

# 전력계통 유연성 강화방안

2017년도 연구성과 발표회

2018.3.30

에너지경제연구원 안재균 부연구위원

## 목 차

---

1. 연구배경
2. 선진국의 유연성 강화 사례
3. 국내 전력계통 유연성 분석
4. 정책적 시사점

# 1. 연구배경

---

# 1. 연구배경

## 1) 신정부 에너지전환 정책 추진

▪ 제8차 전력수급기본계획 2030 전원별 발전량 믹스 :

- 원자력 23.9%, 석탄 36.1%, LNG 18.8%, 신재생에너지 20.0%, 기타 11%

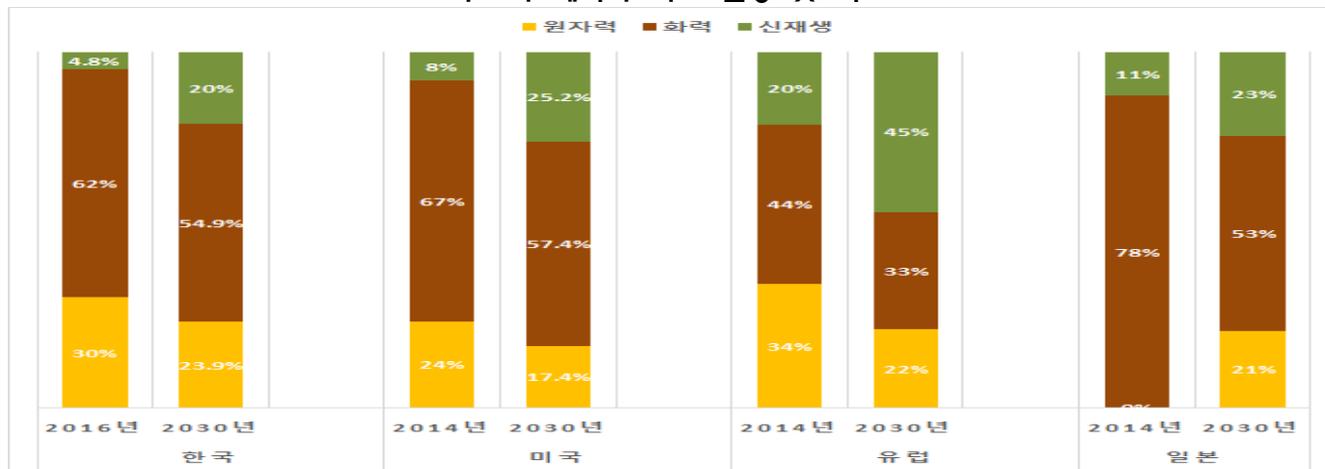
▪ 신재생에너지 20%로 주요 선진국과의 전원구성과 유사해져 갈 전망

## 2) 변동적 재생에너지(태양광, 풍력) 발전량 비중 : 13.5%

- 태양광 용량 및 발전량: 33.5GW(19.0%), 42.3TWh(6.7%)

- 풍력 용량 및 발전량 : 17.7GW(10.2%), 42.6TWh(6.8%)

<주요국 에너지 믹스 현황 및 목표>

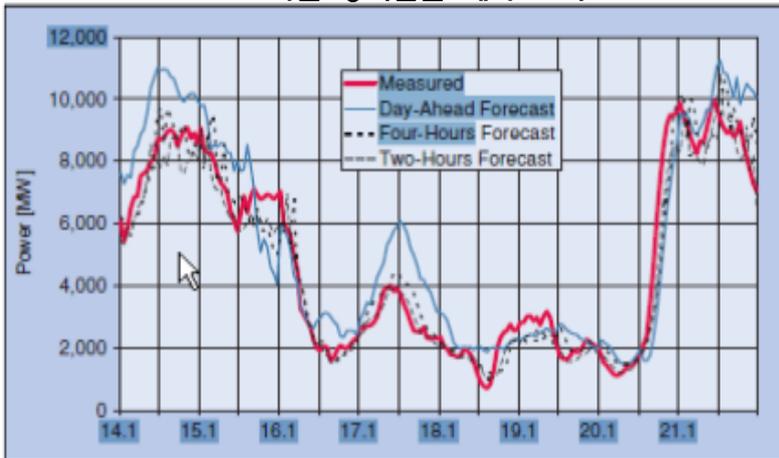


# 1. 연구배경

## 3) 변동적 재생에너지 특성

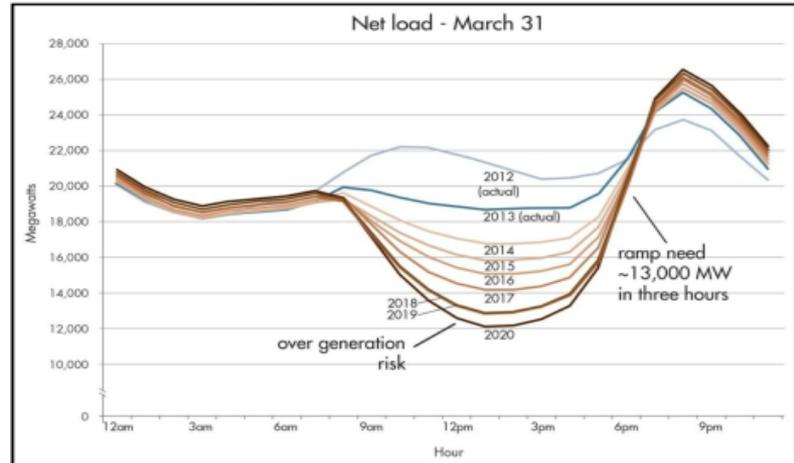
- 장점 : 청정에너지, 적은 용수 소비량, 지속 발전
- 단점 : 불확실성(예측오차), 변동성(출력변화), 낮은 관성 제공

<독일 풍력발전 예측 오차>



출처: GE ENERGY(2012). PJM renewable integration study

<캘리포니아 Duck Curve>



출처: CAISO(2014). Flexible resource adequacy capacity requirement amendment

- 불확실성 : 적정 운영예비력 확보 및 CON, COFF 정산금 증가 초래
- 변동성 : 증감발 성능이 우수한 자원 확보 및 적정 보상 필요

# 1. 연구배경

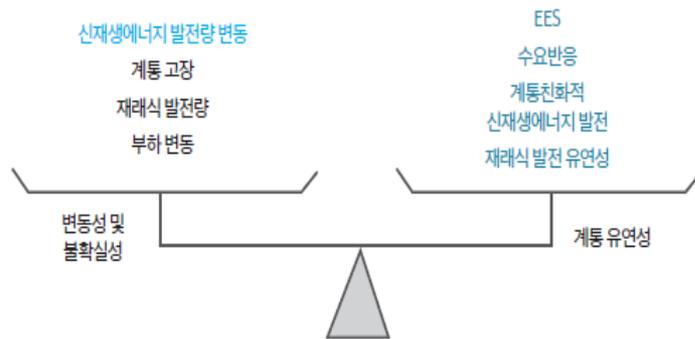
## 4) 전력계통 유연성

- 정의 : 매순간 전력수급 균형을 유지하기 위해 비용효과적으로 발전과 부하를 조절할 수 있는 능력

## 5) 전력계통 유연성 강화 수단

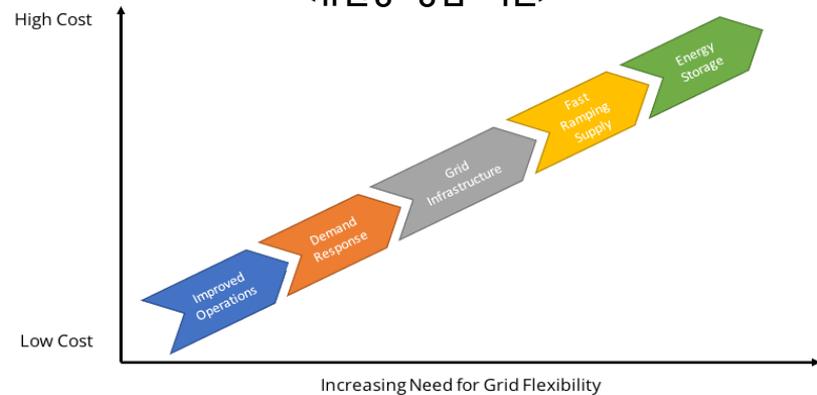
- 전력시장제도 개선, 계통운영 선진화, 유연성 자원 확보

<전력계통 유연성 개념>



출처: IEC(2012). 대용량 신재생E 계통연계와 대용량 ESS 이용

<유연성 공급 곡선>



출처: Oris and Aggarwal(2017). A roadmap for finding flexibility in wholesale markets

## 6) 비용효과적인 전력계통 유연성 확보 전략 모색 필요

- 2030년 국내 전력계통 유연성 평가 및 강화 방안 제시

## 2. 선진국의 유연성 강화사례

## 2. 선진국의 전력계통 유연성 강화 사례 - 제도 개선

### 1) 미국 전력시장 밸런싱 의무 부여

#### ▪ 하루 전 시장 - 실시간 시장의 이중정산제도 개요



출처: 임금주(2017). 미국전력도매시장 운영현황 및 거래유형 분석

#### ▪ 연방에너지규제위원회(FERC) Order 890 벌과금 : 신재생에너지 사업자에 완화된 밸런싱 의무 부여

구분	시간대별 오차범위(+/-)	정산	대상
Tier 1	15%이내 (2MW이하)	- 매월 상계 - 매달 말일 증분비용 100%로 정산	일반사업자, 신재생사업자
Tier 2	15~75% (2~10MW)	- 양의 편차: 증분비용의 90%로 정산 - 음의 편차: 증분비용의 110%로 정산	일반사업자, 신재생사업자
Tier 3	75%이상 (10MW이상)	- 양의 편차: 증분비용의 75%로 정산 - 음의 편차: 증분비용의 125%로 정산	일반사업자

## 2. 선진국의 전력계통 유연성 강화 사례 - 제도 개선

### 2) 유럽 전력시장 밸런싱 의무 부여

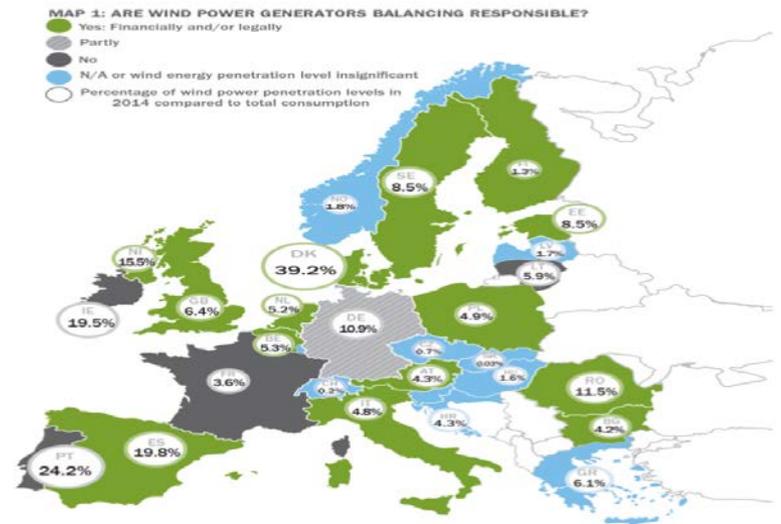
- 정산제도 : 단일가격제 vs 이중가격제
  - 단일가격제 : 동일한 밸런싱 가격 적용
  - 이중가격제 : 지역의 수급상황을 심화/완화 영향 여부에 따라 차등 가격 적용

<이탈리아 밸런싱 정산제도>

구분	지역 임밸런스 방향	
	+	-
발전기 임밸런스 방향	발전기는 아래가격으로 정산받음 MIN(BSP, DAP)	발전기는 아래가격으로 정산받음 MAX(BSP, DAP)
	발전기는 아래가격으로 지불 MIN(BSP, DAP)	발전기는 아래가격으로 지불 MAX(BSP, DAP)

출처: EWEA(2015). Balancing responsibility and costs of wind power plants

<EU 국가별 풍력발전량 비중 및 밸런싱 의무>



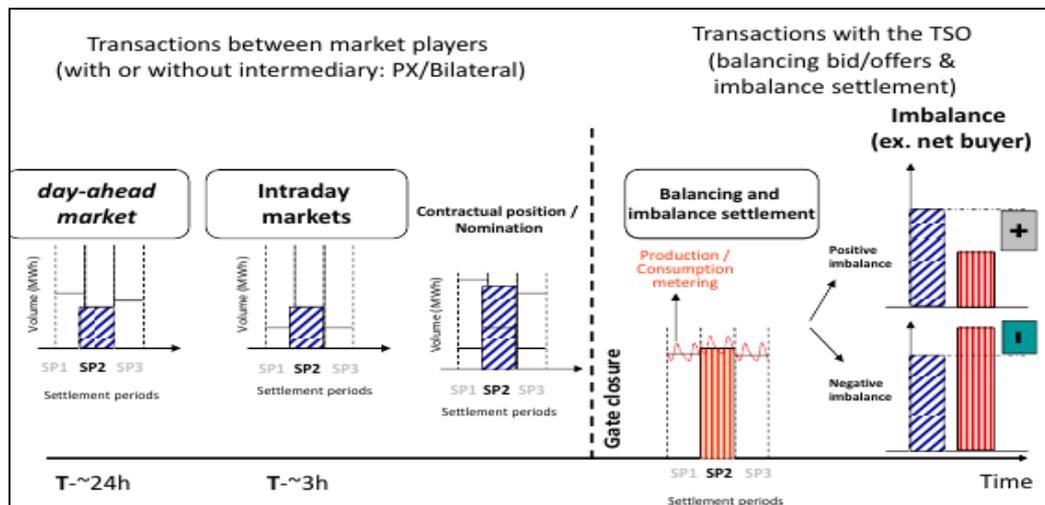
출처: EWEA(2015). Balancing responsibility and costs of wind power plants

## 2. 선진국의 전력계통 유연성 강화 사례 - 제도 개선

### 3) 유럽 당일 시장(Intra-day market) 개설

- 목적 : 하루 전 시장과 밸런싱 시장 운영 사이에 수급불일치 위험과 예비력 확보 비용 감소
- 전력거래 참여자는 풍력발전의 예측 결과 수정 및 예상치 못한 발전기 고장을 반영하기 위해 당일 시장에서 하루 전 시장에서 계약 거래량을 15분 단위로 수정

<EU 전력시장에서의 주기별 거래형태>



출처: Florence School of Regulation(2014). Electricity markets principles

## 2. 선진국의 전력계통 유연성 강화 사례 - 제도 개선

### 4) 미국 실시간시장 정산주기 단축

- FERC Order 825 목적 : 유연성 제공 자원 인센티브 부여
- 기존 한 시간 단위(12개 구간 평균가격)의 정산 주기를 5분 단위로 단축

구분	PJM	MISO	ERCOT	CAISO	SPP	NYSO	ISONE
급전주기	5min	5min	5min	5min	5min	5min	5min
정산주기	1h	1h	15min	5min	5min	5min	1h
비고	정산단위 변경예정 1h→5min	정산단위 변경예정 1h→5min	-	15min 시장가격존재	-	-	정산단위 변경예정 1h→5min

- 기대 효과 : 기존 전원의 유연성 확대와 신규 유연성 제공 자원의 참여 유도

### 5) 변동적 재생에너지 출력제약(Curtailment)

- 송전제약 또는 경부하 시 수급제약으로 풍력발전의 출력제약 실행
- CAISO, MISO : 계통제약에 가장 많은 영향을 끼친 풍력발전기 감발
- ISO-NE, SPP : 계통제약에 영향을 준 풍력발전기를 동일한 비율로 감발
- HECO, HELCO : 풍력발전 실시 순서의 역으로 감발

## 2. 선진국의 전력계통 유연성 강화 사례 - 유연성 자원 확보

### 1) 비발전기 보조서비스 활용

#### ▪ 보조서비스시장에 수요자원 및 ESS 참여 확대

- PJM 순동예비력 참여 수요자원 : '16년 23MW(6.6%), 전년대비 10배 증가

<PJM 수요자원 최소용량, 응답 및 지속시간>

구 분	최소 참여용량	응답시간	지속시간
주파수조정예비력	0.1MW	5분	-
순동예비력	0.1MW	10분	10분
하루 전 예비력	0.1MW	30분	30분

- PJM ESS의 보상 강화 : 응동 정확도 및 속도에 기반한 정산

※ 일반발전기(REG A) : 25~30\$/MWh, ESS(REG D) : 35~40\$/MWh

- CAISO : ESS 시장진입을 유도하기 위해 지속시간과 최소 참여 용량 기준 완화

<CAISO ESS 시장참여 기준>

구 분	최소용량	하루 전 시장 최소 참여 시간	실시간 시장 최소 참여시간
내 용	1MW → 500kW	2시간 → 60분	2시간 → 30분

## 2. 선진국의 전력계통 유연성 강화 사례 - 유연성 자원 확보

### 2) 유연성 자원 확보 의무화

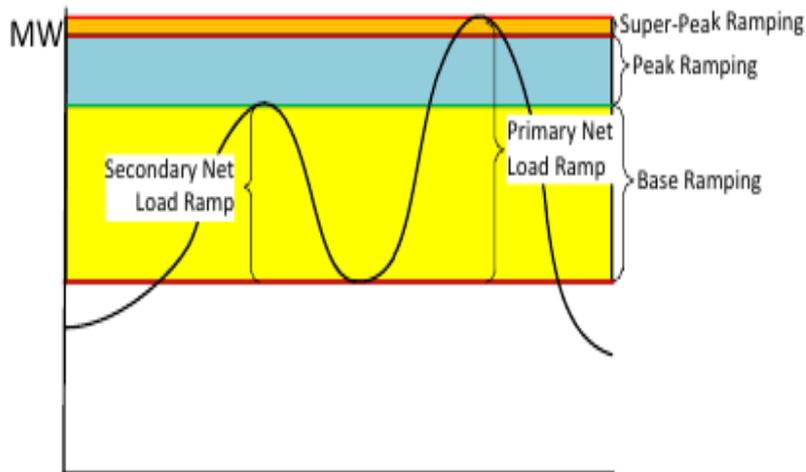
- 캘리포니아 Flexible ramping product 도입

- 태양광 발전 증가에 따른 덕커브 현상 발생으로 유연성 자원을 의무적으로 확보

※ 캘리포니아(CAISO) 2016년 발전량 비중 8.7%

- 증감발 필요량 산정 → 발전사 기동정지 입찰의무 → ISO 기동정지 및 급전계획수립 → 에너지 및 보조서비스시장 가격 기반 기회비용 보상

<CAISO 유연성 확보량>



출처: CAISO(2014). Flexible resource adequacy capacity requirement amendment

<CAISO Ramping product>

구 분	Base ramping	Peak ramping	Super-peak ramping
입찰 의무 시간	오전5시~오후10시	정해진 시점 최소 5시간 이상	정해진 시점 최소 5시간 이상
요구량 산정	연속3H 순수요 기준 두 번째로 큰 증발량	연속3H 순수요 기준 최대 증발량 두 번째로 큰 증발량	Peak ramping의 5%
이용 시간	매일	매일	평일 (주말, 휴일 제외)
기동 횟수	최소 2번 이상/일	최소 4번 이상/일	최소 1번 이상/일

## 2. 선진국의 전력계통 유연성 강화 사례 - 유연성 자원 확보

### 3) ESS 의무화

- 캘리포니아 공공 유틸리티 위원회(CPUC) '10년 의무화 법안 통과
  - ESS 보급 목적: 최대전력수요 감소, 계통신뢰도 제고, 송배전망 투자 소요 감소, 신재생에너지 통합, 온실가스 감축
  - 3대 유틸리티사 : 송배전망과 수용가에 ESS 설치 의무를 지님(총 1,325MW)
  - 전기판매사업자 및 지역수요관리기업(Aggregator) : 최대부하의 1% 해당 규모 ESS 확보

<캘리포니아 3대 유틸리티사 ESS 의무용량(MW)>

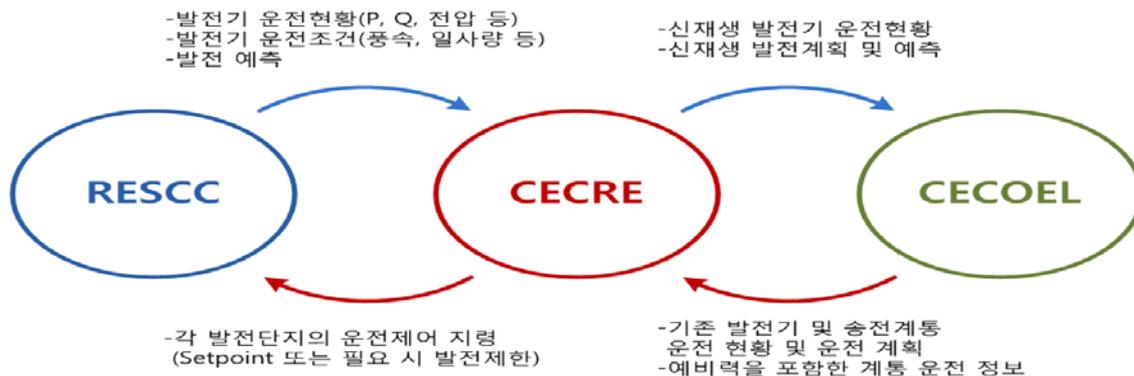
구 분	2014년	2016년	2018년	2020년	누적
Southern California Edison	90	120	160	210	580
Pacific Gas and Electric	90	120	160	210	580
San Diego Gas & Electric	20	30	45	70	165
합 계	200	270	365	490	1,325

## 2. 선진국의 전력계통 유연성 강화 사례 - 계통운영 선진화

### 1) 스페인

- 계통상황 : 인접국과 계통연계는 제한적으로 자체 예비력 확보
    - '15년 풍력발전 용량 및 발전량 : 22.9GW(21.5%), 49.3TWh(17.6%)
  - 중앙 신재생에너지 운영센터(CECRE) 및 지역 신재생운영센터(RESCC) 운영
    - CECRE : 신재생에너지 출력제한 결정 및 운전 지령 지시
    - RESCC : 신재생에너지 제어 수행 및 감시
- ※ SIPRELICO : 풍력발전 예측 정보 제공 (15분~48시간)

#### <스페인 신재생에너지 운영 시스템>



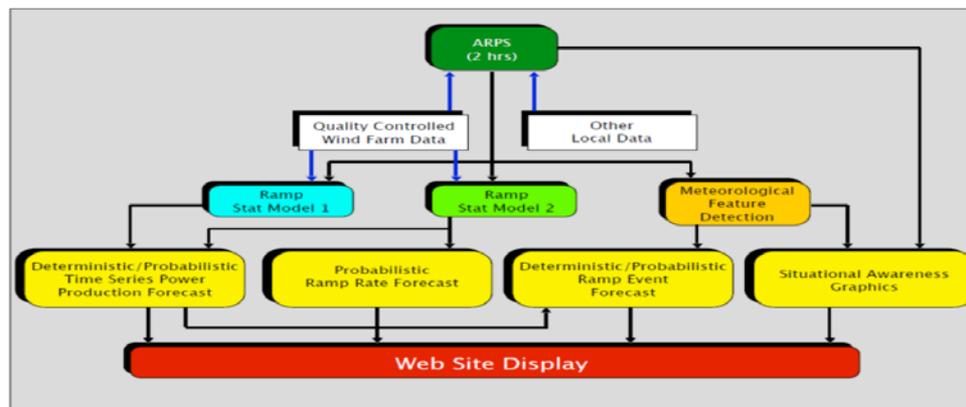
출처: 한국전력거래소(2013). 스페인 CECRE 방문 결과보고

## 2. 선진국의 전력계통 유연성 강화 사례 - 계통운영 선진화

### 2) 텍사스(ERCOT)

- 계통상황 : 미국 내 다른 지역과 송전계통이 분리
  - '15년 풍력발전 용량 및 발전량 : 15.8GW(18%), 40.8TWh(11.7%)
- 풍력발전 예측시스템 및 출력변동 경보 시스템(ELRAS) 운영
  - 단기예측정보 : 1~48시간 예측 정보 전달
  - ELRAS : 풍력발전기 위치 편중 및 여름철 기상 변화 심한 텍사스에서 풍력발전의 출력 변동을 사전에 예측 및 경보 시스템

ERCOT Large Ramp Alert System (ELRAS)



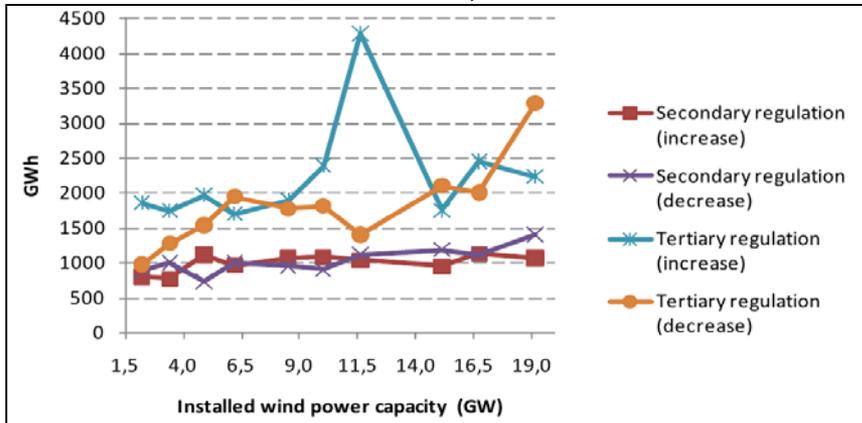
출처: ERCOT(2014). Load and renewable forecast in grind operations and planning

## 2. 선진국의 전력계통 유연성 강화 사례 - 계통운영 선진화

### 3) 스페인, 텍사스(ERCOT) 운영예비력 영향

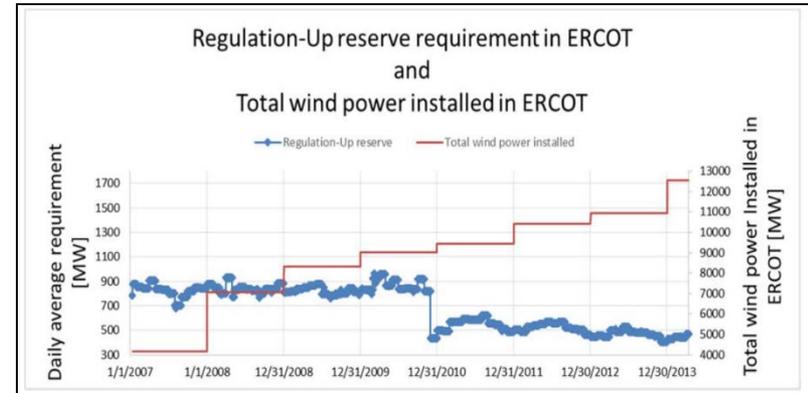
- 스페인 1차 예비력: 계통투입 전원 용량의 15%
- ERCOT 주파수 응답예비력: 2,300MW + 500MW(풍력발전 대응)
- 양국에서 풍력발전 증가에 따른 단기 변동에 따른 주파수조정예비력에 대한 영향은 미미함  
→ 적정 순동예비력 확보 및 풍력발전 감발 효과
- 풍력발전의 예측오차로 인한 비동기예비력 사용량은 증가함

<스페인 풍력발전 및 2,3차 예비력 추이>



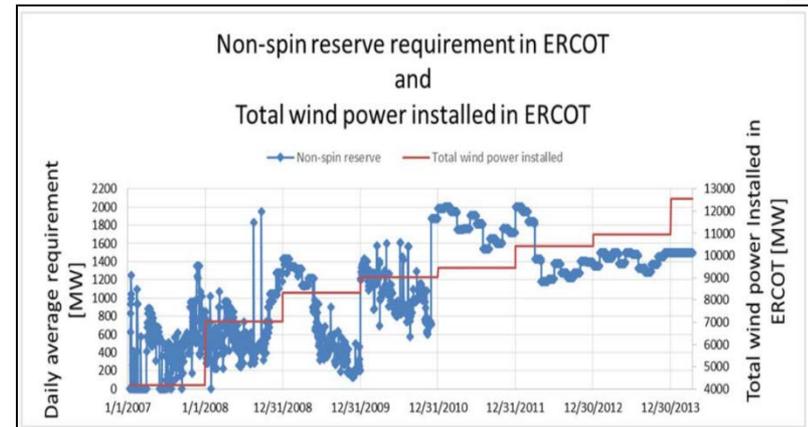
출처: Milligan et al.(2011). Operating reserves and wind power integration

<ERCOT 풍력발전 및 주파수조정예비력 추이>



출처: Andade et al.(2016). Impact of renewable generation on operational reserve requirements

<ERCOT 풍력발전 및 비동기예비력 추이>



출처: Andade et al.(2016). Impact of renewable generation on operational reserve requirements

### 3. 국내 전력계통 유연성 분석

### 3. 국내 전력계통 유연성 분석 - 모형

#### 1) 전력계통 유연성 분석 모형

- Lannoye(2012) 방법론 적용

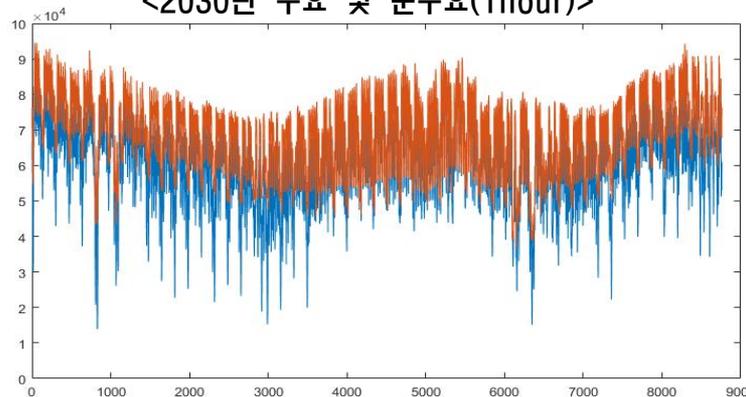
- 2030년 전력수급 시나리오로 변동적 재생에너지 1시간 단위 변화에 따른 전력계통 유연성 부족 빈도 분석

- 모형절차

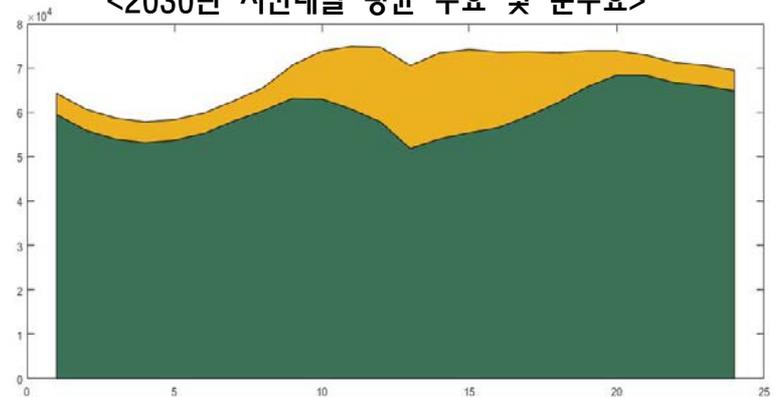
(1) 태양광 및 풍력 발전 시뮬레이션(1h) → (2) 순수요(Net load) 계산 →

(3) 급전순위 추정을 통한 증감발 유연성 제공 용량 계산 → (4) 시간대별 유연성 부족 시간대별, 월별 빈도 분석

<2030년 수요 및 순수요(1hour)>



<2030년 시간대별 평균 수요 및 순수요>



### 3. 국내 전력계통 유연성 분석 - 모형

#### (3) 증감발(Ramping-up&down) 유연성 제공 자원 계산

##### (3.1) 증발 유연성

- 가동 유연성(Online flexibility) :  $Flex_{i,h,+}^{online} = Online_i \times MIN(RR_+ \times h, Pmax_i - P_i)$
- 비가동 유연성(Offline flexibility) :  $Flex_{i,h,+}^{offline} = (1 - Online_i) \times MIN(RR_+ \times (1 - s), Pmax_i)$
- 주파수조정예비력 + 대기예비력 : 4,000MW

##### (3.2) 감발 유연성: 출력차단 배제하여 감발 필요시기 분석

- 가동 유연성(Online flexibility) :  $Flex_{i,h,-}^{online} = Online_{i,-} \times MIN(RR_- \times h, P_i - Pmin_i)$
- 비가동 유연성(Offline flexibility) :  $Flex_{i,h,-}^{offline} = (1 - Online_i) \times (1 - x) \times Pmax_i$
- 주파수조정예비력 : 1,500MW

#### (4) 순수요 변화에 따른 유연성 요구량 계산 : $NLR_{t,h} = NL_{t+h} - NL_t$

#### (5) 유연성 부족 빈도 계산

$$D_{i,h} = NLR_{i,h} - \sum_r^R (Flex_{i,h,r}^{online} + Flex_{i,h,r}^{offline})$$

$$PFD_h = \#D_{i,h} \in \mathfrak{R}^+.$$

### 3. 국내 전력계통 유연성 분석 - 모형

#### ▪ 급전순위 추정 및 시나리오

- 장기 전력시장 시뮬레이션 프로그램 활용
- 개략적 급전순위 추정 : 주파수조정예비력, 대기예비력, 수도권 전압지원 발전기 미반영, 순동예비력 고정, 열제약/수력/양수 패턴으로 묘사
- 8차 전력수급계획에 반영된 신규 양수 2GW, ESS 0.7GW 미반영

※ 수도권 발전 비중 시나리오 설정으로 급전순위 조정 시사점 제시

<수도권 발전 비중 시나리오>

구분	수도권 발전 비중	현실성
S20	비중 $\geq$ 20%	높음
S15	15% $\leq$ 비중 < 20%	낮음
S0	비중 < 15%	매우 낮음

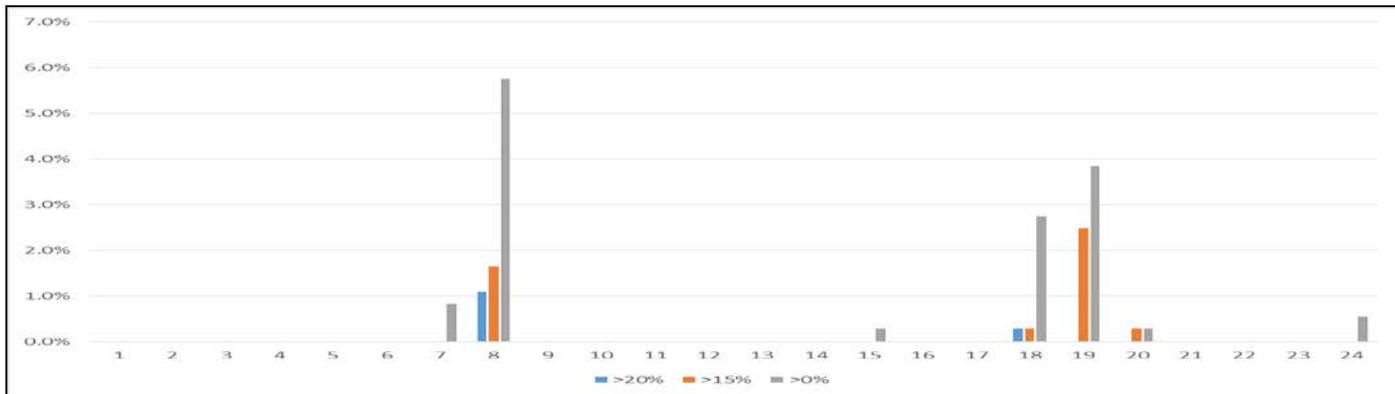
<전원별 특정 자료(평균)>

구분	양수	복합	기력	집단	원자력
최대출력 (MW)	294	610	888	198	1,161
최소출력 (MW)	79	304	390	67	774
기동시간	5분	4시간	7시간	6시간	8시간
증발(MW/분)	135	18	9	3	-
감발(MW/분)	135	18	9	3	-

### 3. 국내 전력계통 유연성 분석 - 결과

#### 1) 증발 유연성 분석

##### ▪ 시간대별 증발 유연성 부족 빈도



- 총 증발 유연성 부족 발생 횟수: **5회**, 17회, 52회(수도권 발전량 20%, 15% 0% 기준 순)

- 08시 증발 유연성 부족 발생 횟수: **4회**, 6회, 21회

※ 원인: 오전 수요 증가 시간대 풍력발전의 감소, 주로 겨울, 여름에 발생

- 18시 증발 유연성 부족 발생 횟수: **1회**, 1회, 14회

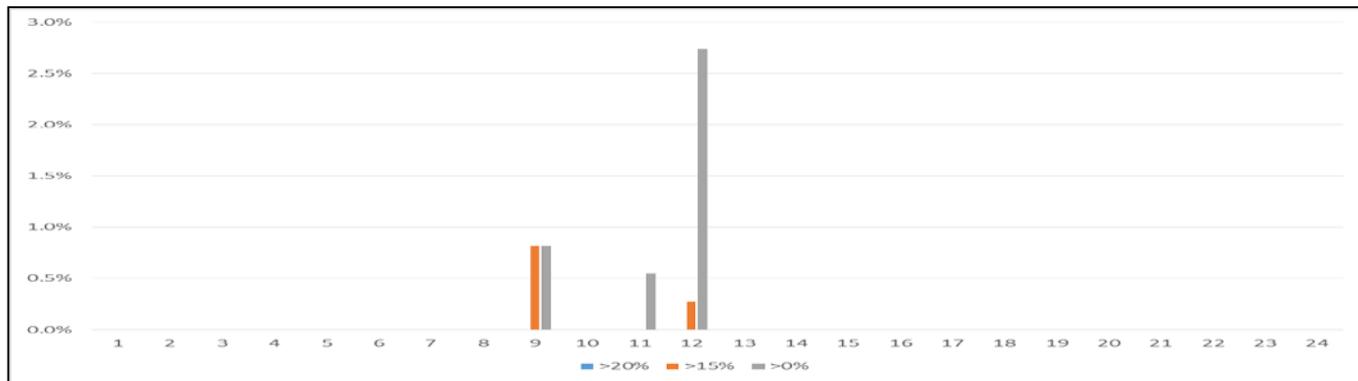
※ 원인: 비교적 수요수준이 높은 시간대 태양광 출력 감소, 가을, 겨울에 발생

- 대처방안 : 급전순위 조정, GT 단독운전, 신규 양수 활용

### 3. 국내 전력계통 유연성 분석 - 결과

#### 2) 감발 유연성 분석

##### ▪ 시간대별 감발 유연성 부족 빈도



- 총 감발 유연성 부족 발생 횟수: **0회**, 4회, 15회(수도권 발전량 20%, 15% 0% 기준 순)
- 09시 감발 유연성 부족 발생 횟수: **0회**, 3회, 3회  
 ※ 원인: 수요 수준이 가장 낮은 2월 구정 휴무일에 과잉발전으로 발생
- 12시 감발 유연성 부족 발생 횟수: **0회**, 1회, 10회  
 ※ 원인: 수요수준에 비해 태양광 출력의 큰 폭 증가, 주로 봄에 발생
- 대처방안 : 출력제약(Curtailment), 급전순위 조정, 신규 양수 활용

## 4. 정책적 시사점

---

## 4. 정책적 시사점 - 제도 개선

### 1) 전력시장제도 개편

#### ▪ 보조서비스 및 실시간 시장 개설

- 현행 CBP 제도에서는 변동적 재생에너지 확대 시 CON, COFF 정산금 증가로 경제적 비효율성 야기
- 보조서비스시장 운영으로 투명성 제고, 유연성 전원 보상 현실화
- 실시간 시장 운영으로 계통 상황을 반영한 실시간 가격형성, 유연성 전원 인센티브 제고, 이중정산제도로 수급균형 의무 부여 및 예측능력 제고 유인 제공

#### ※ 실시간 시장의 필수성

- ① 계통신뢰도 유지에 가장 비용효과적 수단
- ② 선도 또는 쌍무계약에 적합한 가격 신호 제공
- ③ 발전소 투자 의사결정에 적합한 가격 신호 제공

#### ▪ 변동적 재생에너지 규제

- 변동적 재생에너지 대상 출력제약(Curtailment) 규정 및 풍력발전 증감발출 제한 모색
- 변동적 재생에너지 비중 증가 시 일반발전기와 완화된 밸런싱 의무부여 고려

## 4. 정책적 시사점 - 유연성 자원 확보

### 2) 계통운영 선진화

- 변동적 재생에너지 관제 센터 및 예측시스템 구축

### 3) 유연성 자원 확보

- DR : 보조서비스 활용 AUTO DR 인프라 구축, 적정 인센티브 부여
- GT : GT 단독운전 의무적 확보 및 보상제도 고려(CAISO Ramping product market 참고)
- 양수 : 별치식(빠른 전환모드, 넓은 운전범위) 또는 가변식(속응성) 적용
- ESS : 주파수조정용 장주기 시스템 개발 필요, 적정 인센티브 부여로 시장진입 유인

<유연성 제공 자원 특성>

구분		가스터빈	양수	ESS	DR
기술 특성	증감발(분당)	88MW	130~300MW	1,440MW	측정불가
	기동시간(Hot기준)	20~40분	5분	-	-
	최소출력(%)	25	28.3	-	-
경제성	건설비 (천원/kW)	891	1,013	PCS 1MW: 2.9억원 1MWh 배터리: 7.3억원	-
	수명(년)	30	55	10~15	-
평가	장점	.건설 용이	.장시간 사용 가능	.건설 용이 .분산설치 가능 .빠른 속응력	.설비건설 불필요
	단점	.느린 기동시간 .송전망 건설 필요	.장기 건설기간 .송전망 건설 필요 .신규 입지 문재	짧은 수명 및 운전시간	AUTO DR 개발 필요 .사용가능시간 제약

# 감사합니다

국가에너지·자원 정책 개발의 요람  
에너지경제연구원