과 10개 합인 오차 비교  
개별 값의 오차 :  $\pm 1$ (20%), 4가 6번, 6이 4번이라는 가정 하에서의 10개의 합인 오차 :  $-2$ (4%)

- 마이어의 계산 기법은 발전하여 이후, 최소 제곱법(least squares\*)으로 발전함
  - \* 주어진 방정식의 해를 근사적으로 구하는 방법으로써 오차 제곱의 합이 최소가 되도록 해를 구함
- 사회학자들은 서로 다른 상황과 가능한 오차에 대한 전반적인 지식과 통제력이 없더라도 다양한 출처의 데이터를 종합함에 따라 타당한 추론이 가능함을 깨달음
  - 1820년대 아돌프 케틀레는 인간의 신장, 체중 같은 속성 등의 인간특징의 측정은 특정 값 주위로 모여있는 경향(정규분포\*)을 발견하였으며, 이를 통해 평균의 개념을 정립함
    - \* 종 모양의 좌우 대칭인 확률 분포로 평균( $m$ )을 중심으로 표준편차( $\sigma$ )만큼 흩어져 있음
  - 1880년대 프랜시스 골턴의 세대별 키를 조사하는 연구는 회귀분석(regression analysis\*)의 창안으로 이어졌고 칼 피어슨은 상관계수의 개념을 도입하여 변인 간의 인과관계를 분석하려 함
    - \* 골턴은 키 큰 아버지의 아들은 아버지보다 키가 살짝 작고 키 작은 아버지의 아들은 아버지보다 키가 살짝 큰 것을 확인함. 이때 아들들의 키가 모두 해당 세대 평균 키에 근접한 것을 발견하였고 이를 평균으로의 회귀(regression toward mean)라는 이름으로 명명함

7) 천문학과 사회학은 불완전한 관찰 데이터에서 유용한 정보를 추출한다는 점에서 공통점이 존재함

### 3. 귀납적 추론 방법의 적용

□ 베이즈 정리(=조건부 확률\*)는 아직 일어나지 않은 일에 대해 사전 확률과 우도 확률을 안다면, 사후 확률을 계산하는 방법을 보여줌

\* 베이즈 정리는 역확률(inverse probability)의 문제를 해결하기 위한 방법으로 기존의 빈도주의(frequentism) 관점에서의 연역적 추론이 아닌 귀납적 추론 방법을 도입,  $p(A|B) = \frac{p(B|A)p(A)}{p(B)}$

- 사전 확률(prior probability,  $p(A)$ )은 어떠한 정보도 없을 때, 사건(A)이 발생할 확률이며, 경험에 기반한 선형적이고 불확실성을 내포하는 수치 기반의 확률
- 우도 확률(likelihood,  $p(B|A)$ )은 사건 A가 발생했다는 조건 하에서 사건 B가 발생할 확률
- 사후 확률(posterior probability,  $p(A|B)$ )은 사건 B가 발생했을 때, B의 정보를 반영(update)하여 산출한 A의 발생 확률

#### ■ 베이즈 정리의 예시 ■

☞ 40대 사람의 암 발병률은 1%이고, 암 검사는 실제 환자의 80%는 양성으로 진단하지만, 걸리지 않은 환자의 10%도 거짓 양성으로 진단한다. 한 사람의 결과가 양성이었을 때, 실제로 암에 걸릴 확률은 얼마인가?

$$p(\text{실제}) = p(\text{실제양성} \cap \text{양성판단})$$

$$p(\text{양성}) = p(\text{실제양성} \cap \text{양성판단}) + p(\text{거짓양성} \cap \text{양성판단})$$

$$\therefore \frac{(1\% \times 80\% \times N)}{(1\% \times 80\% \times N) + (99\% \times 10\% \times N)} = \frac{8}{107}$$

\* N은 40대 인구 수

	실제	암	암 X
진단			
양성		1%*80%*N	99%*10%*N
음성		1%*20%*N	99%*90%*N
확률		1%	99%

□ 베이지안 이론 하에서 인간의 뇌는 베이즈 정리와 유사하게 생각하고 결정하며, 내재된 믿음(사전 확률)에 기초하여 작동한다고 간주함

- 확률은 주사위 던지기로 나타나는 특정 사건이 발생할 빈도가 아니라 '지식 또는 믿음의 정도로 나타내지는 양'으로 해석되며, 외부 환경에 의해 계속해서 업데이트된다고 생각함
- 인간은 새로운 정보를 들었을 때, 기억 속에 그대로 저장하지 않고 기존의 믿음과 정보의 신뢰성 등을 비교 평가하여 해당 정보를 업데이트하여 신경 세포에 저장함

#### ■ 가짜뉴스를 믿는 이유 ■

☞ 베이지안 이론에 따르면, 가짜뉴스를 믿는 이유의 원인은 내재된 믿음에 기초하여 작동하는 베이지안 뇌 때문이다. 개개인의 사고는 자신의 생각이라는 조건에 제한을 받는다. 즉, 내재된 믿음이 강할수록(즉,  $p(A)$ 가 높을수록) 특정 사건에 대한 믿음이 강해지게 된다. 따라서, 사실과 다르더라도 자신의 내재된 믿음에 부합하는(= 입맛에 맞도록 생성된) 가짜뉴스에 대한 신뢰도는 상승하며, 믿고 싶지 않은 항목들은 무시된다.

## 4. 현대사회에서 통계의 적용

### 【기상예보】 기존의 단일 수치예보의 정확도를 높이고자 기상 예측 시, 여러 개의 표본을 활용하여 중기적(2~3일) 예측의 정확도를 향상

- 1920년대의 기상학자들은 물리적 원리에 기초하여 대기의 상태에 대한 일련의 단일 방정식을 활용하여 날씨를 예측하였지만, 실제 기후의 복잡성(complexity)으로 인해 실패함
- 구름 위치와 같은 미세 구조의 관측 오차는 한 시간 동안 두 배로 증가하며, 미세 구조의 오차를 줄이더라도 기상 예측 범위는 한 시간 정도만 연장되어 중기적 예측이 어려움
- 예측의 신뢰도를 높이기 위해 예상 기상 범위 내의 초기조건, 물리과정 등을 다르게 설정한 여러 개의 표본을 확률적으로 분석하는 앙상블\* 예측을 도입함
  - \* 강수 확률 등의 예측의 불확실성에 대한 정보를 제공하며, 국내에서는 24개의 앙상블 표본을 활용하여 적용

### 【경제·금융】 고전적인 수리 경제학 모델의 가정에 위배되는 현상의 출현 등으로 인해 기존의 확정적(deterministic) 접근법에서 확률적(stochastic) 접근법으로 확장

- 고전적인 수리 경제학 이론은 불확실한 경제 환경에서 결정을 내리기 위한 체계적인 도구를 제공하였지만, 인간은 합리적이라는 경제학의 기본 가정은 현실과 괴리되어 있음
- 1990년대 닷컴 버블(dotcom bubble), 2000년대 금융위기 등은 인간의 탐욕으로 인해 발생한 시장의 '비이성적인 과열'의 결과이며, 인간이 온전히 합리적이지 않음을 보여줌
- 인간의 제한적인 합리성을 고려하기 위해 브라운 운동\*, 랜덤워크와 같은 확률적 접근법과 행위자 기반 모형(ABM, agent-based model\*\*)을 도입하여 분석에 활용
  - \* 액체나 기체 등 유체 안에 존재하는 거대한 입자가 끊임없이 불규칙적으로 움직이는 현상
  - \*\* 미시적 토대로부터 발생하는 거시적 패턴을 분석하기 위해 제안된 상향식(bottom-up) 계산 모형

### 【의학】 신약의 성능과 관련하여 임상시험을 설계할 때, 시험의 특성상 소수의 표본을 활용하여 신뢰도 높은 결과를 산출해야 하는 어려움이 존재

- 의료계, 제약회사 등은 신약 개발 시, 치료 효과의 확인 및 신약의 부작용을 줄이기 위해 엄격한 윤리적인 규범을 하에서 임상시험을 실시해야 함
- 임상 시험 시, 설계자는 위약(placebo)효과를 제거하기 위해 시험 대상자에게 무작위로 약을 전해주고 시험 대상자들은 자신이 진짜 약을 받았는지 알 수 없어야 함
- 적은 샘플 데이터의 수로 모집단의 특성을 효과적으로 산출하기 위해 얻기 위해 부트스트랩(bootstrap)\*, 로지스틱 회귀\*\*, 콕스 회귀\*\*\* 등을 활용하여 분석에 적용함
  - \* 동일한 데이터에 대해 중복을 허용하여 무작위로 여러 번의 표본 재추출(re-sampling)을 실시하여 추정하는 방법
  - \*\* 독립변수가 이산형(ex, 0 또는 1)일 때 수행할 수 있는 회귀분석의 한 종류
  - \*\*\* 비례위험모형 또는 생존분석이라고도 하며, 준모수적(semi-parametric)인 방법으로 생존함수를 도출하는 방법

## 5. 불확실성의 활용

□ 항공, 의학, 물리, 경제 등 여러 분야에서 최적화 문제 등을 풀기 위해 무작위적인 난수를 활용하여 분석하는 기법\*들이 등장하여 적용됨

\* 해석학적인 최적화 기법은 최적해는 산출할 수 있지만, 해의 유일성 여부를 판단하기에는 어렵다는 단점이 존재함

○ 몬테카를로 기법\*은 해를 연역적으로 산출하는 것이 아니라 시뮬레이션을 활용하여 무작위(random)로 추출된 난수를 이용하여 함수의 값을 확률적으로 계산함

\* 난수를 이용하여 함수의 값을 확률적으로 계산하는 알고리즘을 의미하며, 수소 폭탄 개발, 우주 및 석유 탐사, 항공기 설계 등의 시스템 엔지니어링 분야 등에 많이 사용됨

### ■ 몬테카를로 기법 예시(도형의 넓이 구하기) ■

<p>&lt;적분 개념&gt;</p>	<p>&lt;몬테카를로 기법&gt;</p>
<p>☞ 계단 모형의 넓이를 구하는 방법은 직사각형으로 잘게 쪼개어 개별 직사각형 넓이의 합으로 산출(적분 개념)</p>	<p>☞ 넓이를 알고 있는 도형(노란색) 안에 계단 모형을 넣은 후, 무작위로 다트를 여러번 던져 비율을 비교 ex) 계단모형의 넓이는 노란 사각형의 11/20 내외</p>

○ 유전 알고리즘\*은 1950년대 앨런튜링이 가상 학습 기계로서 제안한 방법으로 다윈의 진화론을 바탕으로 한 최적해를 구하는 알고리즘을 의미함

\* 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 무작위의 해집단(염색체)을 생성한 후, 이들 해의 모형에 대한 적합도를 확인하고 해집단의 생물학적인 교차 및 변이 알고리즘을 통해 주어진 문제에 적합한 해를 도출

### ■ 유전 알고리즘 예시(최단경로 산출) ■

	<p>Q) A에서 출발하여 각 지점을 한번씩 거쳐 A로 최단 경로로 복귀하는 방법 - 최대반복횟수 : 10, 돌연변이 확률 : 1%, 허용 거리 35 가점</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 무작위로 염색체(=해집합)을 생성 - DBC, BCD(DBC는 A→D→B→C→A를 의미)</li> <li>② 염색체에 대한 적합도(본 문제에서는 거리)를 계산 - DBC : 45, BCD : 41</li> <li>③ 현재 염색체에서 자손*을 생성(돌연변이 확률 적용) 및 적합도 계산 * 자손은 ②의 염색체에서 문자를 하나씩 가져오며, 변이는 생성된 자손의 문자열을 바꿔서 생성 - DCB, CDB(변이)</li> <li>④ 생성된 자손의 적합도 계산 - DCB : 41, CDB(변이) : 30</li> <li>⑤ 종료 조건 판별 및 종료 조건이 거짓인 경우, ③으로 이동하여 재계산</li> </ol>
--	--

작성자 : 한전 경영연구원 정진영 일반연구원

## 약어 / 용어 설명

<b>AGC (Automatic Generation Control)</b>	자동발전제어
<b>DNO (Distribution Network Operator)</b>	배전계통운영자
<b>EMP (Electromagnetic Pulse)</b>	전자기펄스
<b>FERC (Federal Energy Regulatory Commission)</b>	연방에너지규제위원회
<b>HVDC (High Voltage Direct Current)</b>	초고압 직류송전
<b>LCOE (Levelized Cost of Energy)</b>	균등화발전비용
<b>NEA (Nuclear Energy Agency)</b>	국제 원자력에너지 기구
<b>NERC (North American Electric Reliability Corporation)</b>	북미신뢰도위원회
<b>PSPS (Public Safety Power Shutoff)</b>	선제적 전력차단
<b>SO (System Operator)</b>	계통운영자
<b>TO (Transmission Owner)</b>	송전사업자
<b>TSO (Transmission System Operator)</b>	송전계통운영자
<b>VRE (Variable Renewable Energy)</b>	변동성 재생에너지*

\* 기상 영향을 받아 출력 변동성 및 불확실성이 발생하는 태양광, 풍력 등 재생에너지

## KEMRI 전력경제 Review 제11호

---

발행일	2020. 11. 2.
발행인	원장 이경숙
편집인	경영연구원 편집위원회 편 집 장 책임연구원 박정연(☎국선: 061-345-3630 / 사선: 061-3630) 편집위원 일반연구원 홍혜빈(☎국선: 061-345-3617 / 사선: 061-3617)
홈페이지	<a href="http://www.kepco.co.kr/KEMRI">www.kepco.co.kr/KEMRI</a>
문의처	경영연구원 연구기획팀(☎국선: 061-345-3610~17 / 사선: 061-3610~17)

---

※ 한국전력 경영연구원의 사전 동의 없이 본 보고서의 내용을 무단 전재하거나 제 3자에게 배포하는 것을 금합니다.