

# 미래전력망의 과제와 원전문제

석광훈 에너지전환포럼 전문위원  
(과학기술정책학 박사)

2021.8.2.

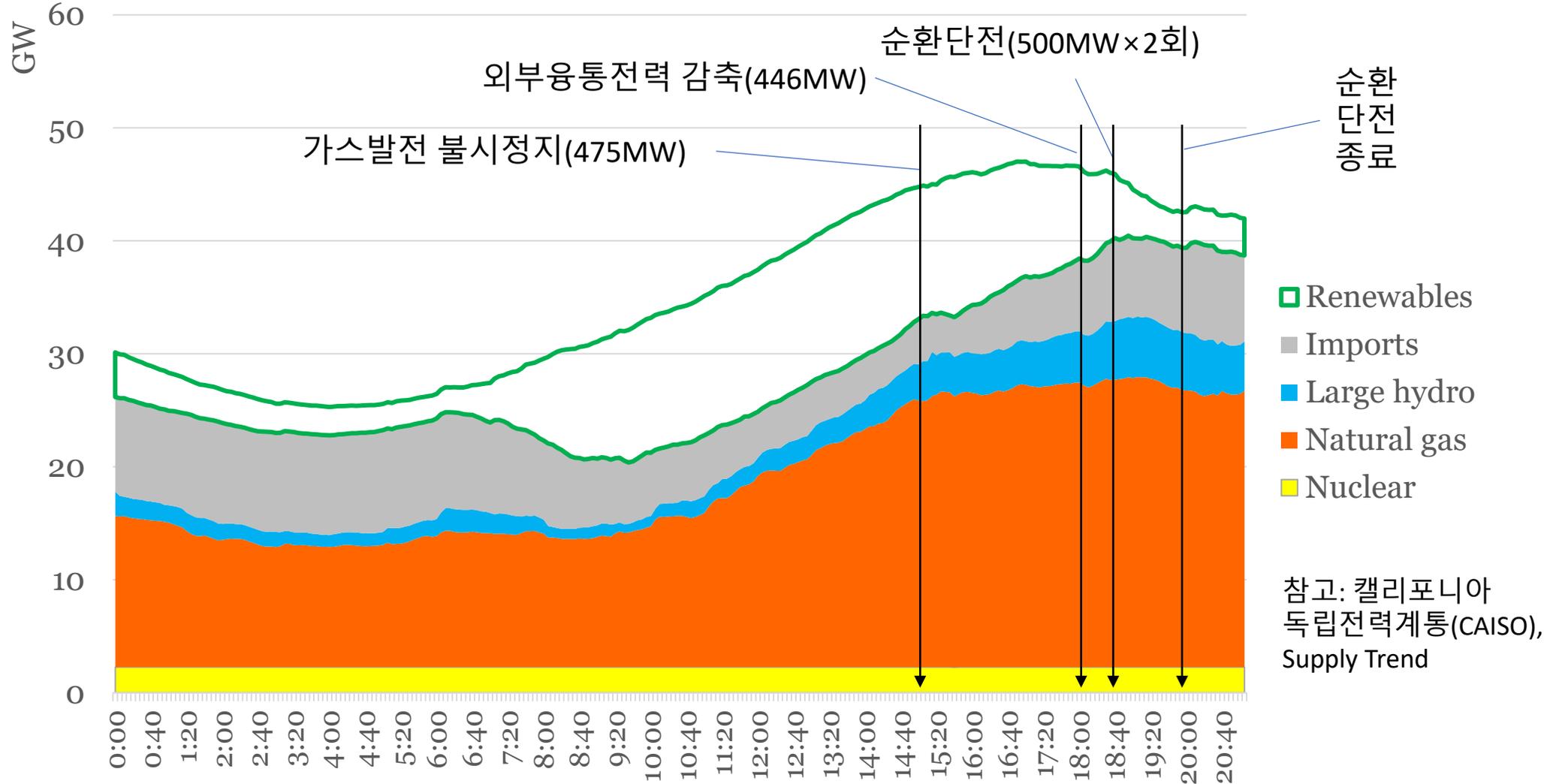
# 발제 목차

1. “탈원전=정전위기”론의 핵심주장과 문제
2. 미래전력망과 원전관련 해외사례: 캘리포니아
3. 미래전력망과 원전관련 해외사례: 영국
4. 국내 재생에너지 증가추세와 도전과제
5. 제주도 풍력제약 관련 해외사례: 아일랜드

# 1. “탈원전, 정전위기”론의 핵심주장과 문제

- “전문가들은 공급예비전력 10GW이상, 예비율 10%이상 유지해야 안전 지적, 탈원전으로 전력대란 위기 (조선일보 7.15)”
  - 근거없는 주장으로 공급예비력은 8월 최대수요 시점을 감안해도 충분
- “탈원전정책으로 원전정비 및 신규원전 운영허가를 늦춰왔으나, 전력수급위기에 정비일정과 운영허가 앞당겨 (중앙일보 7.22)”
  - 독립규제기관인 원안위의 규제품질 및 건전성은 정부정책과 별개문제
  - 한빛 4호기 격납건물 공극, 5호기 원자로헤드 관통관 불법용접으로 인한 장기가동중단은 원자력계의 안전불감증과 원안위의 감독부실로 인한 문제
- 구태한 원전공방을 넘어 재생에너지 증가추세에 있는 국내외 전력망에서 원전의 경직성 문제와 계통유연성 과제 주목 필요

## 2. 미래 전력망 관련 해외참고사례: 캘리포니아 캘리포니아 순환단전(2020.8.14)사례



# 캘리포니아의 2020년 8월 정전배경과 원전

- 단기요인: 가뭄으로 수력발전 출력 감소, 폭염으로 주변계통의 수요증가와 외부용통전력 감소, 가스발전 불시정지
- 정책요인: 주정부의 해양환경규제인 OTC규제(2010)에 따라 지난 10년간 가스발전 30기(11.3GW) 조기폐쇄
  - 폐쇄 설비를 대체할 가스발전이 추진되었으나, 허가 지연으로 공급력 부족

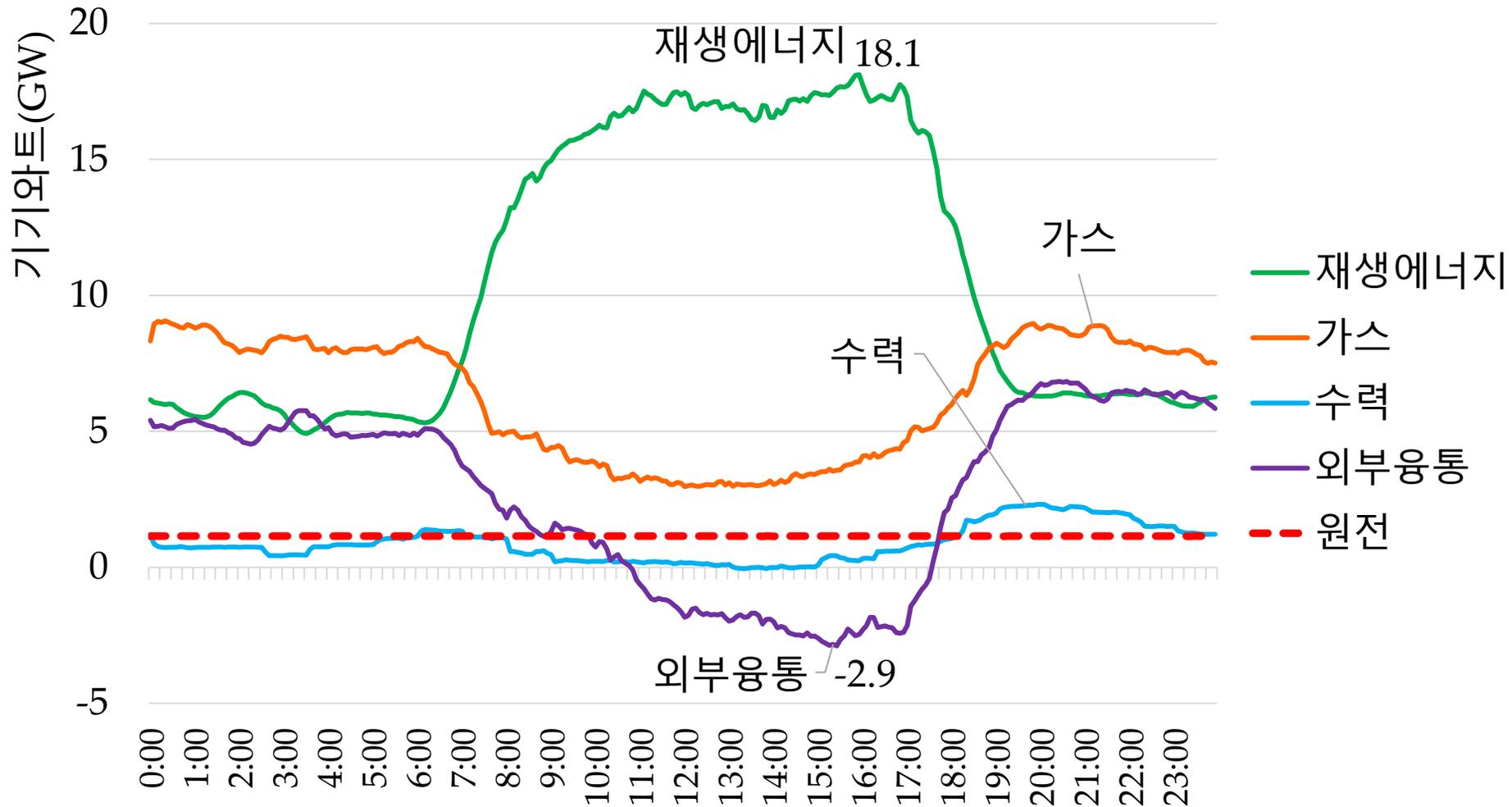
※OTC규제: 온배수 해양방류(Once-Through Cooling) 발전소의 냉각탑설치 또는 폐쇄방침
- 국내 원자력계 주장을 캘리포니아에 적용시, “원전이 많았다면 정전을 피할 수 있었다”는 논리도 가능
  - 그러나 캘리포니아는 순수요 하락추세로 원전가동이 어려운 여건

# 캘리포니아 전력망에서 원전의 문제

- 캘리포니아 재생에너지 증가추세에서 경직성 전원인 원전은 막대한 시스템비용 유발(PG&E 2016)
  - 전력사 PG&E는 캘리포니아주의 “2030년 재생에너지 공급비중 50%목표” 달성을 위해 마지막 원전인 디아블로 원전의 2024/’25 폐쇄결정(2016)
- 실제로 독립계통운영기관(CAISO)은 계통 신뢰도기준 충족을 위해
  - 1) 계통내 최대 단일상정사고(N-1)인 디아블로원전(2.3GW) 또는 PDCI (HVDC, 3.1GW)의 불시정지 대비 예비력을 확보하거나,
  - 2)계통수요의 6%를 예비력(운영예비력 및 보조서비스)으로 확보 (CAISO 2021)  
※ 6%는 서부전력조정위원회(WECC)의 예비력 기준(수요측3%+발전력3%)을 준용한 결과
- CAISO는 계통안정을 위해 유연성자원(1일 기동/정지 반복 및 실시간 출력조정 가능한 전원)의 확대 필요성 제시(CAISO 2016)

# 캘리포니아의 봄철 재생에너지와 원전문제

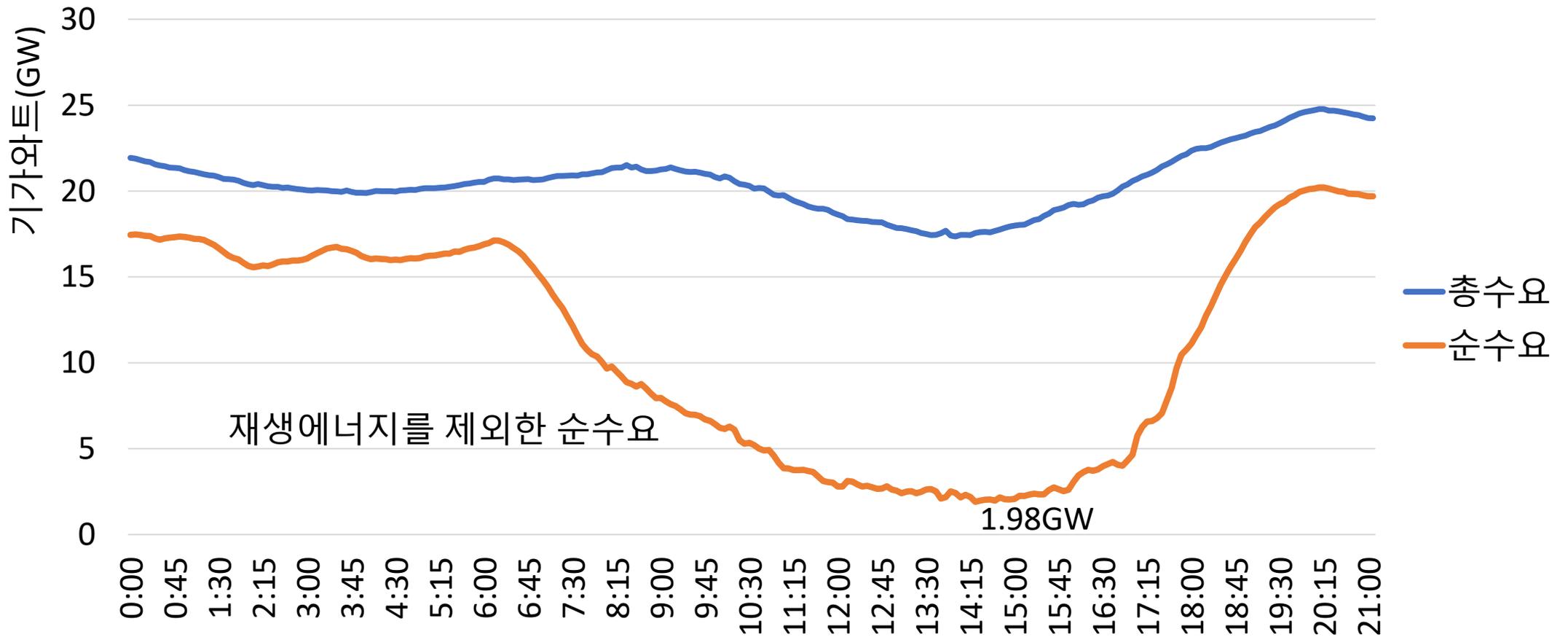
(2021년 4월24일 실적)



참고: 캘리포니아 독립전력계통(CAISO), Supply Trend

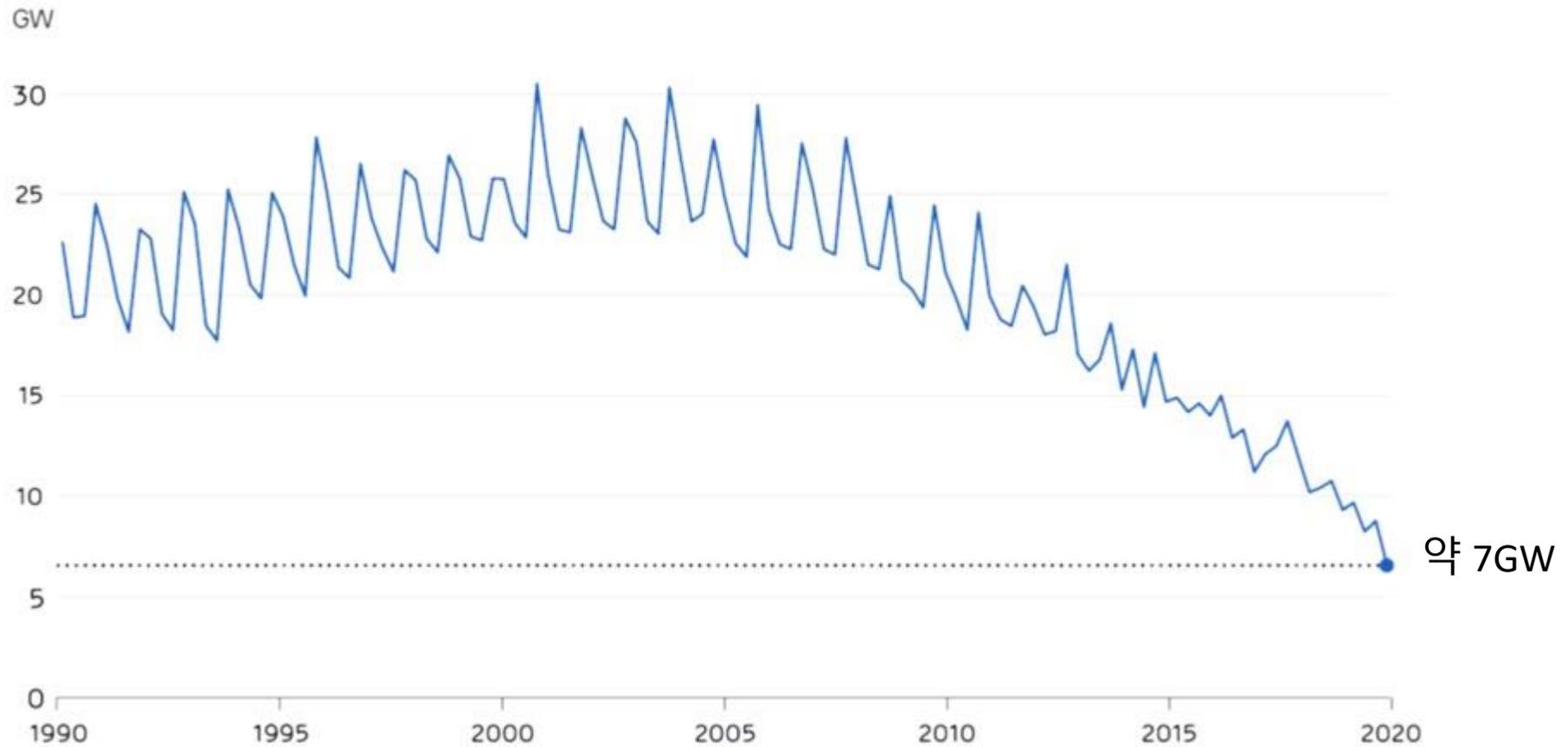
# 수요측 기준에서 CAISO 실적 (4월24일)

2021년 최저 순수요 실적은 2GW로 예상치보다 10GW 더 낮은 수준  
2016년 폐쇄결정이 없었더라도, 디아블로원전(2.3GW)의 퇴출 불가피



참고: 캘리포니아 독립전력계통(CAISO), Net Demand Trend

### 3. 미래 전력망 관련 해외참고사례: 영국 영국 전력계통의 재생에너지증가와 최저 순수요 하락추세



출처: 영국 National Grid-ESO

※순수요 = 총수요 - 변동성 재생에너지(풍력·태양광), 분기별 실적기준

# 영국의 재생에너지증가와 원전 출력감발

- 영국은 지난해 재생에너지의 기록적 증가와 코로나사태가 겹치며 순수요가 최저 7GW까지 하락
  - 영국의 지난해 재생에너지 발전비중은 37.3%(풍력 24.8%)도달
- 전력당국(NG-ESO)은 'N-1 신뢰도요건(N-1 Reliability Requirement)'에 따라 최대 단일상정사고인 사이즈웰-B 원전(1.2GW)의 불시정지 대비 통상적으로 보조서비스 계약을 활용
- 그러나 지난해 순수요 급락으로 원전출력 감발이 더 경제적인 것으로 판단, 5개월(5~9월)간 사이즈웰-B의 50% 출력감발 및 손실비용 보상(£7천3백만=약1,140억원) 조치

# 왜 영국의 조치가 중요한가?

- 영국은 비동기(asynchronous) 송전선(HVDC)으로 유럽과 연계되어 있으나, 사실상 독립전력계통으로 한국의 10년 후 미래를 제시
  - 영국은 힌클리포인트-C 원전을 건설중이지만, 재생에너지의 지속증가로 사이즈웰-B사례처럼 장기간 출력감발 운전 불가피
- 영국전력당국(NG-ESO)은 재생에너지 증가추세에서 가장 중요한 전력망 운영기준으로 유연성을 강조
- 지난해 재생에너지증가에 따른 비상조치로 노후 터빈들을 용도변경해 총 12기의 동기조상기(synchronous condenser)설치
  - 총 12.5GWAs의 무탄소 계통관성 확보(통상적 석탄화력 5기분의 관성)
- 장기적으로 수소터빈, 양수발전, ESS로 전력망 유연성 확보계획

## ※참고: 재생에너지 증가와 계통관성의 감소

- 전력계통에 동기화된 발전기는 운동에너지를 저장 (관성 확보)
- 발전소 불시정지 등 상정사고 발생 직후 나머지 동기(synchronous) 발전기들의 회전체에 저장된 운동에너지는 공급-수요간 균형 유지(관성반응)
  - 발전기들의 터빈 회전수가 줄어들며 전력계통 주파수 하락
  - 상정사고 시점에 가용한 관성반응 총량에 따라 주파수하락 속도 결정
- 관성반응은 주파수 변화율을 결정하는 발전소 불시정지(또는 부하차단) 직후 초기 시간대에 계통 신뢰도 유지에 중요한 기여
- 재생에너지 증가로 관성이 줄어든 미래 전력망에서 대형원전은 최대 단일상정사고 요인으로 전력망 안정을 위협

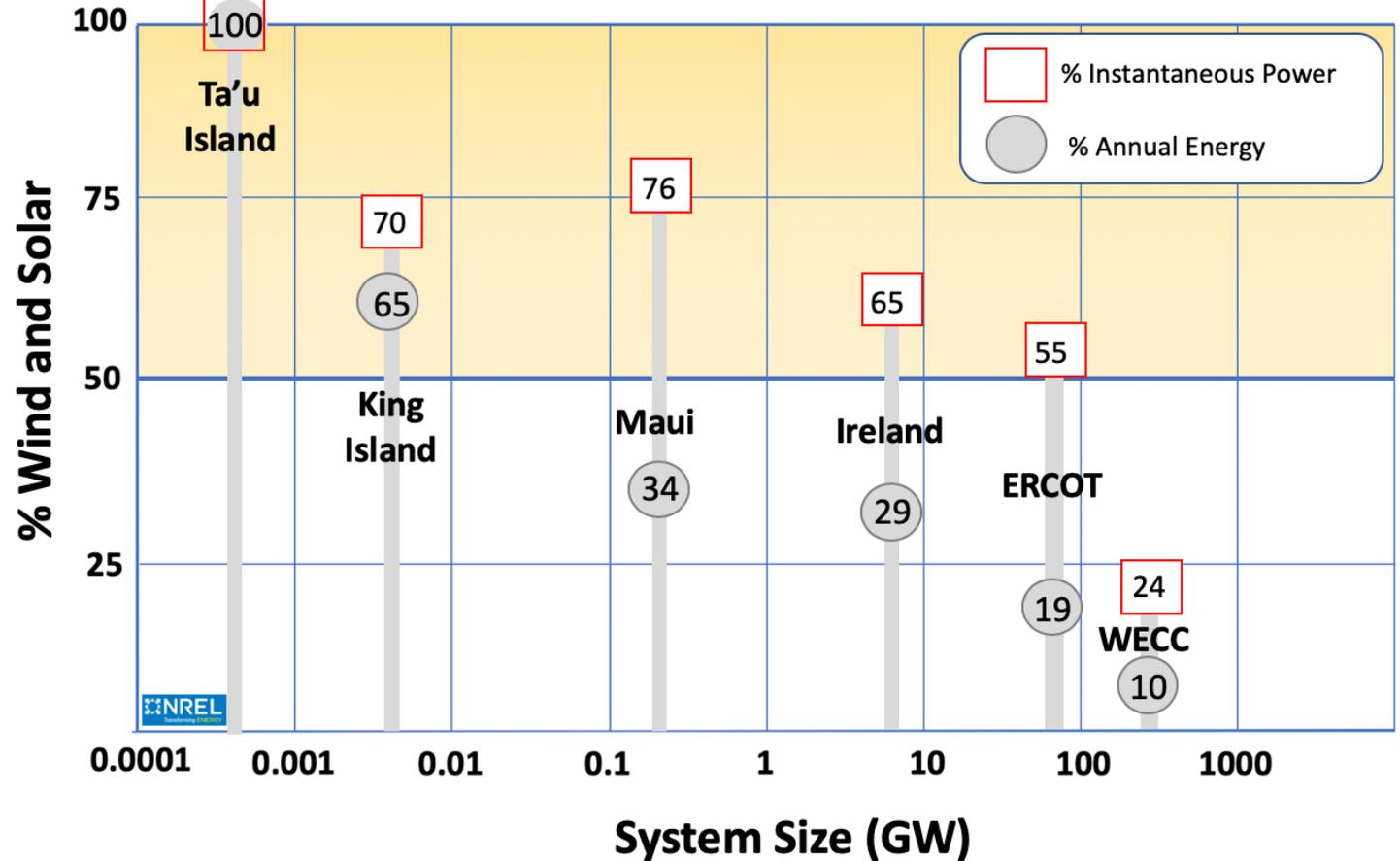
## 4. 국내 재생에너지 증가추세와 원전문제

- RE비중 6.5%에 불과한 국내도 휴일, 주말 원전 불시정지 영향증대
  - 지난해부터 최대원전인 신고리3,4호기를 장기연휴마다 20%출력 감발
- 5월29일 신고리4호기 불시정지로 순간 주파수 59.79Hz까지 하락
  - 915정전(2011년) 59.4Hz→순환단전, 텍사스정전도 59.4Hz →순환단전
  - 양수발전 및 Fast DR로 복구했으나 향후 태양광증가로 원전문제심화
- 재생에너지증가로 2030년대에는 영국처럼 장기간 출력감발 전망
  - 신규 원전 건설은 물론 가동중 원전도 수익보장 불가
- 원자력계의 “탈원전-정전위기”론의 궁극적인 목적인 신한울 3,4호기 건설은 국내외 실정을 감안할 때 비현실적임

# 고립계통에서 재생에너지증가와 원전문제

- RE의 연간 공급비중은 낮더라도 순간전력공급 비중은 매우 높게 형성
- 10년후 국내계통은 2018년의 아일랜드, 텍사스와 유사
  - 최저 순수요는 현재의 절반으로 감소
- 텍사스와 계통규모는 유사하지만, 원전규모는 5배가 넘어 안정성 위협요인

**Wind and Solar in Synchronous AC Power Systems  
as a Percent of Instantaneous Power and Annual Energy**  
2018 Updates



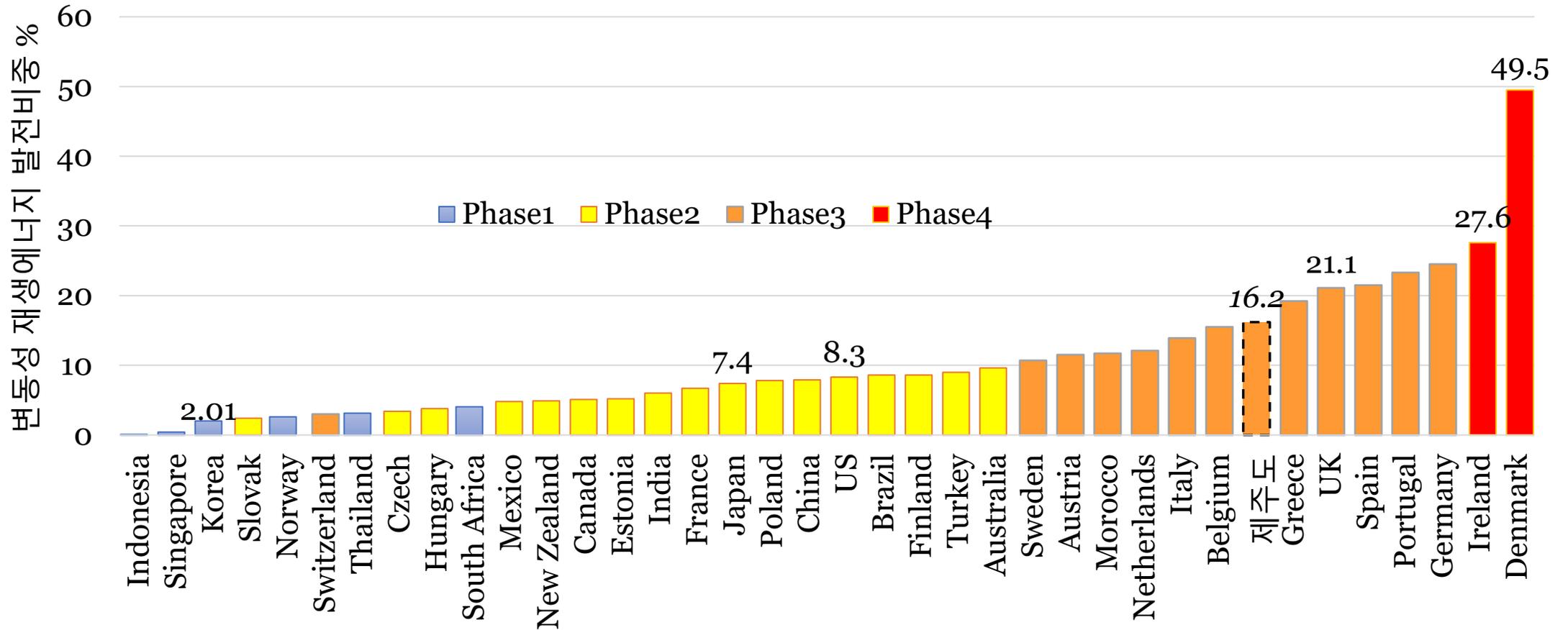
출처: Krposki, B.(2019)

# 미래 전력망의 최우선과제는 유연성 확보

- 전력계통은 항상 수요와 공급의 균형이 필요하며, 균형을 유지할 수 있는 능력은 곧 유연성을 의미
  - 과거 가스 및 석탄의 유연성 공급과 높은 전력수요 증가율이 경직성 전원인 원전의 원활한 건설과 운영을 보장 (공급안정성 확보)
- 재생에너지 증가와 온실가스 제약이라는 조건하의 미래 전력망은 순수요 하락과 전통적 유연성 전원 감소
  - 캘리포니아의 디아블로원전 폐쇄, 영국의 사이즈웰-B 장기간출력감발은 미래 전력망에서 원전의 낮은 생존가능성을 예고하는 사례들임
  - 전통적 유연성 전원을 대체할 신기술과 시장 필요: 동기조상기, 수소터빈, 대형 저장시설, 밸런싱 시장과 수요반응 프로그램

# 각국별 변동성 재생에너지 시장진입단계 (2018실적기준)

아일랜드는 20%대의 비중(2018)임에도 고립전력계통을 감안, 4단계로 분류  
 국내실적 6%(2020), 제주도(16.2%), 영국, 아일랜드 등 해외 고립계통 참고필요



# VRE단계별 계통통합관련 주요성격과 과제

	주요성격	도전과제
Phase1	계통에 미치는 영향 미미	기존계통 운영에 미미한 개선
Phase2	계통운영에 미치는 영향 증대	순수요 변동성 증대, 전력공급패턴 변화
Phase3	VRE발전이 전력계통운영패턴을 결정	VRE발전량이 높을 때 전력공급 안정성 유지
Phase4	VRE이 총전력공급량의 대부분을 차지하는 빈도 증가	전력공급 과잉 또는 과소기간 장기화에 대한 대비
Phase5	VRE 잉여전력의 증대(수일~수주지속)	계절간 잉여전력 저장기술 및 합성연료(암모니아, 메탄올 등)/수소 상용화
Phase6	계절간 또는 격년간 VRE 공급과잉 또는 부족 반복	

# 정부대응의 문제와 실제로 필요한 정책

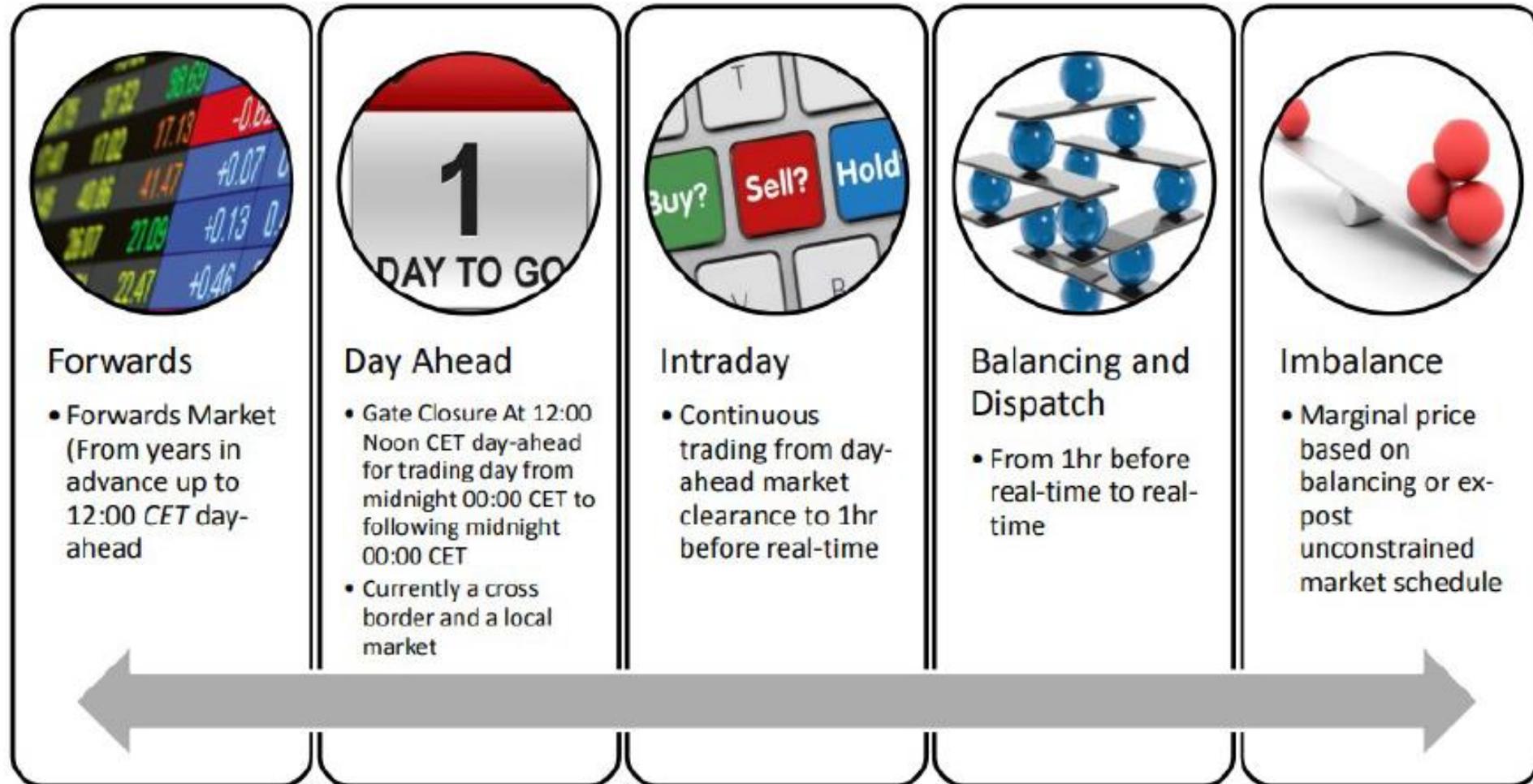
- 시장개편없이 정부(한전)주도의 ‘모자이크식’ 특정설비 및 프로그램(제주 플러스DR 등) 도입은 작동하기 어려움
  - 총괄원가주의와 한전의 유인체계는 단순설비투자를 선호하게 만들며, 다양한 시장참여자들을 비용으로만 인식, 배제 (제주 스마트그리드 사례)
- 하루전시장 및 실시간시장(밸런싱시장)이 전제되어야 공급 및 수요측 시장참여자들이 적기에 진입해 유연성 서비스 개발가능
  - 다양하고 정교한 보조서비스(DR포함), 장주기 저장시설, 수소터빈 등
  - 아일랜드는 실시간시장 도입 후 14개 보조서비스 가동, RE-40% 도달
- 신기술 및 설비가 작동하려면, 이를 보장하는 시장개혁 필요

## 5. 제주도 풍력제약관련 해외사례: 아일랜드

- 지난해 제주도는 계통제약으로 77회의 풍력발전차단 실시
  - 유사한 경험을 겪은 해외 고립계통 사례로 아일랜드 검토필요
- 아일랜드는 2007년 도매전력시장을 개방했으나, 실질경쟁 제한
  - 재생에너지 증가와 고립계통제약으로 전력시장의 대폭개선 검토
- 2018 IE-NI 통합단일전력시장(ISEM)개편 (인구680만명, 연간38TWh발전)
  - 하루전시장(Day-Ahead), 하루중시장(Intraday), 실시간(밸런싱)시장 운영
  - 14개 보조서비스(예비력, 주파수반응, 수요반응 등)를 규제가격과 경매입찰(pay-as-bid)의 혼합형태로 구매, 높은 재생에너지비중 보완
- 재생에너지 전력공급비중은 2010년 12%에서 2020년 40%로 급증
  - 2030년까지 재생에너지 공급목표로 전력공급비중 70% 설정

# 아일랜드 도매전력시장의 시간대별 거래시장

전력의 90%는 Day Ahead, 나머지를 Intraday, Balancing 시장에서 거래

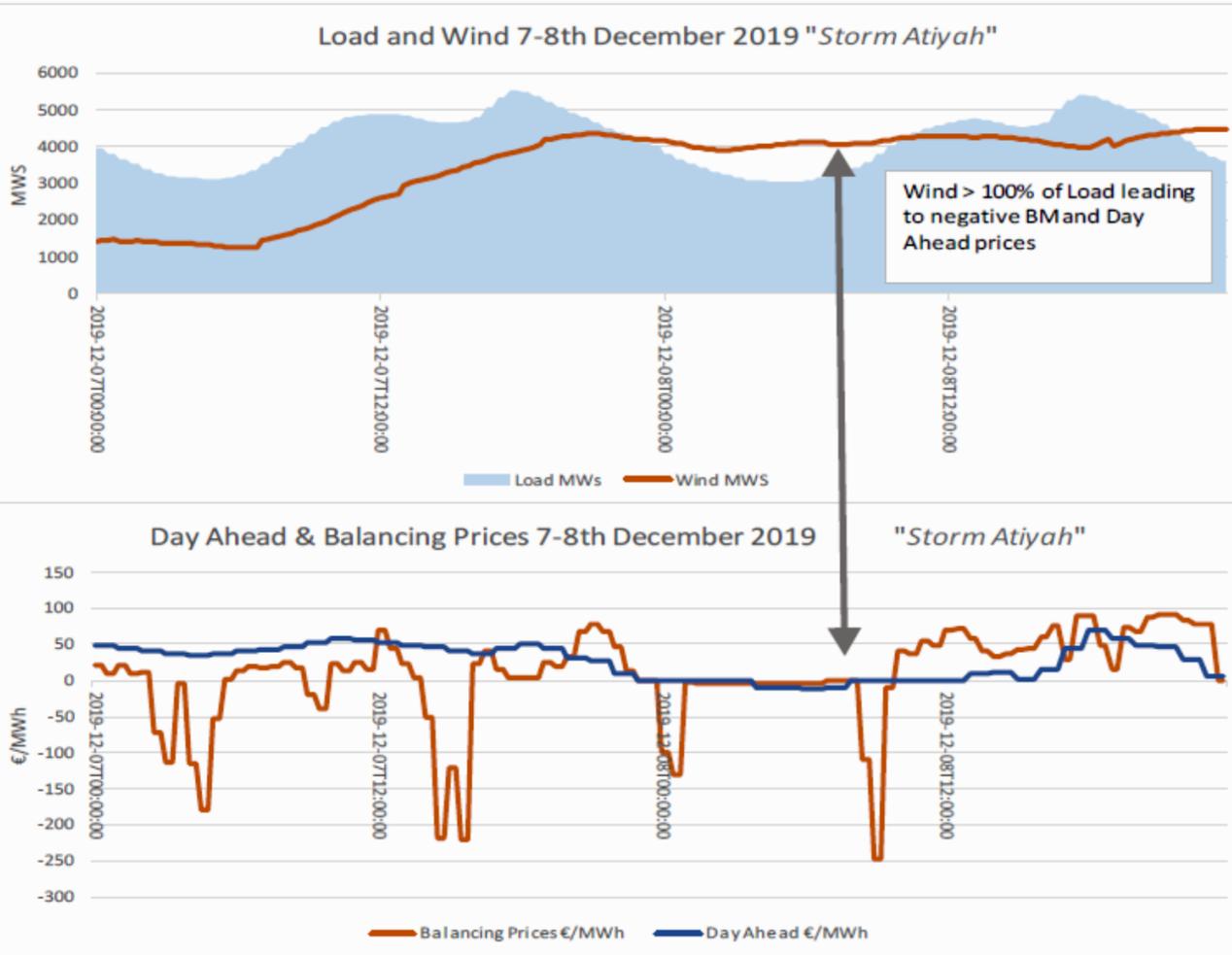


Source: Linehan (2019), "Ireland's Wholesale Power Market", Dec.

# 아일랜드 전력시장에서 풍력과 시장가격 관계

하루전 시장에서 풍력 및 수요예측을 바탕으로 참여자들간 거래, 가격형성  
 밸런싱 시장에서 예측-실제 격차에 따라 실시간 가격형성(수요, 공급 양측참여)

ISEM Power Prices & Wind 7-8th Dec 2019 "Storm Atiyah"



- 2019년 12월 8일 사례는 하루전 시장에서 예측된 발전량보다 많은 풍력발전 발생
- 밸런싱시장에서 수요를 넘어선 풍력발전량에 시장참여자들간 거래를 통해 Negative Price 형성, 수요반응사업자들이 사전 모집, 약정된 소비자들의 수요창출로 잉여전력해소

Source: Linehan, "Ireland's Wholesale Market", 2019 Dec.

	풍력 출력 (MW)	전력 수요 (MW)	하루전 시장가격 (유로 /MWh)	밸런싱 시장가격 (유로 /MWh)
12.8. 6:30 am	4137	3144	-11.9	-4.2
12.8. 8:00 am	4123	3798	-0.3	-247

# 아일랜드 도매전력시장의 보조서비스현황

보조서비스 목록(14개)	약칭	서비스 기능	€/MWh
Synchronous Inertial Response	SIR	(Stored kinetic energy) * (SIR Factor - 15)	0.0050/MWs <sup>2</sup> h
Fast Frequency Response	FFR	MW delivered between 2 and 10 s	2.16
Primary Operating Reserve	POR	MW delivered between 5 and 15 s	3.24
Secondary Operating Reserve	SOR	MW delivered between 15 and 90 s	1.96
Tertiary Operating Reserve 1	TOR1	MW delivered between 90 s and 5 min	1.55
Tertiary Operating Reserve 2	TOR2	MW delivered between 5 min and 20 min	1.24
Replacement Reserve (De-Synchronised)	RRD	MW delivered between 20 min and 1 h	0.56
Replacement Reserve (Synchronised)	RRS	MW delivered between 20 min and 1 h	0.25
Ramping Margin 1 Hour	RM1	The increased MW output that can be delivered with a good degree	0.12
Ramping Margin 3 Hour	RM3	of certainty for the given time horizon.	0.18
Ramping Margin 8 Hour	RM8		0.16
Fast Post-Fault Active Power Recovery	FPFAPR	Active power > 90% within 250 ms of voltage > 90%	0.15
Steady-state Reactive Power	SRP	MVAr capability * (% of capacity that capability is provided)	0.23/MVArh
Dynamic Reactive Response	DRR	MVAr capability during large (> 30%) voltage dips	0.04

# 주요 참고문헌

CAISO (2016), “Fast Facts: What the Duck Curve Tells Us About Managing a Green Grid,” [https://www.caiso.com/Documents/FlexibleResourcesHelpRenewables\\_FastFacts.pdf](https://www.caiso.com/Documents/FlexibleResourcesHelpRenewables_FastFacts.pdf)

\_\_\_\_\_ (2021), Final Root Cause Analysis: Mid-August 2020 Extreme Heat Wave, <http://www.caiso.com/Documents/Final-Root-Cause-Analysis-Mid-August-2020-Extreme-Heat-Wave.pdf>

Gaffney, F., Deane, J.P. & Gallachóir, B.P.Ó.(2019), Reconciling high renewable electricity ambitions with market economics and system operation: Lessons from Ireland's power system, Energy Strategy Reviews, Vol. 26

International Energy Agency, World Energy Outlook 2018, Paris

Kroposki, B.(2019), Summarizing the Technical Challenges of High Levels of Inverter-based Resources in Power Grids, Grid-forming Inverters for Low-inertia Power Systems Workshop April 20-22, Seattle, Washington

Linehan, S. (2019), “ISEM” Ireland’s Wholesale Power Market, 12 Dec.

National Grid ESO, Network Option Assessment Stability Pathfinder Phase 1 Updates, <https://www.nationalgrideso.com/future-of-energy/projects/pathfinders/stability/Phase-1>

North American Electric Reliability Council (2018), Disturbance Control Standard – Contingency Reserve for Recovery from a Balancing Contingency Event (BAL-002-3), <https://www.nerc.com/pa/Stand/Reliability%20Standards/BAL-002-3.pdf>

PG&E (2016), Joint Proposal for the Orderly Replacement of Diablo Canyon Power Plant with Energy Efficiency and Renewables, JUNE 21, [https://www.pge.com/includes/docs/pdfs/safety/dcpp/MJBA\\_Report.pdf](https://www.pge.com/includes/docs/pdfs/safety/dcpp/MJBA_Report.pdf)

Western Electricity Coordination Council (2017), WECC Standard BAL-002-WECC-2a — Contingency Reserve, [https://www.nerc.com/\\_layouts/15/PrintStandard.aspx?standardnumber=BAL-002-WECC-2a&title=Contingency%20Reserve&jurisdiction=United%20States](https://www.nerc.com/_layouts/15/PrintStandard.aspx?standardnumber=BAL-002-WECC-2a&title=Contingency%20Reserve&jurisdiction=United%20States)