

---

# 공무 국외출장 결과 보고서

## [AI기반 - 한국형 VPP 연구과제]

---

2025. 6.



**전력신사업팀**

작성자 : 차장 이원행 (☎8963)

주임 장윤임 (☎8967)

주임 최상훈 (☎8655)

# 1

## 출장 개요

□ 출장기간 : '25.5.11(일)~5.18(일), 6박 8일

□ 출장지

- 이탈리아(로마) Enel X 본사
- 아일랜드(더블린) 실시간 관제센터(Network Operation Center, NOC)

□ 출장자

- 전력신사업팀 이원행 차장, 장윤임 주임
- 계통개발팀 최상훈 주임

□ 출장목적

- 「AI기반 - 한국형 VPP\*」 과제 추진 관련 분산자원 활용을 위한 사례조사 및 정보공유

\* 「한국-독일 공동연구를 통한 적응형 AI 기반 분산전원 급전운영 기술개발 및 한국형 VPP 대규모 실증

월 일 (요일)	장소	내용
5.11(일)	-	○ 이동(인천 ⇒ 이탈리아(로마))
5.12(월)	이탈리아 (Enel X 본사)	○ 국내 전력시장 및 사업 현황 공유
5.13(화)		○ 글로벌 유연성 시장 논의
5.14(수)		○ 글로벌 PPA 및 정책 및 사례 분석
5.15(목)	-	○ 이동(이탈리아(로마) ⇒ 아일랜드(더블린)) ○ Enel X Global Network Operation Center 견학
5.16(금)	아일랜드 (Enel X 더블린)	○ End-user(Dublin Airport) 현장 방문
5.17(토)	-	○ 이동(아일랜드(더블린) ⇒ 인천+1)
5.18(일)		

## 2

## 주요내용

### □ Enel X 기업 소개

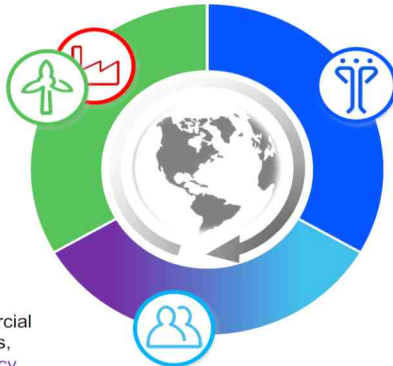
- 세계적으로 유연성 자원 약 10GW(50,000여개 고객)를 운영 중이며, DR(Demand Response), 에너지 효율, VPP(Virtual Power Plant)\* 등 다양한 에너지 서비스 제공
  - \* 독립 가상발전소(VPP) 플랫폼 보유 및 글로벌 네트워크 운영 센터(NOC, Network Operations Center)를 연중무휴 운영
- 특히, 보유 발전기 75%을 재생에너지\*로 구성하고, 수요반응 등을 활용한 유연성 운영 노하우 축적 등 에너지 전환 선도에 주력

### Enel's Global Business Lines



#### Enel Green Power & Thermal Generation

Leads the rapid expansion of renewable assets, oversees global thermal and storage asset management, ensuring secure operation and maintenance of the generation fleet, maximizing operational efficiency across regions, and conducting engineering and construction activities.



#### Enel Grids

Guarantees reliability and quality of service in the energy supply through efficient, resilient and digital grids

#### Enel X Global Retail

Optimizes integrated margin while driving commercial strategies, manages energy offerings and services, optimizes customer value and operational efficiency while innovating lifecycle solutions, exploring new technologies and business models, and overseeing the e-Mobility portfolio across countries to maximize growth and profitability

#### Global Energy and Commodity Management

Oversees operational functions, including maximizing integrated margins within risk limits, optimizing energy supplies, dispatching generation fleets, trading energy commodities in wholesale markets for the hedging needs of the Group.

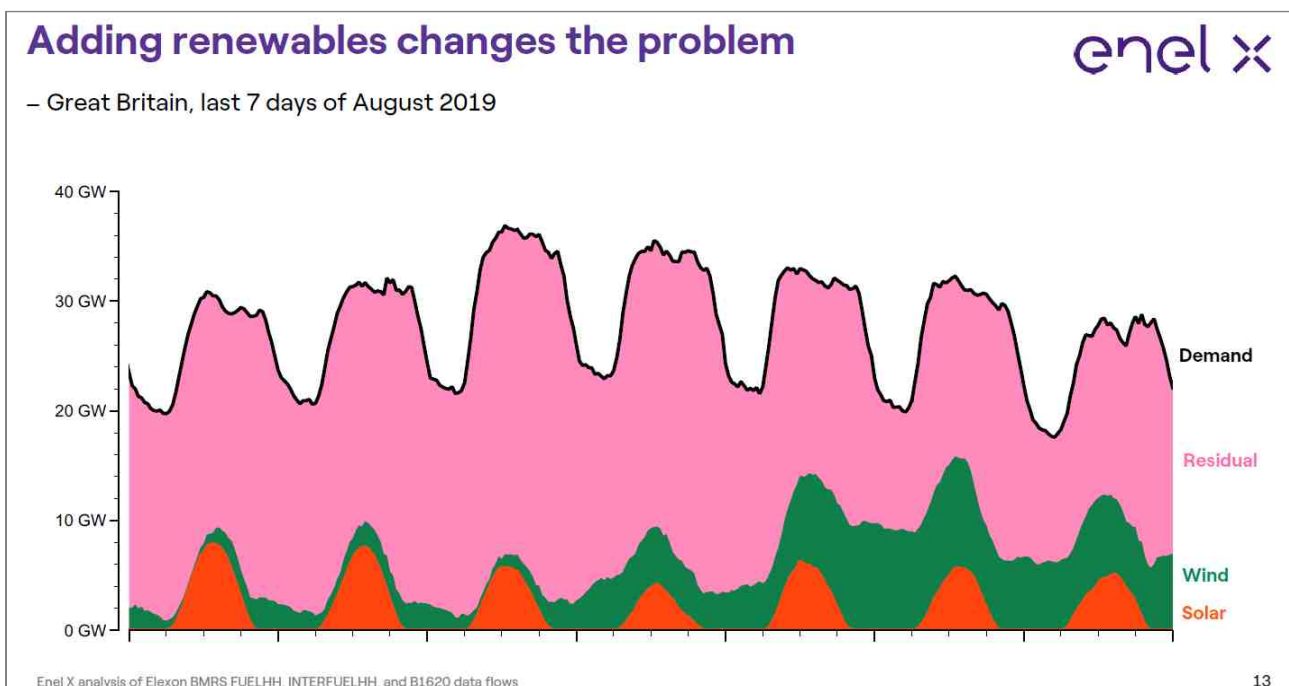
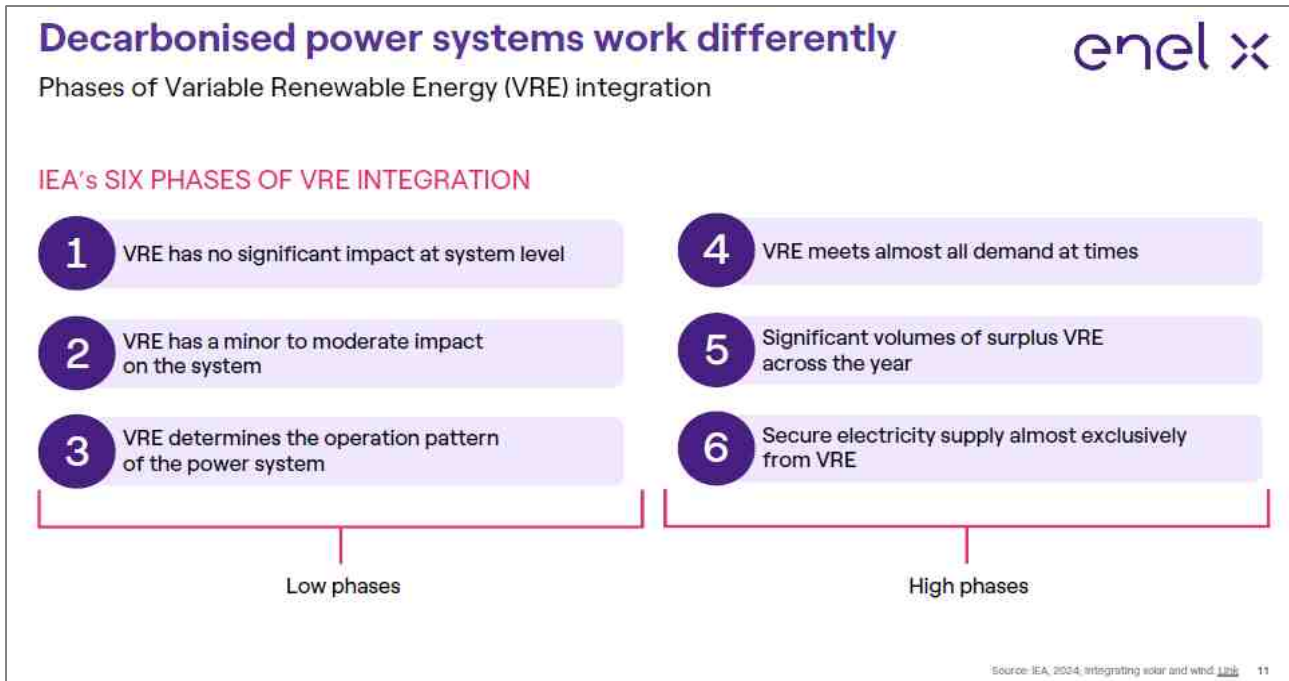
### The role of B2B-B2G in Enel's Portfolio in 2025



\*Data Power+Gas from Italy, Spain, LATAM - P&S, #pod e #pdr included

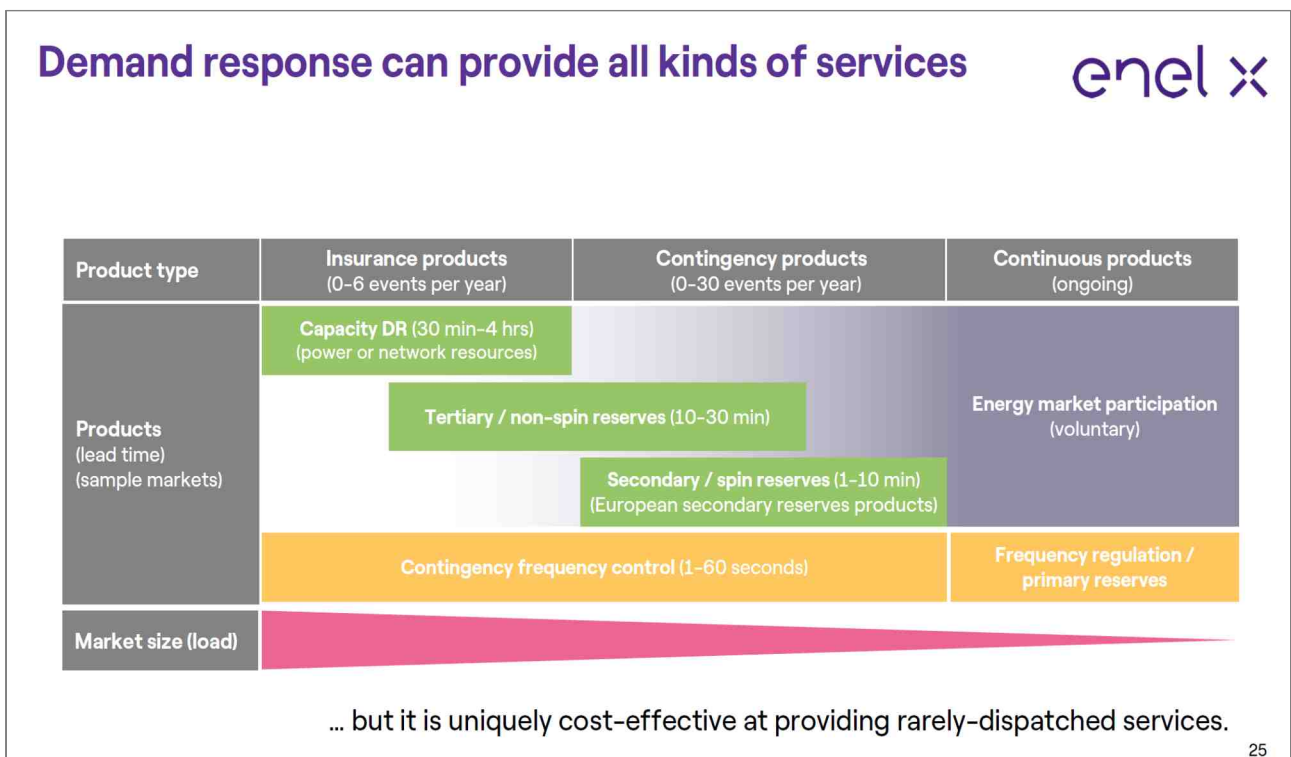
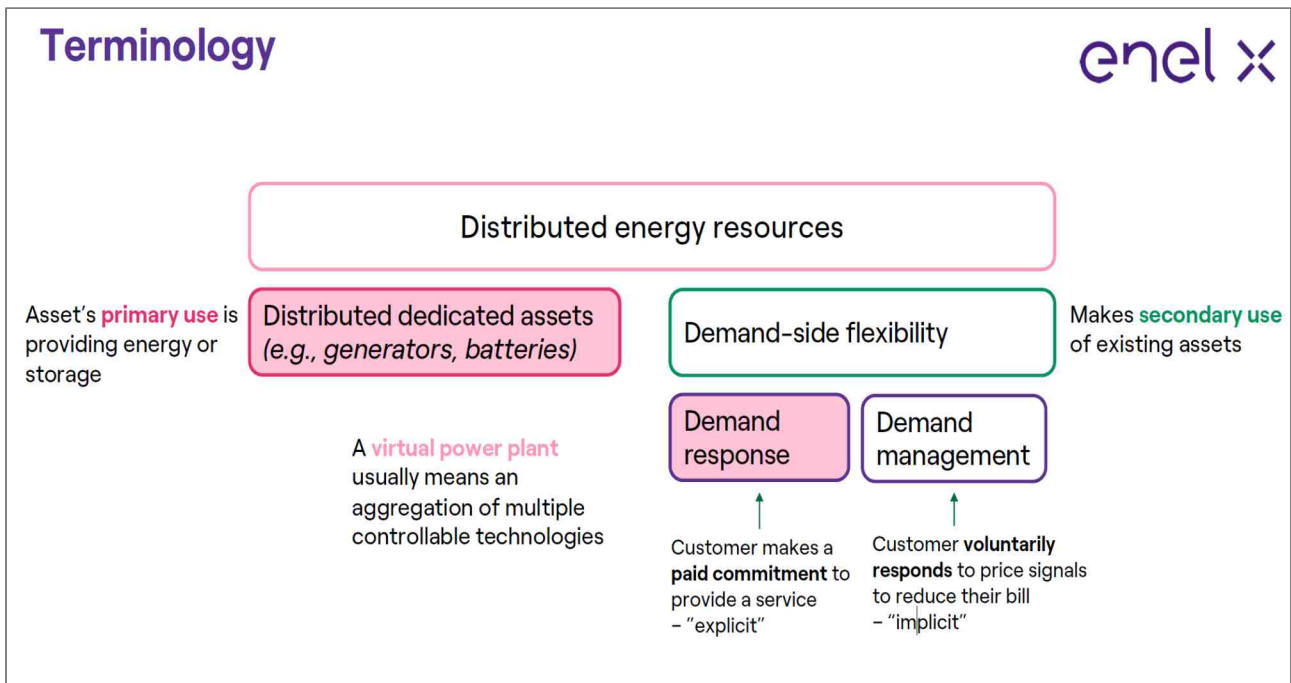
## □ 재생e 확산에 따른 유연성 자원의 필요성

- 한국이 IEA가 제시하는 VRE Integraion 4단계에 도달하지 않았지만, 유연성 자원 도입을 적극적으로 고려하여야 할 시기 도래
- 재생e 증가로 인해 계통 운영자는 전통 자원으로 재생E와 수요 사이에 잔여수요(Residual Demand)를 맞춰야 하는 어려움이 증가
- 잔여수요에 맞춰 유연하게 응동 할 수 있는 자원의 필요성 급증



## □ 유연성 자원으로서의 수요형 VPP

- 수요측 유연성 자원은 수요반응과 수요관리\* 구성되며, 그 중
  - \* 타임베이스 요금제로 사용자가 자발적으로 사용량을 조절하도록 유도, 예측은 가능하나 정확도가 떨어지는 것이 특징
- 참여빈도와 지속시간에 따라 거의 모든 종류의 서비스에 제공
- 분산자원(ESS)과 결합한 수요형 VPP로 다양한 시장에서 대응 가능



□ 유연성 확보를 위한 수요형 VPP의 경쟁력

- (경제성) 발전기 건설 대비 초기 투자비 및 운영비(고정비)가 낮음
- (기술요건) 비교적 간단한 기술 요건으로 참여 진입장벽이 낮아 다양한 자원의 시장 참여를 유도 할 수 있음
  - 산업군에 따른 다양한 부하 유형을 확보할수록 포트폴리오 구성의 안정성과 유연성이 강화됨

### DR has a different cost structure to generation enel x

	Generators	Demand response
<b>Capital costs (per MW)</b>	<b>High:</b> Cost of generator and construction	None: Already covered by primary use <b>Low:</b> Additional metering and control equipment
<b>Fixed costs (per MW-year)</b>	<b>High:</b> Fixed O&M costs	None: Already covered by primary use <b>Low:</b> Customer and aggregator's operational costs
<b>Variable costs (per MWh)</b>	<b>High:</b> Variable O&M costs	Only if backup generators being used
	<b>High:</b> Fuel costs	Only if backup generators being used <b>Highly variable:</b> Opportunity costs

### Dispatch costs vary hugely between customers and by time and duration of dispatch enel x

Generators' costs are easy to model

cost vs duration: A straight line starting from the origin and increasing linearly.

Some customers' costs are mostly fixed

cost vs duration: A horizontal line that remains constant for a period and then increases linearly.

But a manufacturing plant might face overtime, and potentially a lost contract

cost vs duration: A horizontal line that jumps to a higher level at a certain duration and then continues linearly.

Cold storage can only respond for so long - food will start to spoil

cost vs duration: A horizontal line that jumps to a very high cost at a specific duration.

An aluminium smelter would incur huge costs if the metal cooled enough to solidify

cost vs duration: A horizontal line that jumps to a very high cost at a specific duration.

What it comes down to:

customer potential vs required duration: A downward-sloping line.

You can only discover these costs through negotiation

28

## □ 미국(PJM) 사례의 주요 성과 및 구조적 특징

- ◎ 응답 안정성 확보
  - 다양한 부하 패턴의 참여자 조합을 통해 시간대별 안정적인 응답 가능
  - 실제 프로그램 운영 결과, DR 자원이 약정된 응답 수준에 근접한 성과를 지속적으로 유지
- ◎ 경제적 가치 입증
  - 제도 전반의 비용효율성 제고를 통해 연간 약 11 billion USD(약 14조원) 비용절감 효과 도출(2013-14년도 기준)

### ① Aggregator 참여 허용 이후 DR 참여 확대

- 2007년 Aggregator 제도 도입 이후 전체 참여규모 및 1MW 이하 소형 자원의 참여가 비약적으로 증가
- 소형 고객 참여 증가와 다양한 부하 패턴 자원의 모집이 가능해지며 포트폴리오 다양성 확보

### ② 실시간 데이터 요구 배제로 진입장벽 완화

- 실시간 데이터 제출 의무를 배제하여 기술적 진입장벽을 낮춤
- 참여 사업자가 자체 기술 수준에 맞는 방식으로 참여 가능, 기술요건의 자율성 확보

### ③ 비용효율성 제고 및 참여 활성화

- 기술 수준을 사업자 자율에 맡겨 불필요한 고정비 부담을 최소화함으로써 비용 효율성 극대화
- 경제성 향상으로 다양한 산업군 및 고객층의 참여 유도

### ④ 단순한 규칙에서 시작해 점진적 정교화

- 초기에는 단순한 규칙으로 운영하여 진입 용이성 확보
- 높은 참여율 기반으로 세부 규칙을 점진적으로 정교화, 시스템 안정성 향상

# PJM Reliability Pricing Model

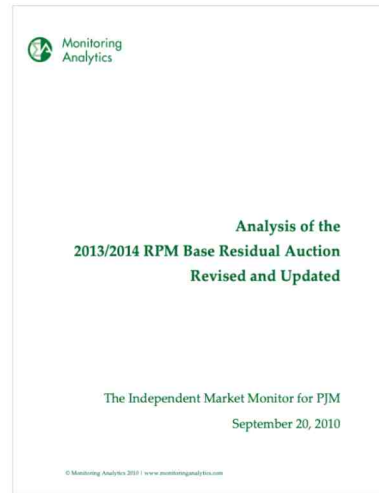


Billions in cost savings driven by DR and Energy Efficiency

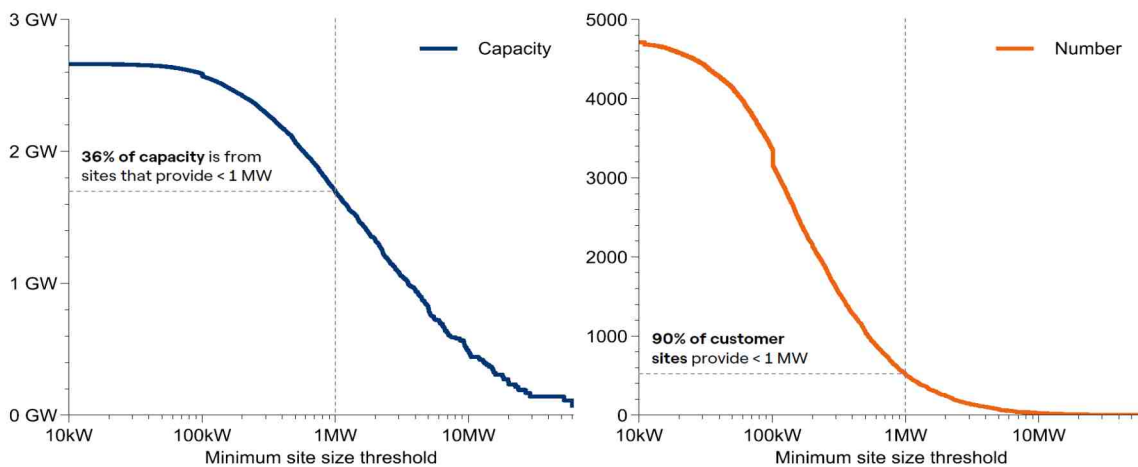
//

Total RPM market revenues for the 2013/2014 delivery year were \$6.7bn. If no DR or Energy Efficiency had been offered into the auction, these would have been \$18.5bn, a difference of \$11.8bn compared to the total based on actual results.

//



## Our portfolio in PJM ... is not just huge sites



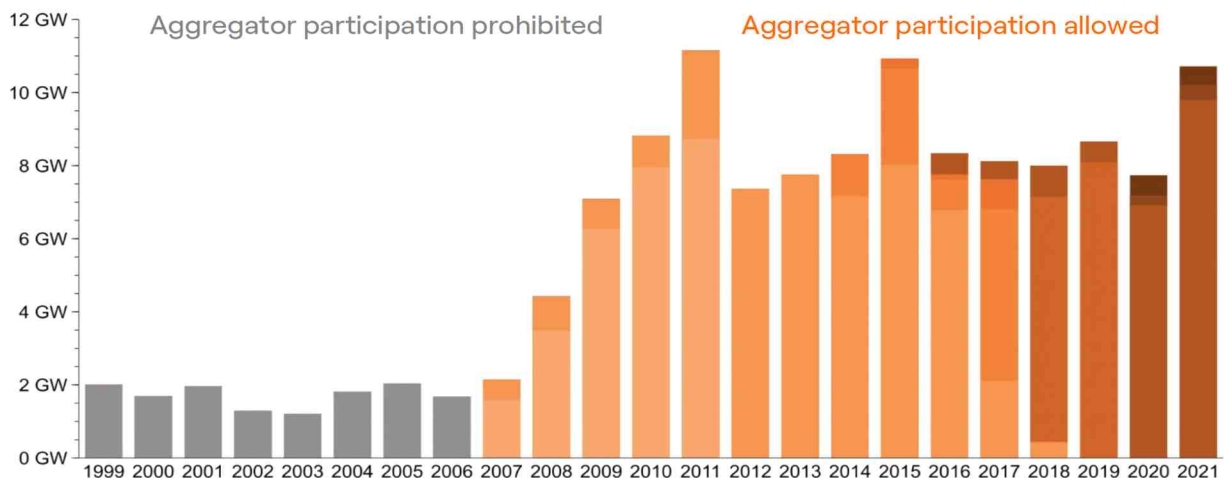
Data: EnerNOC's PJM portfolio, as at May 2017.

34

## PJM



2007: a turning point as aggregator participation begins



## □ 호주(NEM) 사례의 주요 성과 및 구조적 특징


- ◎ DR 기반 VPP 활성화
  - DR 자원이 FCAS 주요 응답 자원으로 자리잡음
  - 제도 개선 이후 성공적인 수요형 VPP 모델 정착
- ◎ 계통 안정성 및 유연성 향상
  - 다양한 응답 속도 시장 구성과 Stacking 구조로 유연성 자원 활용성 증대


- ① 다계층 주파수 응답 서비스 시장과 DR 자원 연계
  - 5분 단위 실시간 에너지 시장과 총 10개 주파수 응답 보조서비스(FCAS) 시장을 운영
  - 8개 시장에 DR 자원 참여 허용, 응답 속도에 따라 1초~5분 이내 응답 가능
- ② Stacking 구조를 통한 시장 동시 참여 허용
  - 동일 자원이 주파수 하락·상승 및 응답속도별 FCAS 시장에 동일 용량으로 중복 입찰 가능 예: 1초 이내 응답 후 5분 지속 가능 자원은 4개 FCAS 시장 동시 참여 가능
- ③ 실시간 제어 배제와 사후 검증 기반 설계
  - 고해상도 데이터는 사후 검증용으로만 활용
- ④ DR 자원의 발전기와 동등한 보상 체계 적용
  - DR 자원도 한계가격(Marginal Price) 기반 보상 적용


### Frequency Control Ancillary Services (FCAS)



Australia getting many things right

 DR participation across **eight frequency programs**, from very fast (1-second response) to slow (5 minutes)

 **High-resolution data** used to validate service delivery, but not needed in real time

 **One test** at the start of the contract; at a pre-agreed time; repeated only if major changes

 DR resources **paid for availability** at the marginal price, just like generators



## □ 뉴질랜드 사례의 주요 성과 및 구조적 특징

- ◎ 벌칙 부재에도 높은 성능 유지
  - 규제기관의 높은 성능 기준과 신뢰도 기반 운영으로, 안정적인 성능 유지
- ◎ 참여 시장의 다양성과 이중 참여구조
  - 다양한 응답 속도 시장 구성과 Stacking 구조로 유연성 자원 활용성 증대

### ① 수요자원이 전체 주파수 응답의 74% 이상 제공

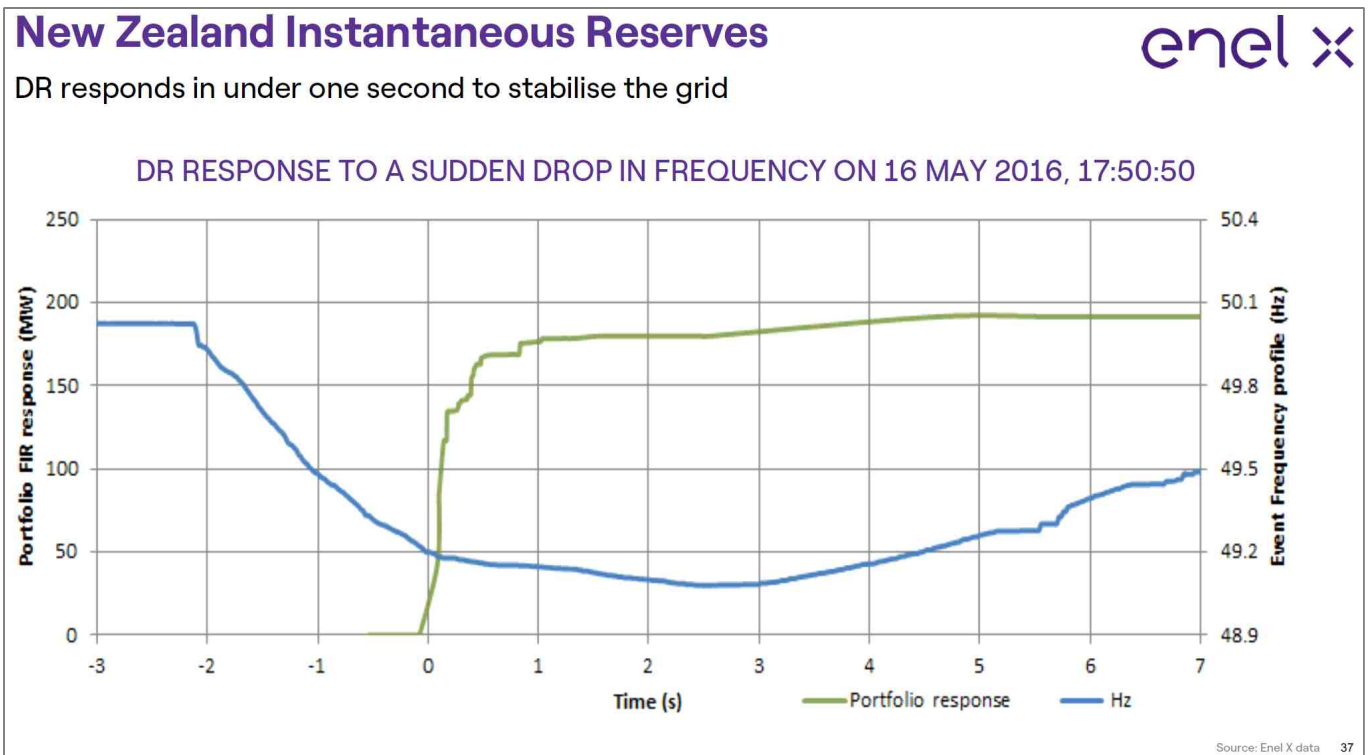
- 낮은 관성, 소규모 전력계통 특성에 따라 수요자원의 역할이 핵심적이며, '순간예비력(instantaneous reserve)' 기반으로 수요형 VPP를 적극 운영

### ② 1초 이내 반응 요구되는 '순간예비력'\* 프로그램 운영

\* 기준 주파수 50Hz → 49.2Hz 이하로 \*\*200ms 이상 유지 시 1초 이내 반응 필수

### ③ 패널티 부재에도 강력한 신뢰도 유지 시스템

- 규제기관의 높은 성능 기준 충족 필요로 신뢰성 확보가 전제됨
- 응답 실패 시 문제 보고와 개선 계획 제출을 의무화하고 있으며, 패널티는 없지만 프로그램 퇴출 가능성으로 높은 신뢰성 유지



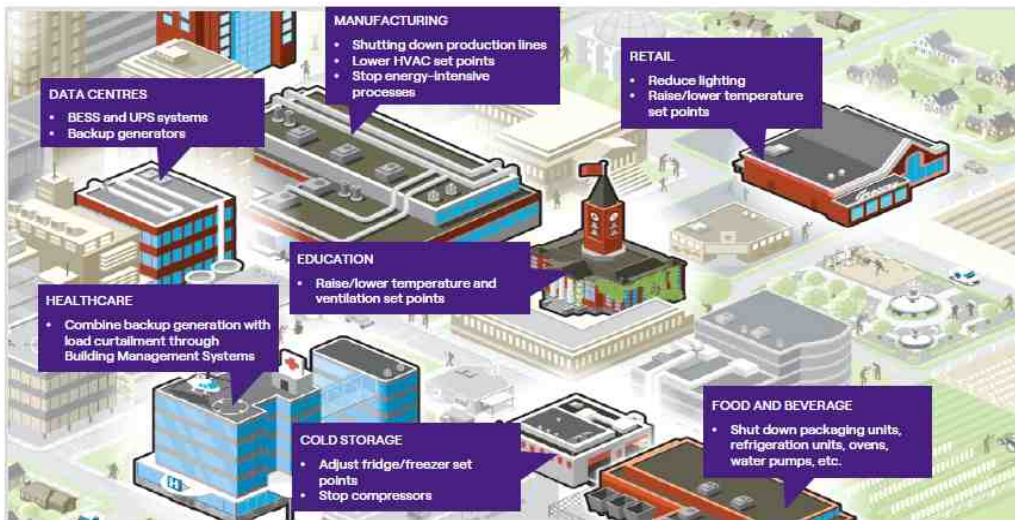
## □ 주요 수요반응 활용 자원

- 데이터센터, 소매점, 학교, 병원, 냉동창고 등이 있으며, 산업의 특성에 따라 응동 용량, 반응 속도, 지속 시간 등 다양한 패턴을 가짐
- “Gogoro”의 경우, 전기 스쿠터를 위한 배터리 교환 인프라를 이용 대만의 보조 서비스인 S-REG\*에 참여

\* Static Regulation Reserve : 단방향 주파수 상향 예비력으로 1초 이내에 주파수 이상을 감지, 10초 안에 전력 출력의 100%에 도달하도록 요구

## Typical “assets” used to deliver the DR response

enel x

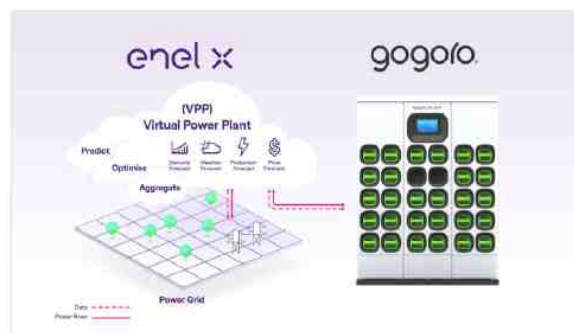


42

## Gogoro

Participating in Taiwan's S-Reg Frequency Regulation

enel x



- ▶ Over 2,000 battery swapping stations across Taiwan
- ▶ Initially participating in frequency response market by modulating charging load
- ▶ Bidirectionality will increase both capacity and availability
- ▶ Total capacity: 1.3 GWh of storage

43

## Coca Cola

Participating in South Korea's KPX Reliability DR



- ▶ Supporting Korea during peak demand
- ▶ 60 minutes dispatch notice
- ▶ Max. 4 hours dispatch duration

### ENERGY MANAGEMENT PLAN

- ▶ Reduce 80% of PET-5 freezer load (576kW) and PET-5 compressor load (400kW)
- ▶ Shut down lighting, air conditioning, HVAC: 25kW
- ▶ Total load reduction: 1.1 MW

## Microsoft Data Centres

Participating in Ireland's Dynamic DS3



- ▶ Ultra-fast, dynamic frequency control
- ▶ 2-second dispatch notice
- ▶ Max. 5-minute dispatch duration

### ENERGY MANAGEMENT PLAN

- ▶ The site has 110MW generators and 60MW CHP
- ▶ BESS is automatically activated when a frequency event is detected (response is proportional to frequency drop)
- ▶ Process is remotely controlled by Enel X
- ▶ Total load reduction: approx. 20 MW

46

## ARENA Commercial Refrigeration Flexible Demand

Participating in FCAS and wholesale price arbitrage



- ▶ Participation in FCAS and wholesale price arbitrage
- ▶ ~300 stores signed up, including grocery, supermarket, convenience, beverage and last mile logistics sectors
- ▶ Sub-second response
- ▶ Controlled by Enel X IoT device installed onsite

## Irish Life (commercial/real estate corporate office)



Participating in Ireland's DS3



- ▶ Ultra-fast reserves for frequency control
- ▶ 2-second dispatch notice
- ▶ Max. 5-minute dispatch duration

### ENERGY MANAGEMENT PLAN

- ▶ When a frequency event is detected, customer activates breakers to shut down the HVAC system for 10 minutes.
- ▶ Total load reduction: approx. 695 kW

## Mahle Behr Dayton (vehicle/parts manufacturing)



Participating in PJM's Emergency Load Response



- ▶ Supporting PJM during peak demand
- ▶ 30 minutes dispatch notice
- ▶ Max. 6 hours dispatch duration

### ENERGY MANAGEMENT PLAN

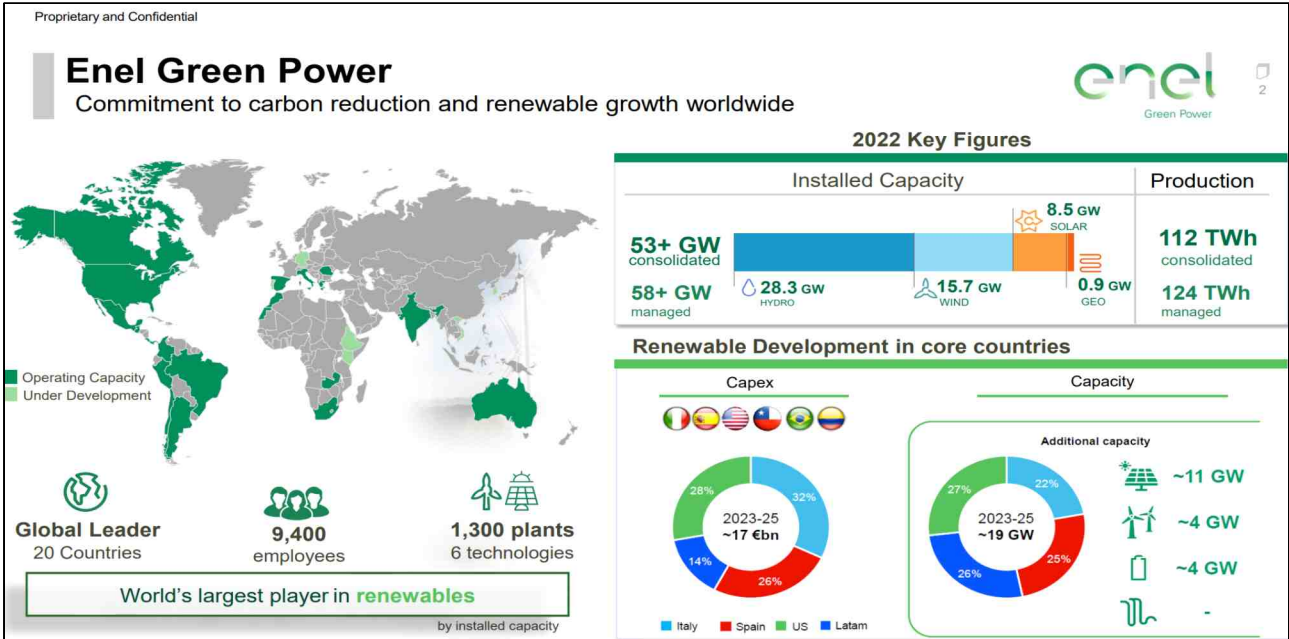
- ▶ Curtail 70% of production
- ▶ Shut down 3 chillers
- ▶ Shut down 40 plastic presses
- ▶ Set 3 furnaces idle
- ▶ Total load reduction: approx. 3MW

44

## □ 글로벌 PPA 정책 및 사례 분석

### ◎ Enel Green Power 개요

- 20개국에서 53GW 이상 설비 운영
- 누적 PPA 계약: 12GW 이상 (150건 이상 계약 체결, 11개국 대상)
- 고객: 글로벌 C&I(Customer & Industrial) 수요처 중심



### [PPA 구조별 분류 및 특징]

#### ① Virtual PPA (Financial PPA)

- 전기 실물 인도 없이 가격 차액 정산(CfD 방식)
- 재생에너지 인증서(REC, GoO 등) 별도 이전
- 위치 제약이 없고 공급지 분산 가능
- 회계 및 세무 영향 고려 필요, 네트워크 요금 절감 효과 없음

#### ② Physical PPA - Sleeved 구조

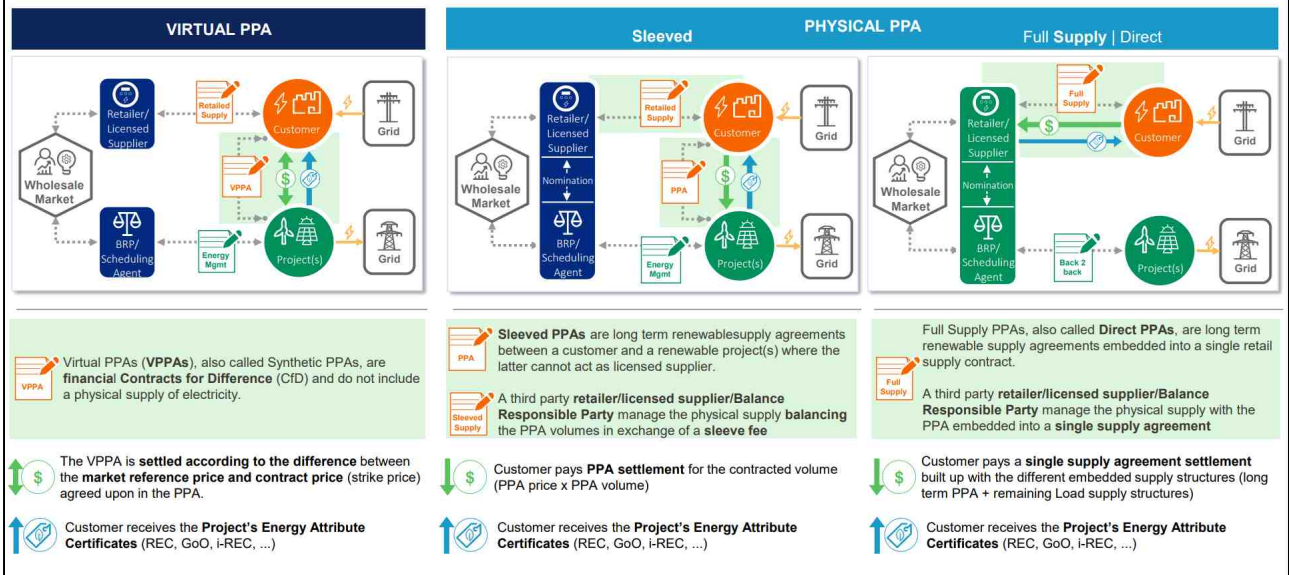
- 제3자 소매공급자/BRP를 통한 실물 공급 및 정산
- 공급자와 수요자 간 장기 계약 체결 후 소매공급자 통해 물리적 송전
- 공급자 측 불일치 비용(imbalance cost) 및 수수료 발생
- 구조적으로 한국형 직접PPA(1:1:1 구조)와 유사

#### ③ Physical PPA - Full Supply (Direct PPA)

- 리테일 계약에 PPA를 통합
- 전체 부하(load)에 대해 단일 공급계약으로 관리
- 수요자 입장에서 운영 용이, 비용 예측 가능성 제고
- 다양한 요금구조(정액, 정률, 혼합형)를 혼합 적용 가능

# Corporate PPAs

## Transactions Types



### [주요 계약 조건 및 리스크 할당 사례]

- 계약기간: 통상 10~15년
- 가격구조: 고정형(fixed), 지수연동형(indexed), hybrid collar 구조 등
- 볼륨 기준: ①발전량 연동(Pay-as-generated), ②소비량 연동(Pay-as-consumed), ③계약기준(Pay-as-contracted)
- 리스크 요소: ①발전량 변동성(자원 부족, 발전설비 성능 저하 등) ②시장가격 변동성 (floating price risk) ③규제 변경 리스크 (정산방식, 세제 변화 등) ④송전망 혼잡/불균형 비용

# PPA Risks mapping

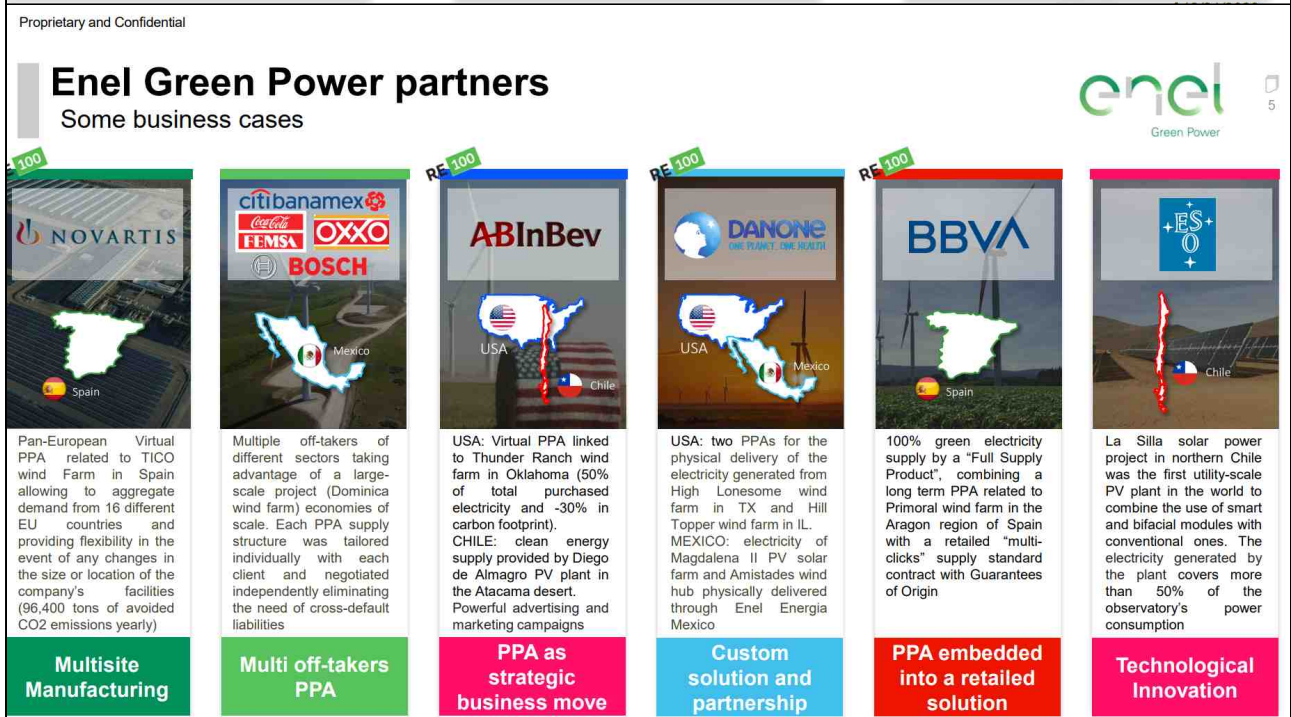
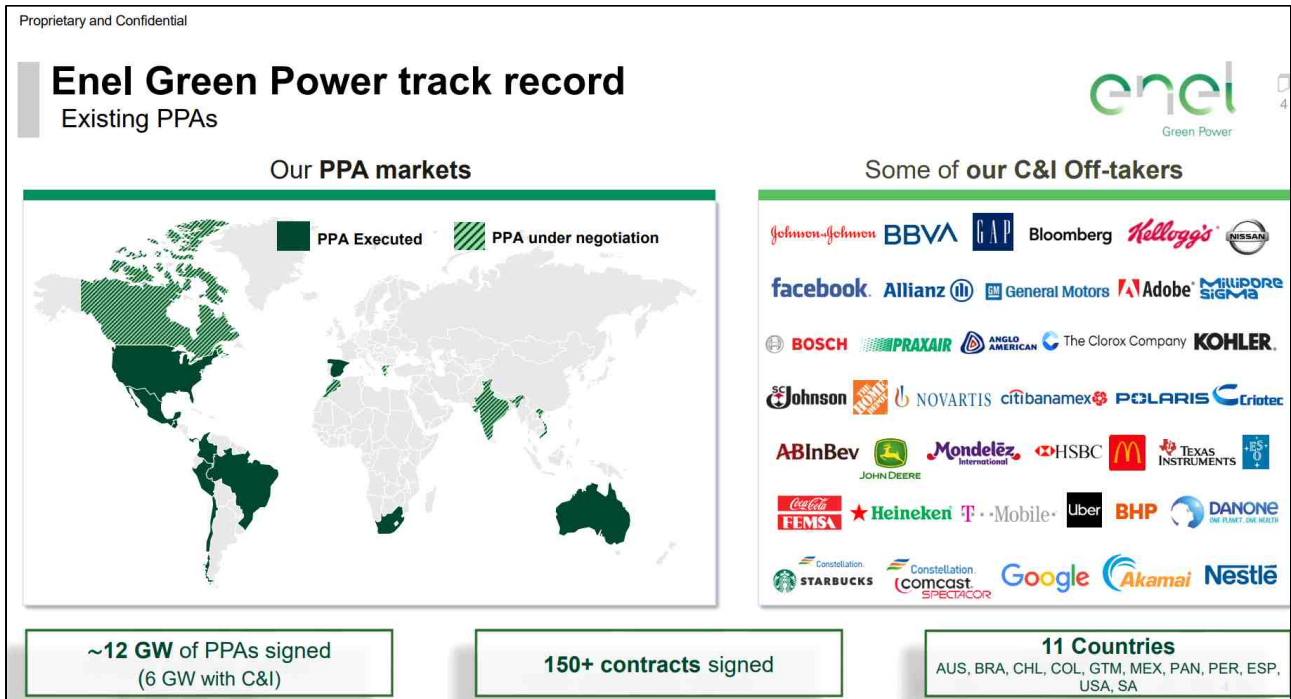
## Focus on Volume and Price

Risks associated mainly with economic performance of the PPA contract

		Description
Volume	Primary Resource	The primary resource is lower than initially forecasted
	Curtailment	The project energy output is limited due to authority's operational instructions
	Plant Performance   Availability	The renewable power plant does not perform as expected
Volume-Price	Shape   Profile	Differences in hourly prices lead to a production value which is greater or less in aggregate than the equivalent standard baseload product
	Cannibalization	The spot price of electricity may have a negative correlation with renewable production in those markets with high renewable penetration levels and energy only marginal market designs.
	Balancing	In case of physical PPAs (nominated in the wholesale market) imbalance cost risk may be allocated to the PPA party assuming the forecasting and scheduling activity
Price	Basis	In markets with nodal/locational pricing the project's node marginal price can differ from the hub (market average) one depending on congestion and other factors (uncertain spread over time). In Virtual PPAs settled for differences on a reference market price (floating price) this risk will be allocated depending on the chosen floating price reference (project's node or hub one)
	High Floating Price	Risk of facing higher cost of electricity purchased if market price increases
	Low Floating Price	Risk of PPAs being "out of the money" if market price decreases below PPA price

## [Enel의 PPA 전략적 운영사례]

- 다수 수요자 구조: EU 16개국 수요자 연계한 가상 PPA 사례
- 스페인: 리테일 계약과 결합한 100% 재생에너지 공급 제품 구성
- 칠레: 관측소와 연계된 스마트+양면모듈 기반 태양광 공급사례
- 미국: Thunder Ranch 풍력단지과 VPPA 계약, 탄소배출 30% 저감

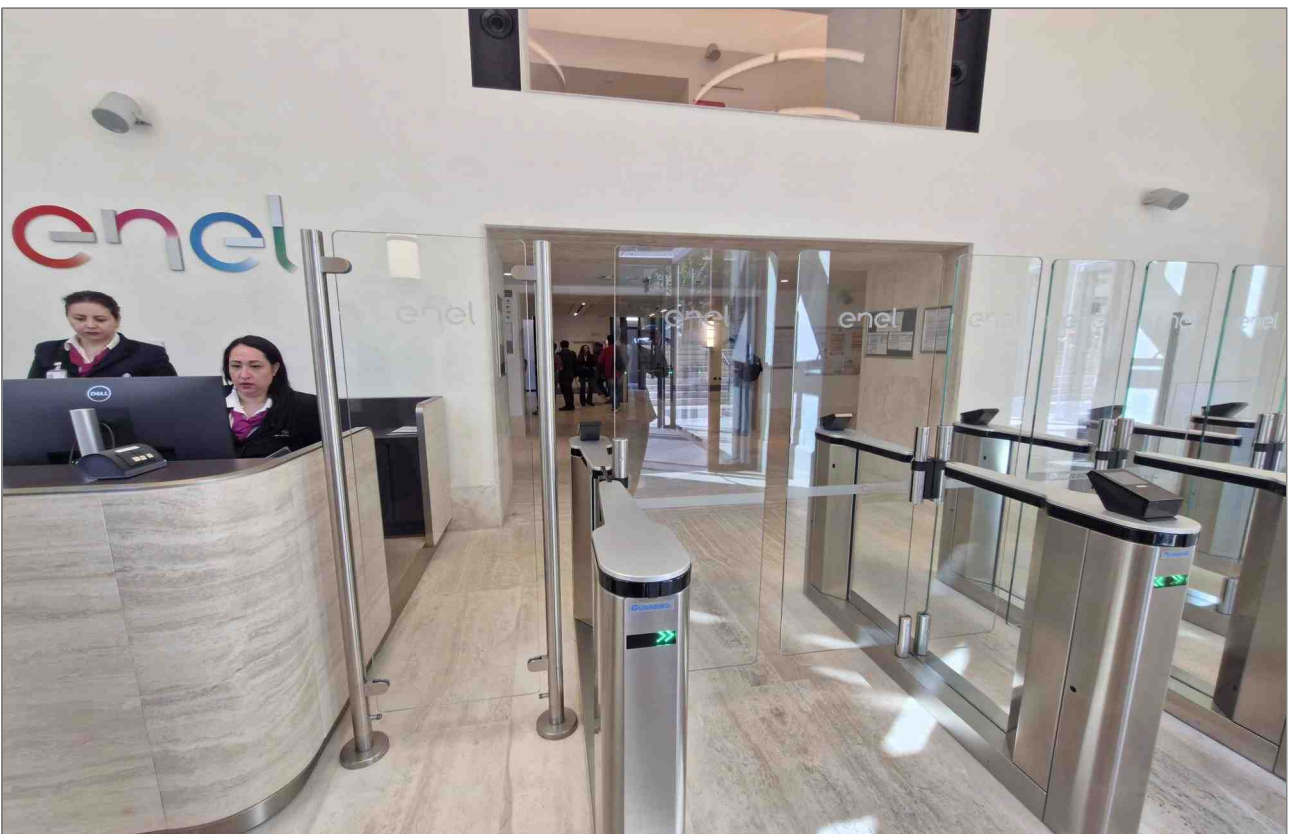


3

관련 사진



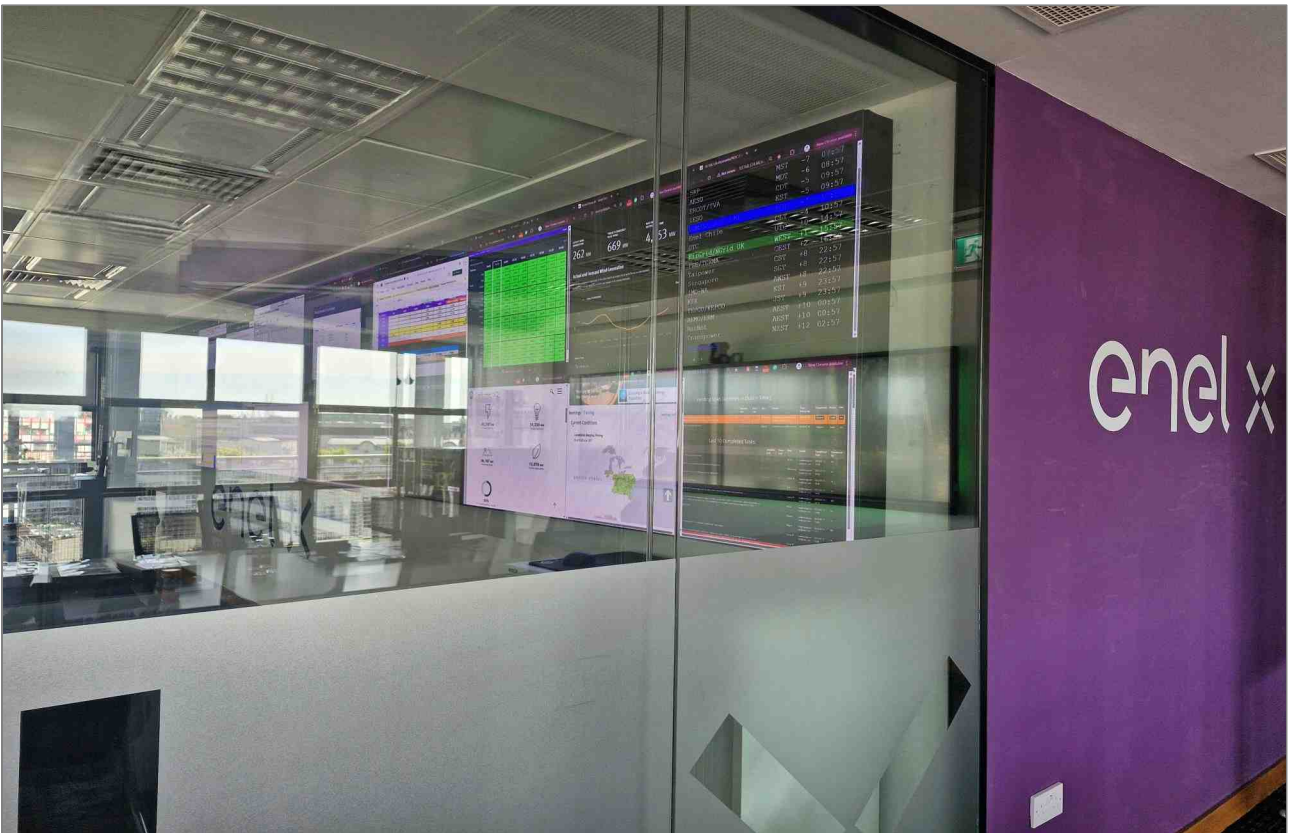
<Enel X 이탈리아 본사 전경>



<Enel X 이탈리아 본사 입구>



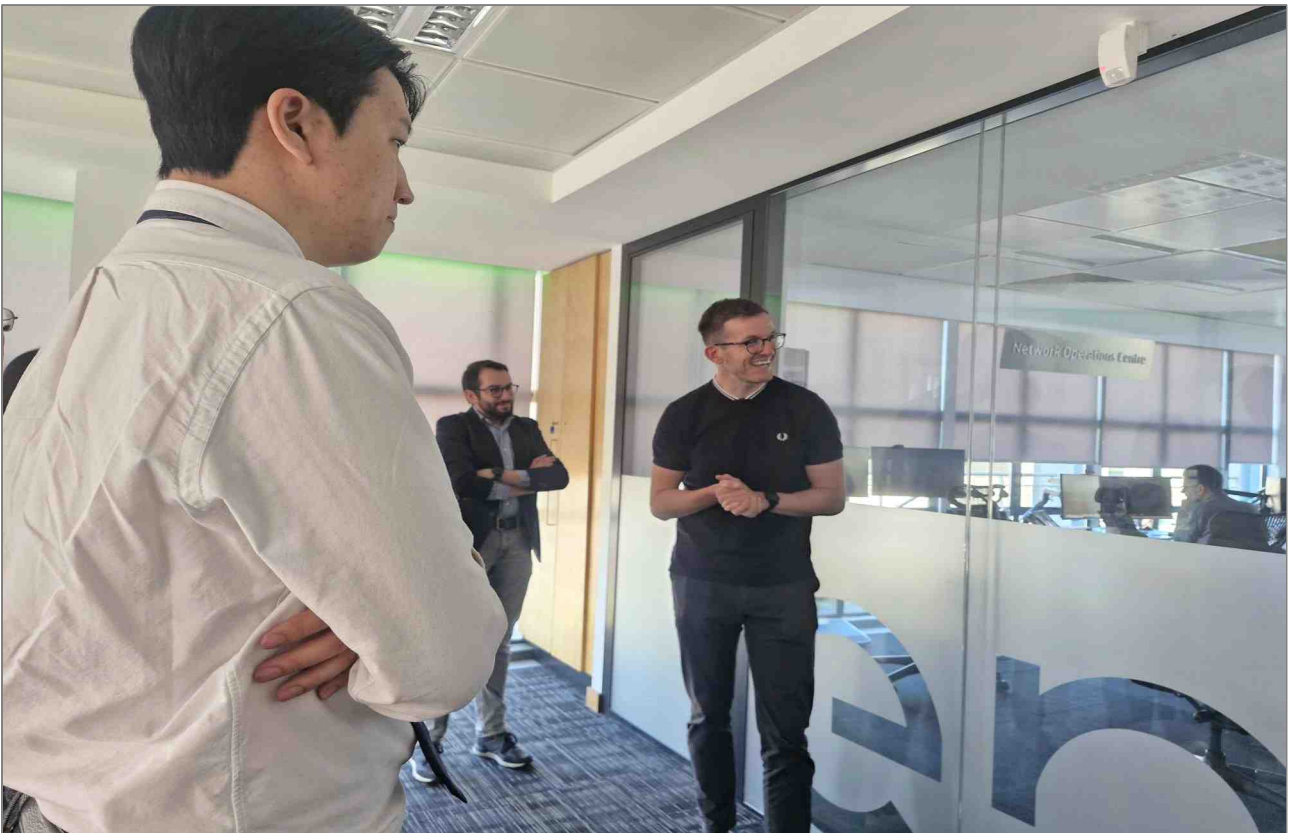
<본사 담당자 미팅>



<Enel X 아일랜드 NOC(Network Operation Center)>



<Enel X 아일랜드 NOC 모니터링 견학>



<NOC 책임자 모니터링센터 안내>



<수요형 VPP 참여사(Dublin Airport) 방문>



<Dublin Airport 실무자 설명 1>



<Dublin Airport 실무자 설명 2>



<Dublin Airport 실무자 설명 3>