

KEMRI 전력경제 REVIEW



이전 Review 보기

Vol.320

2025년 10월호

▶ Issue Paper

✧ 해외 통합 배전망 계획 사례 조사 · 분석 및 국내 시사점 검토

▶ Research Activities

✧ AI 데이터센터 부하 특징 및 계통 영향

✧ 일본 태양광 FIP/FIT 경매 동향

【 Highlight 】

1. 배경 및 필요성

- 지역 배전망 단위에서 접속하는 분산 에너지 자원(DER)이 증가하면서 양적 보강 중심의 기존 국내 배전망 계획체계의 한계점이 노출되어 기존 계획체계 변화 필요성 증대
 - 단순한 양적 배전망 보강·건설은 과도한 투자비를 유발할 수 있으므로 DER의 최적 관리 및 조달 등을 고려한 비용효율적인 계획이 필요
- DER 증가를 반영한 해외 유틸리티의 통합 배전망 계획 절차 및 방법론, DER을 통한 망 보강 대체 절차 등을 분석해 국내 배전 계획수립 체계 보완을 위한 시사점 제시

2. 해외 유틸리티 통합 배전망 계획 사례

- (개념) 통합 배전망 계획은 배전망에 DER을 주요 망 구성단위로 통합해 종합적으로 수립하는 망 계획으로 DER 영향을 단계별로 정밀하게 검토한 계획을 의미함
 - (특징) DER 동작 특성, 운영 계획, 설치 위치, 조달 방식 등에 따라서 배전망 여건 및 보강 요소가 달라질 수 있어 계획의 불확실성이 높음
 - (단계) 기본적으로 ① 부하·DER 예측→ ② 망 보강 요소 파악→ ③ 망 보강 방안 도출→ ④ 망 보강 방안 확보의 4단계로 추진됨
- (사례 분석) 캘리포니아 유틸리티는 지역적 부하·DER 예측, DER의 망 보강 대체를 위한 경제성 평가, DER 조달 등을 위해 정밀한 배전망 해석 및 비용-편익 분석 시행

Ⅰ 캘리포니아 유틸리티의 통합 배전망 계획 사례 요약 Ⅰ

| 구분 | 내용 |
|-----------|--|
| 부하·DER 예측 | • 시나리오별로 부하·DER 잠재량을 상정하고 변전소 단위로 예측을 시행 |
| 배전망 해석 | • 지역별 망 보강 요소 파악을 위해 정밀한 배전망 해석 도구 개발 |
| 경제성 평가 | • 배전망 보강 비용·편익 분석 도구 등을 개발하여 DER을 활용한 배전망 보강 대안의 사회적, 경제적 편익 분석 |
| DER 조달 절차 | • 발전 사업자 입찰 조건, 평가 기준, DER 보상 체계 및 성능 평가 기준 등 DER 조달을 위한 체계적인 운영 절차 마련 |

※ 출처 : PG&E, 2023 Distribution Grid Needs Assessment (2023.8)
PG&E, 2023 Distribution Deferral Opportunity Report (2023.8)

3. 국내 통합 배전망 계획을 위한 시사점

- 불확실성 완화를 위해 부하·DER 시나리오 예측 정확도를 향상시키고 정밀한 망 해석 도구와 함께 DER 사업 활성화를 위한 종합적인 비용·편익 분석 체계 필요
- 향후 배전망 계획과 발전·송전 계획 간 연계 강화를 위한 주기적 갱신을 비롯해 다양한 이해관계자 참여 활성화 등을 위해 배전망 계획수립 시 투명성 제고 또한 필요

【 목 차 】

Issue Paper

■ 해외 통합 배전망 계획 사례 조사·분석 및 국내 시사점 검토

- 이원풍 선임연구원

| | |
|--------------------------------------|----|
| I. 배경 및 필요성 | 1 |
| II. 해외 유틸리티의 통합 배전망 계획 개요 | 2 |
| III. 캘리포니아 배전망 자원계획(DRP) 세부 사례 | 5 |
| IV. 통합 배전망 계획수립 관련 국내 시사점 | 15 |

Research Activities

| | |
|---------------------------------|----|
| I. AI 데이터센터 부하 특징 및 계통 영향 | 18 |
| II. 일본 태양광 FIP/FIT 경매 동향 | 21 |



Research Issue : 해외 통합 배전망 계획 사례 조사·분석 및 국내 시사점 검토

I. 배경 및 필요성

- 배전망 단위에서 연계되는 재생에너지를 비롯해 배터리 등과 같은 분산에너지 자원(DER)들이 늘어남에 따라 기존 배전망 계획체계의 변화 필요성이 증대
 - 기존에는 전력수요 증가에 기반해 배전망 보강·건설 계획을 수립했으나 DER 비중 증가로 인해 DER 연계 및 운영까지 반영한 배전망 계획수립 체계가 필요
- 이에 정부는 분산에너지 활성화 특별법(이하 분산법) 제정을 통해 배전망 운영자(DSO) 역할을 담당하는 한전에 5년 이상의 장기 배전 계획수립 의무를 부여함

Ⅰ 장기 배전 계획(25.7) 개요 Ⅰ

| 구 분 | 내 용 |
|-------|--|
| 수립 근거 | ▶ 분산에너지 활성화 특별법 제18조(배전망 증설·운영 계획의 제출 등)에 따른 의무 |
| 계획기간 | ▶ 5년(2024년~2028년) 계획이며 향후 2년 주기로 수립 예정 |
| 주요 내용 | ▶ 배전망 연계 분산e 실태조사 기반 분산e 수용에 필요한 망 증설계획 ▶ 분산e 관련 전력 계통 및 배전망의 안정적 운영을 위한 망 운영계획 ▶ 新산업·분산e 활성화 및 배전망 증설·운영 계획 관련 신기술·제도 등 |

※ 출처 : 한국전력공사, 제1차 장기 배전 계획 (2025.7)

- 단순히 DER 및 부하 용량 증가에 비례한 양적 배전망 보강·건설은 과도한 투자비를 유발할 수 있으므로 DSO로서 DER 최적 관리·조달 등을 고려한 비용효율적인 계획이 필요
 - DER 및 수요의 시간·공간별 정밀 예측, DER 경제성 분석, 제3자를 통한 유연성 자원* 조달 및 활용 가능성 검토 등이 필요함에 따라 계획수립 복잡성이 증가
 - * NWA(Non-Wire Alternative) : 전통적 설비 추가 보강 없이 전력망 보강에 준하는 효과를 가지는 대안
 - 특히, 망 보강 회피 혹은 유보가 가능한 DER 프로젝트 발굴 및 DER 확보를 위한 합리적인 보상 체계 마련 등과 같은 신규 행정 단계 추가가 예상됨
- 따라서 향후 국내 장기 배전 계획수립 시 고려해야 할 사항들을 살펴보기 위해 DER 비중이 높아 배전망 자원계획 수립 경험이 많은 해외 유틸리티(미국 PG&E)의 사례를 조사·분석함
 - 해외 유틸리티의 통합 배전망 계획 절차 및 방법론은 물론 DER을 통한 망 보강 대체 사업 사례를 분석해 국내 정책 개발을 위한 시사점 제시

II. 해외 유틸리티의 통합 배전망 계획 개요

1. 통합 배전망 계획(IDP*) 개요

* Integrated Distribution Planning

- (개념) 분산에너지 자원(DER)을 기존 배전망 계획에 추가하여 자원과 망을 통합해 계획하는 것으로 DER 영향으로 계획의 구성 및 요건 등이 확장된 계획을 의미함

○ 통합 배전망 계획은 미국에서 주로 사용하는 개념으로 미국 SEPA*는 프로세스·자원·그리드 통합 관점에서 IDP를 정의하고 있음

* Smart Electric Power Alliance : 미국 전력산업 연구, 교육, 산업 협력 관련 비영리 기관

- 미국은 국내와 전력산업 구조가 유사*하고 배전 계획체계가 선진화 되어있으며 일부 주에서 유틸리티가 통합 배전망 계획을 추진하고 있어 주요 조사 대상 국가로 선정

* 독립 계통 운영자(RTO/ISO) - 송배전 유틸리티(TO·DO)의 구조로 국내와 유사

Ⅰ 기존 배전망 계획과 통합 배전망 계획 간 차이 Ⅰ

| 구 분 | | 기존 배전망 계획 | 통합 배전망 계획 |
|--------|----|----------------------------|---|
| 목 적 | | 안정성, 안전성, 비용효율성 | 안정성, 안전성, 비용효율성 + 유연성, 시장 기반 운영, 고객 참여도 제고 |
| 계획 참여자 | | 유틸리티 | 유틸리티 + 외부 이해관계자(DER 사업자 등) |
| 고려 사항 | 예측 | 피크 부하 이력 등을 고려한 예측 | 피크 부하 이력 + 지역별 DER 잠재량 및 DER 동작 특성, 출력량, 위치 등을 고려한 예측 |
| | 제약 | 부하에 의한 제약 고려 (과부하, 이상전압 등) | 과부하 + DER에 의한 과-저전압 및 전력품질 영향까지 고려 |
| | 설비 | 선로 및 변압기 등 기존 설비보강 | 기존 설비보강 + NWA 등 DER을 통한 설비보강 대체 고려 |
| 계획 연계 | | 발전·송전 계획과 별개 수립 | 상호 협력, 통합 프로세스 강화 |

※ 출처 : SEPA, Integrated Distribution Planning : A Framework for the Future (2020.9)

- (필요성) DER 정책 확대, 전기화에 따른 수요 증가, 이상 기후에 따른 복원력 강화 추세 등 전력산업 변화에 대응하고 배전망 기능 강화를 위해 통합 배전 계획이 필요

- (구성) 통합 배전망 계획 절차는 크게 ① 공통 요소, ② 필수 요소, ③ 선택 요소로 구성됨

○ (공통 요소) 기존 배전망 계획에도 마찬가지로 포함되는 사항으로 배전망 제약 분석을 통한 계통 상태 평가와 단기·장기로 계획기간을 구분하는 것을 포함함

- (계통 상태 평가) 수요 및 DER 증가에 따른 배전망 제약을 분석 (선로 및 변압기 등)
- (계획기간 구분) 단기와 장기를 구분해 각 목적에 맞게 계획을 수립함

- (필수 요소) 부하 및 DER 규모 예측, 배전망 제약 해소 및 배전 서비스 공급을 위한 DER 활용 방안 고려, 발전-송전-배전 간 통합 계획을 포함함

Ⅱ IDP 필수 요소별·단계별 수준

| 구분 | 수준 | 상세 내용 |
|----------------|-----|---|
| 부하 및 DER 규모 예측 | 1단계 | · 가시성 제한 : 변전소에서 서비스 지점까지 예측을 위한 세부 데이터 부족 |
| | 2단계 | · 표준 가시성 : 변전소 또는 급전 선로 단위로 예측 |
| | 3단계 | · 가시성 향상 : 스마트 계량기(AMI) 데이터 기반 개별 부하 위치에 따라 예측 |
| | 4단계 | · 예측 세분화 : 부하 및 DER에 대한 시간 및 위치별로 세부 예측 |
| DER 활용 | 1단계 | · DER 미활용 |
| | 2단계 | · 시범 사업 : 신규 비즈니스 모델을 통해 DER 조달·계약 |
| | 3단계 | · DER 및 비전통적 대안(NWA 등)을 포함 배전망 계획을 수립 |
| | 4단계 | · DER의 위치 및 시간대별 가치 평가를 기반으로 한 DER 솔루션 수립 |
| 발전-송전-배전 통합 계획 | 1단계 | · 각 계획 별개 수립 단계 |
| | 2단계 | · 발전-송전-배전 계획 간 연계 가능한 부분 검토 및 제한된 데이터 제공 (ex. 배전 측 부하 및 DER 예측·분석 값 등을 송전, 발전 측에 제공) |
| | 3단계 | · 주기적인 정보(데이터) 공유를 통한 발전-송전-배전 계획 연계 |
| | 4단계 | · 연속적이고 상호 최적화된 계획 : 발전-송전-배전 계획 간 완전 통합 단계 |

※ 출처 : SEPA, Integrated Distribution Planning : A Framework for the Future (2020.9)

- (선택 요소) 배전 계획에 대한 이해관계자 참여 활성화를 위한 방안들을 포함함
 - DER 위치, 크기, 기술 등에 대한 정보 제공, 배전망 여유 용량(Hosting Capacity) 분석 도구 등을 통해 유틸리티와 이해관계자 간 소통을 강화해 계획의 투명성 강화

- (기본 절차) 유틸리티마다 세부 절차에 차이가 있을 수 있으나 기본적으로 ①부하 및 DER 예측→②현 배전망 상태 평가→③망 보강 방안 도출의 단계로 추진됨

- 망 보강 방안 도출 단계에서 DER 등을 통한 보강 대체 방안이 고려될 수 있음

Ⅲ IDP 기본 절차 개념도

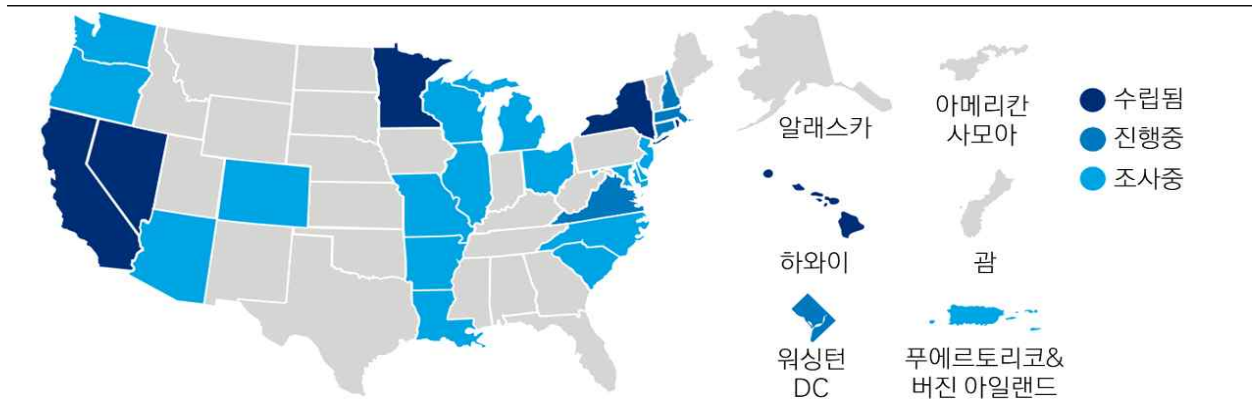


※ 출처 : SEPA, Integrated Distribution Planning : A Framework for the Future (2020.9)

2. 미국 주(州)별 IDP 추진 현황

- (현황) 캘리포니아, 뉴욕, 미네소타, 하와이 등 6개 주에서 IDP를 수립하고 있으며, 일부 주에서는 수립을 위한 조사 단계에 있거나 수립을 진행 중임
 - (조사 단계) 18개 주는 그리드 현대화(Grid Modernization)를 위해 논의를 진행 중
 - (진행 단계) 4개 주는 주 정부에서 통합 배전망 계획을 요구하여 유틸리티들이 이에 대응해 초기 계획을 제출하여 정부 승인을 받는 중

Ⅰ 미국 주별 IDP 추진 현황 Ⅰ



※ 출처 : SEPA, Integrated Distribution Planning : A Framework for the Future (2020.9)

Ⅰ 미국 주요 주들의 IDP 내용 Ⅰ

| 주 | 구분 | 유틸리티 | IDP 명칭 및 내용 |
|-------|---------|-------------------|---|
| 캘리포니아 | 자원 통합 | PG&E | <ul style="list-style-type: none"> · (명칭) Distribution Resource Planning (DRP) · (내용) 유틸리티의 DER을 포함한 그리드 현대화, 비용효율적인 망 안정도 개선, DER에 대한 수익 및 기회 제공 |
| 뉴욕 | 자원 통합 | ConEdison | <ul style="list-style-type: none"> · (명칭) Distribution System Implementation Planning (DSIP) · (내용) 배전 시스템 플랫폼 전환 및 DER에 대한 효율적 투자, DER 연계 확대를 위한 기술적 투자 로드맵 수립 등 |
| 미네소타 | 자원 통합 | Xcel Energy | <ul style="list-style-type: none"> · (명칭) Integrated Distribution Plan (IDP) · (내용) 고객 전기요금 절감, 안정적인 전력공급을 위해 청정에너지 및 DER 솔루션(NWA)을 고려하는 계획수립 |
| 하와이 | 그리드 통합* | Hawaiian Electric | <ul style="list-style-type: none"> · (명칭) Integrated Grid Planning (IGP) · (내용) DER-망 보강 규모 간 최적 구성과 송배전 계획 절차 통합 |

* 송전-배전 간 계획 절차까지 완전히 통합된 IDP를 의미

※ 출처 : SEPA, Integrated Distribution Planning : A Framework for the Future (2020.9)

- (평가) 미국조차 아직 IDP가 완전히 확립된 사례가 많지 않기 때문에 전반적인 IDP 경향성을 파악하기는 어려우며, 벤치마킹할 수 있는 특정 사례를 집중하여 분석·검토할 필요가 있음
 - 배전망 자원계획 수립 경험이 많고 소규모 DER 비중이 높은 캘리포니아주를 선정해 해당 지역 유틸리티의 계획 절차, 방법론, DER 확보 방안 등을 세부적으로 분석

Ⅲ. 캘리포니아 배전망 자원계획(DRP*) 사례

1. 캘리포니아 선정 배경

* Distribution Resource Planning

- 캘리포니아는 미국 내에서 최초로 배전망 자원계획 수립을 추진('15)하여 관련 경험이 많고, 다른 주들에 비해 소규모* DER 비중이 높아 분석 대상으로 선정함

* 미국 EIA에 따르면 1MW 미만 용량을 가진 자원을 소규모(Small-scale)로 정의함

- (최초 시행) 법안 AB 327('13) 제정에 따라 공공 서비스 코드(PSC 769)*가 개정되어 유틸리티가 처음 배전망 자원계획을 공공 유틸리티위원회(CPUC)에 제출('15)

* Public Service Code Section 769 : 유틸리티의 설비 투자를 피하거나 유보할 목적을 갖는 DER 설치에 대한 절차 및 체계(Framework) 수립을 요구하는 CPUC 규정

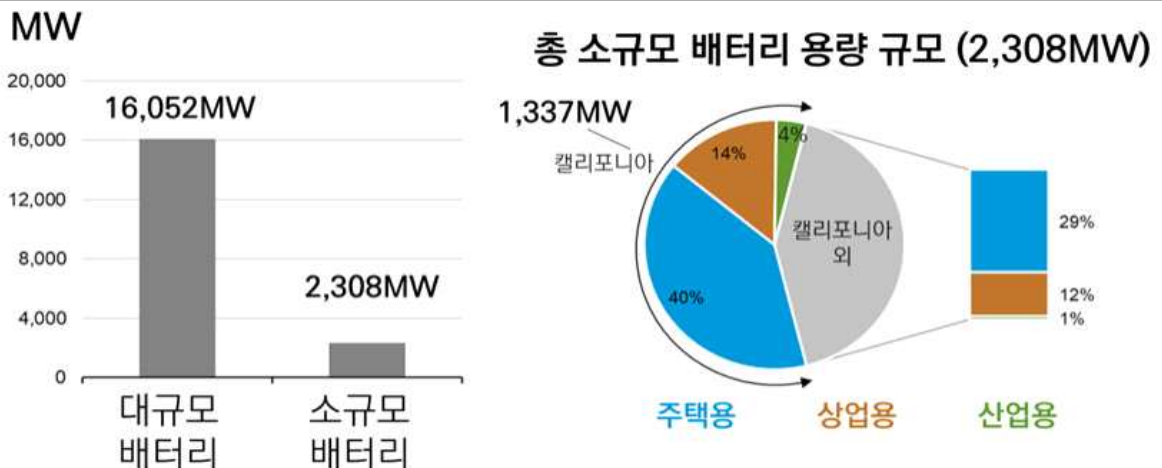
- (DER 비중) 캘리포니아는 텍사스에 이어 재생에너지 및 배터리 등의 DER 자원 비중이 두 번째로 높으나*, 소규모 용량으로 국한하면 가장 비중이 높음 (출처: EIA)

* (텍사스) 태양광(24,642MW), 풍력(42,786MW), 배터리(8,124MW) 운영 중('25.4 기준)

(캘리포니아) 태양광(22,060MW), 풍력(6,481MW), 배터리(12,419MW) 운영 중('25.4 기준)

- 특히 소규모 배터리의 경우, 캘리포니아가 차지하는 비중이 절반 이상(58%)으로 높음

Ⅰ 미국 소규모 배터리 용량 규모(2024) Ⅰ



※ 출처 : EIA, 2023 Form EIA-861, Annual Electric Power Industry Report (2024)

- 또한 캘리포니아는 정책, 규제 등이 체계적으로 뒷받침되어 있어 뉴욕과 함께 배전 부문에서의 DER 가치 흐름(Value Stream)*을 세부적으로 식별하는 주임

* DER 가치 흐름 : 회피 혹은 유보된 배전망 투자비, 회피된 배전 손실 비용, 회피된 신뢰도(Reliability) 비용, 회피된 복원력(Resiliency) 비용 등

2. DRP 기본 개요

- (배경) 2014년 주 정부 차원의 공공 유틸리티 위원회(CPUC) 관련 규정 제정을 시작으로 지속적인 검토와 보완을 통해 배전망 자원계획(DRP) 관련 규정이 수립·개정되고 있음

○ 주 정부의 규정 제정(Rulemaking)*을 통해 처음 시작되었지만 CPUC의 결정(Decision, '18)을 통해 배전망 투자 유보 체계 등 실질적인 DRP 절차가 채택됨

* (참고) 규정 제정(Rulemaking)은 산업 전반에 관한 규정을 제정하는 행위로 큰 틀을 제시하며, 결정(Decision)은 특정 부문에 국한된 의사결정 행위로 세부적인 지침을 결정함

- 이 결정으로 제 3자의 DER 입찰을 통한 망 보강 대체(투자 유보) 체계(DIDF)가 채택됨

Ⅰ 캘리포니아 DRP 수립 관련 주요 규정 Ⅰ

| 연월 | 관련 근거 | 주체 | 주요 내용 |
|--------|-------------|-------------------|--|
| '14.8 | - | CPUC | · DER이 포함된 배전망 계획 절차 평가에 관한 신규 정책 수립을 위한 규정 제정(R.14-08-013) |
| '15.7 | R.14-08-013 | 유틸리티 | · 각 유틸리티(IOU)는 DRP 초기 제안서를 CPUC에 제출 |
| | | CPUC | · 제출된 DRP를 3가지 트랙으로 구분해 검토 - 1) 도구/방법론, 2) 현장 실증, 3) 정책 이슈 |
| '18.2 | D.18-02-004 | CPUC | · 정책 이슈 하위 항목으로 수요·DER 성장 시나리오 및 배전망 투자 및 유보 절차(DIDP*) 검토하고 배전망 투자 유보 체계(DIDF*) 채택 * Distribution Investment Deferral Process/Framework · 유틸리티에 계통 보강 평가서(GNA*) 제출 지시 및 배전망 유보 기회 보고서(DDOR*) 제출 지시 * Grid Need Assessment, * Distribution Deferral Opportunity Report |
| '19.5 | D.18-02-004 | ALJ ¹⁾ | · DIDF 프로세스 중 GNA·DDOR 제출일 변경(매년 8/15) |
| '21.6 | D.21-02-006 | ALJ | · 기존 DIDF 절차에 시범 사업 제도를 추가 |
| '21.11 | R.21-06-017 | CPUC | · 2014년 DRP 규정을 완전히 대체하기 위한 규정을 제정 - 미래의 높은 DER 비중에 대비한 그리드 현대화 목적 |
| '23.5 | D.21-02-006 | ALJ | · 시범 사업 제도 잠정 중단 (중단 사유 : Off-ramp ²⁾) |
| '24.6 | R.21-06-017 | | |

1) 행정법 판사(Administrative Law Judge) : 정부 기관 내 행정 심리를 주재하는 판사

2) Off-ramp : 효과적이지 않은 조치를 계속하지 않도록 정책 시행에 유연성을 제공하는 지침

※ 출처 : PG&E, PG&E's 2023 Distribution Grid Needs Assessment (2023.8)

- (절차) 기본적으로 ①미래 수요·DER 예측, ②배전망 평가 및 보강 요소 파악, ③배전망 보강 프로젝트 및 대안 식별, ④입찰을 통한 대안(DER 포함) 조달 순서로 진행됨

○ 유틸리티는 배전망 보강이 필요한 부분을 검토(GNA)하여 망 보강 계획과 함께 보강을 유보할 수 있는 후보 프로젝트를 식별(DDOR)함

- (GNA 보고서) 부하·DER 예측 및 그에 따라 필요한 망 보강 사항(Needs)들을 검토
- (DDOR) GNA 결과에 따라 보강이 필요한 프로젝트를 식별하고, 그 중 DER 등의 다른 대안을 통해 보강을 유보할 수 있는 후보 프로젝트(Candidate)를 별도로 식별
- 유틸리티는 DPAG*에 결과를 제출하고, DPAG는 보고서 검토 후 식별된 후보에 대한 입찰 요청서를 작성해 CPUC에 제출, CPUC의 승인을 얻어 입찰이 진행됨
- * DPAG(배전망 계획 자문 그룹) : 캘리포니아 유틸리티 3사에 대한 조언 및 협의를 위하여 위원회가 설립한 그룹으로 유틸리티 및 위원회 소속 직원, 관련 전문가 등으로 구성됨
- 해당 후보 프로젝트 입찰에 참여를 희망하는 DER(또는 중개) 사업자는 유틸리티의 사업 공고를 확인 후 자격 요건을 갖추고 참여할 수 있음

■ 미국 유틸리티 PG&E의 배전망 자원계획 주요 절차 ■



※ 출처 : PG&E, DIDF 2023-24 Partnership Pilot RFO (2024.1), 재구성

- (기간) 단기적으로 3~5년 기간에 초점을 맞춰 계획을 수립하고 있고 장기적 측면의 수요 및 DER·설비 예측 등은 통합 자원계획, 투자 및 비용 회수 등은 GRC*로 대응함

* General Rate Case : 유틸리티가 투자비 대비 회수할 금액을 정하고 각 고객 계층의 비용 부담액과 계층별 요금표를 정하는 프로세스로 장기적인 계획 구성 시 배전망 투자 및 회수 비용 또한 고려되며 유틸리티는 CPUC에 4년마다 신청서를 제출해 적정 요금을 결정

- 배전 서비스별로 보강할 설비의 종류를 구분하여 3~5년의 계획 구간을 설정함

- (배전 서비스) 용량(Capacity) 제공, 전압 보조, 배전 신뢰도, 복원력(Resiliency) 4가지
- (설비 종류) 변전소 및 피더(Feeder*), 마이크로그리드(MG), 선로 및 전압, 백업 설비 (Back-tie)가 있으며 기본 5년 계획이나 선로 및 전압 보조 설비 등은 3년 계획임

* 급전선로(Feeder) : 변전소에서 최초로 인출되는 배전 선로로, 부하가 연결되지 않은 선로

- PG&E는 수직 통합형 유틸리티로 통합 자원계획(IRP)*을 2년 주기로 수립해 CPUC에 제출하기 때문에 5년 이후의 장기적 측면의 계획은 IRP를 통해 대응하고 있음

* Integrated Resource Planning : 수급 자원, 송·배전 설비까지 통합된 계획으로, 온실가스 감축 목표, 청정에너지 목표 등을 고려해 장기적 계획(~2045)을 수립하는 프로세스

3. DRP 절차별 세부 내용 : ① 부하·DER 예측

■ (부하 예측) 향후 13년에 걸친 배전망 부하 성장을 예측하여 피더(Feeder)별로 할당

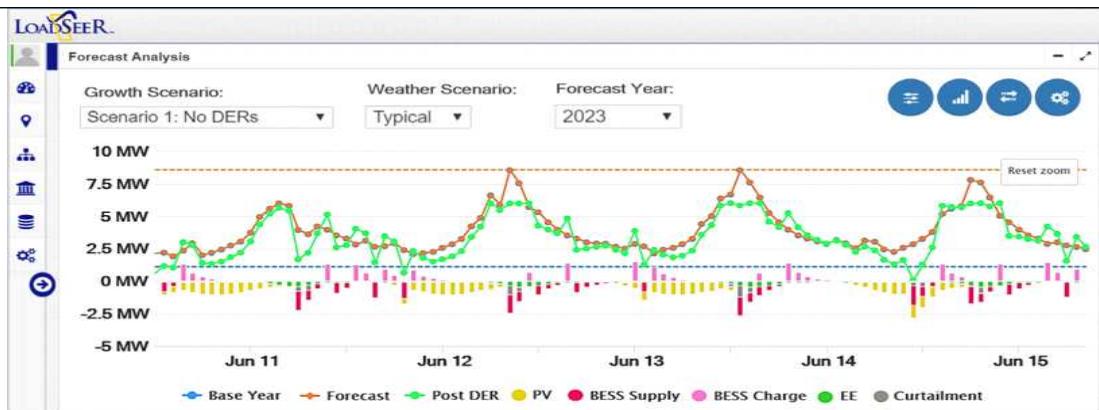
- (입력) 캘리포니아 에너지 위원회의 부하 예측치, SCADA 및 계량기(AMI) 이력 데이터, 부하 증가 추이, 시간별 부하 형태, 경제·지리·인구 통계·기상 데이터 등을 활용
- (방법론) 전력 공간 부하 예측 및 위험 평가 도구(LoadSEER*)를 사용하여 예측
 - * Integral Analytics의 소프트웨어로 2012년부터 PG&E가 정식으로 사용
- 시스템 수준 부하를 예측해 피더별 할당하는 방식(Top-down)을 기본으로 하고, 시간별 부하 형태, 고객 AMI 이력 데이터 등에 기반한 조정(Bottom-Up)을 통해 예측치 보완

Ⅱ LoadSEER를 활용한 부하 예측 방법론 Ⅱ

| 구 분 | 내 용 |
|-------------------|--|
| Top-down (할당) | · 최대부하, 기상 정보, 지리적 및 거시경제적 입력 데이터 등을 활용해 시스템 전체 수준의 부하를 연도별로 예측하고 이를 피더 단위로 할당 |
| Bottom-up (조정) | · 시간별 부하 형태, 고객 AMI 데이터 등을 활용하여 노드별(Nodal) 시간당 부하를 추정하고, 피더 레벨로 합쳐 Top-down 방식의 예측값을 조정함 |

※ 출처 : PG&E, PG&E's 2023 Distribution Grid Needs Assessment (2023.8)

Ⅱ LoadSEER 내 시나리오별 부하 예측 결과 예시 Ⅱ



※ 출처 : Integral Analytics, LoadSEER 4.0 Brief : Description, benefits and highlights (2022)

■ (DER 예측) 부하 예측과 마찬가지로 향후 13년에 걸친 시스템 규모 수준의 예측 후 피더별로 할당

- (대상) 태양광 발전(BTM 포함), 주거용·비주거용 에너지저장장치(ESS), 에너지 효율 개선 설비(HVAC, BEMS 등), 전기차*가 예측 대상에 포함됨
 - * 전기차는 충전 부하이지만 충전 인프라 타입(급속·완속), 예상 보급 대수, 운전자 선호도 등에 따라 예측치가 달라지기 때문에 기존 부하 예측에서는 제외되고 별도로 예측(V2G 미고려)
- (입력) 캘리포니아 에너지 위원회(CEC) 예측치, DER 증가 잠재력, 배전망 정보 및 피더별 발전량, DER 별 선정 이력 및 비중, DER 출력 데이터 이력 등

○ (방법론) 부하 예측과 동일하게 LoadSEER를 사용하나 음(-)의 소비로 반영됨

- 시스템 수준의 DER 성장 규모를 연도별로 예측하여 피더별로 할당하지만, DER마다 피크 부하에 기여하는 방식이 달라서 시간별 프로파일을 통해 재조정함

Ⅰ 전기차 충전 부하 예측 방법론 Ⅰ

| 구 분 | 내 용 |
|-----|---|
| 입 력 | · CEC 전기차 대수 예측치, 운송 부문 전기 소비량 예측치, 충전 수요 전망, 차량 종류 (소형·중형·대형)별 운전자 경향성, 운송 부문 전기 수요 프로파일 등 |
| 방법론 | · 차량 종류, 충전 위치(주거·공공·직장 등), 충전 방식(완속·급속)에 따라 차량 증가분을 예측 및 할당하고 충전 위치·방식을 반영해 충전 부하(MW)를 피더별로 할당 * (예시) 소형차가 주거지에서 완속으로 충전할 시 그에 따른 충전 패턴 및 출력 결정 |

※ 출처 : PG&E, PG&E's 2023 Distribution Grid Needs Assessment (2023.8)

4. DRP 절차별 세부 내용 : ② 망 보강 요소 파악

- (개요) 기본적으로 예측된 부하 및 DER 데이터를 기반으로 전력 계통 해석 도구 소프트웨어 (CYME)를 활용하여 5가지 종류*에 대한 망 보강 요소를 각각 식별함

* 변전소 및 피더(Feeder), 선로(Line Section), 전압 보조 설비, 백업 설비, MG

○ (예측 데이터) 캘리포니아 에너지 위원회(CEC) 예측치에 기반한 공간적 예측과 과거 부하 이력 데이터에 기반한 다중 변수 회귀분석을 통한 예측을 조합

○ (주요 고려 사항) 피크 부하 및 최대 전류 용량, 스위칭을 통한 부하전환(Transfer), 전압 강하 제약, N-1 시나리오* 등을 고려하여 망 보강 요소 식별

* 단일 변압기 뱅크 혹은 피더 등 1기의 설비가 고장·사고로 인해 탈락할 경우, 정전 없이 고객에게 전력을 공급할 수 있도록 하는 조치 및 설비를 확보하는 시나리오

- 스위칭 운영을 통한 부하전환으로 피크 부하를 분배함으로써 용량 보강을 줄일 수 있기에 모든 보강 요소를 식별할 시 부하전환이 기본적으로 먼저 고려됨

Ⅰ 배전 서비스별 배전망 보강 요소 주요 고려 사항 Ⅰ

| 서비스 | 보강 형태 | 주요 고려 사항 |
|-----|----------|---|
| 용 량 | 변전소 및 피더 | · 피크 부하(MW) 및 피더에 대한 최대 전류(A) · 스위칭 동작에 따른 변전소 뱅크 및 피더 상의 부하 변동, N-1 시나리오 |
| | 선 로 | · 피더 별로 할당된 피크 부하(MW) |
| 전 압 | 전압 보상 | · 피크 부하(MW) 및 1차 측 전압 강하 제약(공칭 전압 5% 이내) · 지역별(도심 및 교외 지역) 2차 측 전압 강하 제약 |
| 신뢰도 | 백업 설비 | · N-1 시나리오 (부하전환 시, 전환된 설비의 여유 용량) |
| 복원력 | 마이크로그리드 | · N-1 시나리오 (부하전환 시, 전환된 설비의 여유 용량) · DER들을 활용한 독립 운전 가능성 및 유틸리티와의 협조 운영 검토 |

※ 출처 : PG&E, PG&E's 2023 Distribution Grid Needs Assessment (2023.8)

■ (기술성 분석) 배전망 보강을 잠재적으로 유보하기 위해 DER이 제공할 수 있는 배전 서비스를 식별하는 것으로 GNA에서 제시된 4가지 서비스에 대한 분석 수행

- DER 종류별로, 해당 계획된 투자 프로젝트를 대체하여 배전 서비스를 제공하는 것에 있어서 기술적인 문제점이 없는지 검토함
- 또한 PG&E는 시간별 부하 예측 데이터를 활용해 기존 설비 과부하가 예측되거나, 배전 서비스가 필요한 연간 일수, 전체 기간, 1회 지속 시간 등을 계산하여 DER이 배전 서비스를 제공할 때 필요한 조건들을 결정
 - (조건) 서비스 제공 개월 수, 1년 당 서비스 제공 횟수, 서비스 제공이 필요한 시간대, 1회 서비스 제공 시 최대 지속 시간(Duration) 등
- 망 보강을 위한 설비용량 선정 시 유틸리티는 일반적으로 표준 크기를 활용하나 DER의 경우 조달 난이도, 서비스 제공 지속성 등을 고려하여 여유를 두지 않음*
 - * (예시) 부족 용량이 6.4MW인 경우, 설비용량은 표준에 따라 10MW로 설계되지만, DER의 경우에는 정확히 6.4MW에 맞춰서 설계 및 조달이 요구됨
 - PG&E는 DER 조달 실패 혹은 부하 예측 변화에 대비하여 후속 보강계획을 마련함

■ (시의성 분석) 비용효율적으로 DER 솔루션들이 완전하게 배치되고 상업 운전을 시작하기 위해 충분한 시간을 보장할 수 있는지 검토함

- 일반적으로 최소 3년 이후 서비스 시작을 기준으로 정하며 DER 별로 배치 및 운영까지 걸리는 시간에 관한 사례들에 기반하여 검토함

■ (경제성 분석) PG&E는 E3의 위치별 순 편익 분석 도구*를 사용하여 배전망 보강 회피에 대한 가치를 식별하여 경제성을 평가함

- * E3(Energy, Environmental-Economics) 社の LNBA(Locational Net Benefit Analysis Tool)
- (방법) 기존 계획된 망 보강 프로젝트의 설비 투자 비용이 회피되어 편익이 되는 것으로 가정하고 현재 가치법(Present Worth)을 활용해 경제성 분석을 진행
- (산출 결과) 기존 설비 투자에 기반한 경제성 평가이므로 할인율 및 인플레이션을 등을 고려하여 설비용량 당 한계비용(Marginal Cost)의 형태로 도출됨
 - * Marginal Distribution Capacity Cost (MDCC) : 배전망 설비용량 한 단위 추가 비용
 - 배전 계획기간에 걸쳐 보강 유보(Deferral)에 대한 가치가 비용(\$) 형태로 도출되며 이를 DER로 인해 절감되는 부하 용량(kW)으로 나누면 한계비용(\$/kW)이 계산됨
 - 다양한 시나리오에 기반해 평가하기 때문에 해당 한계비용 값은 범위로 제시됨

■ (우선순위 선정) 3가지 평가 지표에 따라 후보 프로젝트들을 1~3순위로 평가함

○ 3가지 평가 지표는 5가지 정량적 보조 지표들과 4가지 Flag* 보조 지표로 구성

* 평가 지표 점수 책정 시 가능성이 낮은 후보 프로젝트를 사전에 고르기 위한 보조 지표

- (비용효율성) DER이 얼마나 비용효율적으로 계획된 투자를 회피할 수 있는지를 평가
- (불확실성) 예측된 망 보강 요소가 큰 변동 없이 대체될 수 있는 것인지를 평가
- (조달 현실성) 요건에 맞는 DER을 성공적으로 조달할 수 있는지를 평가

○ 3가지 메인 지표별로 정량적 보조 지표들이 정규화되어 합산되며, 4분위로 분류하여 각각 1분위는 '1', 2~3분위는 '0', 4분위는 '-1'을 점수로 할당함

- Flag 보조 지표가 활성화된 후보 프로젝트는 자동으로 해당 메인 지표가 '-1'로 할당

○ 3가지 메인 지표별 점수를 합산해서, 총점이 0보다 큰 경우 '1순위', 0인 경우 '2순위', 0보다 작은 경우 '3순위' 프로젝트로 정하고 입찰 절차를 진행

Ⅰ 후보 프로젝트 우선순위 선정 기준 Ⅰ

| 메인 지표 | 보조 지표 | 특징 |
|--------|--|------|
| 비용효율성 | · 피크 용량에 기반한 연간 LNBA 값(\$/MW-year) | 정량적 |
| | · 연간 에너지에 기반한 LNBA 값(\$/MWh-year) | 정량적 |
| | · 기존 설비보강 단위 비용 (100만 달러 미만 Flag) | Flag |
| 불확실성 | · 망 보강 필요 불확실성 지표 - 변전소 레벨에서의 부하 증가 규모 ¹⁾ - 자산 건전성(Asset Health) 리스크 레벨 ²⁾ | 정량적 |
| | · 망 보강 적용 시점 (4년 이후 프로젝트 Flag) | Flag |
| 조달 현실성 | · 서비스 지속 기간 (시간) : 기간이 짧을수록 유리 | 정량적 |
| | · 선로당 필요 용량 (MW) : 용량이 작을수록 유리 | 정량적 |
| | · 실시간 운영 조건 (실시간 요건 포함 시 Flag) ³⁾ | Flag |
| | · 단일 프로젝트의 망 보강 요소 개수 (3개 초과 시 Flag) ⁴⁾ | Flag |

1) 피더 레벨에서 변전소 레벨로 부하를 합칠 때, 부하 증가 규모가 크면 영향이 크다는 것을 의미하며, 후보 프로젝트가 대응하기 어려워짐

2) 하나의 후보 프로젝트가 여러 지점에 있는 망 보강 요소를 포함하면, 후보 프로젝트가 망 보강 요소에 대응하는 것에 대한 리스크가 높아진다고 평가

3) 이전 회차에서 조달 시행 시 실시간 급전을 요구할 경우, DER 조달이 어려워 Flag로 설정

4) 단일 프로젝트의 망 보강 요소 개수가 많을수록 DER 조달이 어려워 Flag로 설정

※ 출처 : PG&E, PG&E's 2023 Distribution Deferral Opportunity Report (2023.8)

6. DRP 절차별 세부 내용 : ④ 대안 조달 방안

- (개요) 후보 프로젝트 중 대상을 확정하고 입찰(Request For Offer, RFO) 공고를 통해 DER 사업자로부터 입찰을 받아 DER을 통한 망 보강 대안을 조달함

○ (현황) 대상을 특정하여 절차를 간소화하고 보완하기 위해 2가지 시범 사업을 도입 하였으나, 모집 성과가 미흡하여 2024년 말을 기준으로 2가지 시범 사업* 모두 중단

* Partnership Pilot('24년 종료), Standard Offer Contract(SOC) Pilot ('23년 종료)

- 시범 사업들은 기존 RFO의 절차를 따르지만, 기존 절차 보완을 위해 일부 시범적인 사항*을 적용받고 있으며 해당 사항들은 기존 RFO에 아직 미적용 중인 것으로 보임

* 간소화된 참여 절차(사전심사, 지정가격 입찰방식), 과소·과대 조달 방지책 등

- (입찰 절차) 입찰을 원하는 사업자가 조건을 준수하여 입찰하면 유틸리티가 정량적 평가를 통해 입찰 대상 중 최종 프로젝트를 선정

○ (사업자 입찰) 사업자는 입찰 규모, 준수 사항, 비용효율성 입증 자료 등 다양한 조건을 확인하여 입찰에 참여

- (입찰 규모) 단일 자원 또는 통합(Aggregation) 자원으로 요구량의 최대 200%까지 입찰
- (준수 사항) 입찰자가 제공해야 하는 항목은 배전 서비스이며, 자원들의 상태(고장 여부 등)에 대한 실시간 정보를 유틸리티에 제공하기 위해 통신 및 모니터링 시스템을 구비
- (입증 자료) 입찰자는 프로젝트 세부 계획 및 검증자료와 함께 프로젝트의 효과성을 입증한 증빙자료를 제출해야 함

○ (입찰 평가) 유틸리티는 배전망 투자 유보에 대한 가치* 대비 프로젝트 사업자에게 지급할 보상액의 현재가치를 기준으로 정량적 평가를 진행

* Distribution Deferral Value : 연간 배전망 투자 자본비용은 물론, 망 보강에 따른 운영비용, 세금 등 발생할 수 있는 비용들을 회수한다는 가정에서 산정된 현재 가치

- 프로젝트 실현 가능성, 배전망 보강 대체 요건 충족 정도, 재생에너지 여부, 기술 안정성, 참여자별 비중 및 형평성(사업 몰아주기 방지) 등이 고려됨

- (보상액) DER(또는 중개) 사업자와 유틸리티 간 계약에 따라 서비스 제공 발생 실적에 기반해 월마다 지급*하며 보상 총액은 변동액과 고정액으로 구분하여 산정됨

* 他 프로그램을 통해 설치된 자원이라도 RFO에 따라 서비스를 제공할 경우 보상액 지급

○ (총액) 고정액과 변동액의 합계로 산정되나 이용률*에 따라 고정액이 조정됨

* 1달간 서비스를 제공하기로 계약된 일 수 대비 실제 서비스 제공일 수의 비율

- (변동액) 자원 활용 실적에 따라 지급하는 금액으로 배전 서비스 지표*에 따라 다름
- * 1달간 유틸리티가 요청한 배전 서비스에 대해 사업자가 대응한 비중 (0~1 사이의 값)
- (고정액) 자원 사용 예약에 대해 지급하는 금액으로 서비스 조정률*에 따라 다름
- * 배전 서비스 지표에 따라 구간별로 음수값에서 최대 1까지의 값을 가짐

○ (설치비) 유틸리티의 성능 시험을 통과한 설비를 설치할 경우, 지원금을 지급함

- 단, 他 인센티브 프로그램 등을 통해 설치한 설비에 대해서는 중복 혜택 방지를 위해 지원금을 지급하지 않음

Ⅰ 배전 서비스 제공에 따른 보상액 산정 기준 Ⅰ

| 구분 | 세부 설명 | | | | | | | | | | |
|---|---|---------------|---------------|----------------|----------------|----------|---------|-----|-----------|---|------------|
| 총액 | · (기준식) 변동액 + (고정액 × 이용률) | | | | | | | | | | |
| 변동액 | · (설명) 실제 자원 활용 실적에 대한 지급액 | | | | | | | | | | |
| | · (기준식) 1달 중 판매일 수 × 변동 가격 × DSF(배전 서비스 지표) ▶ (판매일 수) 구매자와 판매자 간 서비스 제공이 발생한 일 수 ▶ (변동 가격) DIDF에서 배정된 유틸리티의 예산에 따라 정해짐 | | | | | | | | | | |
| 고정액 | · (설명) 자원 활용에 대한 예약에 따라 지급하는 금액 | | | | | | | | | | |
| | · (기준식) 계약 용량 × 계약 가격(\$/kW) × 서비스 조정률 ▶ (계약 가격) DIDF에서 배정된 유틸리티의 예산에 따라 정해짐 ▶ (서비스 조정률) 배전 서비스 지표(DSF)에 따라 결정됨 | | | | | | | | | | |
| | <table><tr><td>DSF 범위</td><td>0.9 이상~1.0 이하</td><td>0.8 이상~0.9 미만</td><td>0.75 이상~0.8 미만</td><td>~0.75 미만</td></tr><tr><td>서비스 조정률</td><td>DSF</td><td>DSF × 0.5</td><td>0</td><td>DSF - 0.75</td></tr></table> | DSF 범위 | 0.9 이상~1.0 이하 | 0.8 이상~0.9 미만 | 0.75 이상~0.8 미만 | ~0.75 미만 | 서비스 조정률 | DSF | DSF × 0.5 | 0 | DSF - 0.75 |
| | DSF 범위 | 0.9 이상~1.0 이하 | 0.8 이상~0.9 미만 | 0.75 이상~0.8 미만 | ~0.75 미만 | | | | | | |
| 서비스 조정률 | DSF | DSF × 0.5 | 0 | DSF - 0.75 | | | | | | | |
| ▶ (DSF) 1달간 구매자가 요청한 배전 서비스 양에 대한 판매자가 대응한 양의 비중으로 0.75 미만일 경우 페널티(음수)로서 작용 | | | | | | | | | | | |
| 이용률 | · (기준식) (서비스 제공일 - 서비스 불가일) / 서비스 제공일 ▶ (서비스 제공일) 1달간 배전 서비스가 제공된 일 수 ▶ (서비스 불가일) 예기치 않은 불가항력에 의해 서비스 제공이 불가능해진 일 수 | | | | | | | | | | |
| 설치비 | · (기준식) 설치 지원 가격 × 계약 용량 × 성능 시험 통과한 용량 비율 (%) | | | | | | | | | | |

※ 출처 : PG&E, TNP Distribution Service Agreement (2022.3)

■ (성능 평가 절차) 계약이 체결된 사업자는 PG&E의 성능 검증 절차에 따라 사업 시작 직전 및 시작 후 주기적(최대 연 1회)으로 성능 검증을 받음

- (목적) 서비스 구매자인 PG&E가 판매자인 사업자의 계약 이행 능력을 평가하고 성과에 따른 보상액 지급에 대한 조정 여부를 결정하기 위해 성능 검증 시행
- (대상) 급전 가능한(Dispatchable) 자원을 활용하는 경우와 에너지 효율 개선 등에 따른 소비 절감에 기반한 경우로 구분하여 평가를 진행
 - (공급 자원 기반) 설비를 통한 서비스 제공의 경우, 설비용량에 의한 부하 절감을 검증
 - (부하 조정 기반) 에너지 소비량 절감 방식을 토대로 서비스를 제공할 경우, 시간대별 에너지 총 절감량 데이터를 활용해 평가함

IV. 통합 배전망 계획수립 관련 국내 시사점

1. DRP 절차별 시사점

- **[예측] 시나리오 기반의 부하·DER 예측을 통해 불확실성을 최소화하고 위치적(Geo-spatial) 배분을 통해 피더별 부하·DER의 잠재량 예측을 확보해야 함**
 - 특히 부하보다 DER에 관한 이력 데이터가 부족하기 때문에, DER 종류 및 설치 위치 등을 고려해 피더별로 순 부하를 예측하기 위한 방법론 마련이 필요함
 - 인구수, 지역 특징, 기상 환경 등 외부 요인들에 의한 영향 검토 또한 필수적임
- **[망 보강 요소 식별] 시나리오에 의해 예측 및 분배된 부하·DER 값에 따라 보강이 필요한 설비 요소들을 식별할 수 있는 방법론(또는 도구) 개발이 필요함**
 - ADMS 등 기존 개발된 배전 플랫폼을 토대로 배전망 계획을 위한 도구 추가 필요
 - 기존 배전 계획에서는 단방향 전력 흐름만 고려되기 때문에 복잡한 해석 도구가 필요하지 않았으나, DER 추가에 따른 양방향 흐름, 전압 변동 등을 고려한 망 해석이 필요
- **[보강 프로젝트 식별] DER로 대체할 후보 프로젝트를 식별하기 위해 기술성·시의성·경제성 분석에 관한 기준과 방법론 마련이 필요함**
 - 필요한 배전 서비스를 먼저 정의하고 DER의 배전 서비스 제공 여부를 평가하기 위한 기술 기준 확립과 설치 및 운영 시작을 위해 필요한 시간 기준 정의 필요
 - DER의 기술성 검증이 선결되고 나면 망 보강 대체의 비용효율성을 검증하기 위해 설비 투자 및 운영비 회피를 기준으로 하는 경제성 평가 방법론 개발이 필요함
- **[DER 조달 사업] DIDF 같은 사업 구조를 마련하고 활성화하기 위해서 객관적인 평가 기준, 사업자들의 사업성을 보장하기 위한 보상액 산정 방법 등이 필요함**
 - 배전망 안정성을 위해 DER 사업자의 평가를 위한 기술 성능 및 비용효율성 검증자료 등을 요구할 필요가 있으며, 이를 위해 명확한 기준 마련이 필요함
 - 다만 실시간 관제를 위한 추가 설비 마련 등 기술 요건이 엄격할 경우, 초기 사업이 활성화되지 않을 우려가 있으므로, 초기에는 다양한 기술 지원책 등이 필요
 - DER이 확보할 수 있는 다른 수익 구조에 대한 분석에 기반해 망 보강 대체 사업에 참여를 유인할 수 있는 적정 보상액 산정이 중요

- 국내는 아직 DER을 통한 수익 구조가 다양하지 않아 초기에 망 보강 대체 사업을 에너지 신사업으로 확립할 기회가 될 수 있으며, 이를 위해서 시범 사업을 통한 경험 축적이 중요
- 아울러 망 보강 대체 사업 참여를 결정하였으나 사업자 책임 소재로 인해 사업이 중단될 경우, 보강 비용의 일부를 페널티로 부과할 수 있는 제도 또한 필요함
- PG&E 사례와 마찬가지로 배전 유틸리티인 한전이 백업 계획을 마련할 필요가 있지만, 중단 책임 소재가 사업자에게 있는 경우 사업자에게 페널티를 부과할 필요가 있음

2. 전체 제도적 시사점

■ [불확실성 완화] DER 추가에 따라 배전망 계획수립에 불확실성이 증가하기 때문에 시나리오 기반 체계(Framework)와 상위 계획과의 연계를 통해 불확실성을 완화해야 함

- 전기화 등을 통한 부하 증가, DER 증가 추이는 정책 방향에 영향을 받을 수 있기 때문에 시나리오를 마련해 가장 효율적인 대안을 선택함으로써 불확실성을 완화
 - (관련 사례) 영국 최적 계통 계획수립 시 사용하는 최대 후회 최소화(least-regret) 분석
- 특히 배전망은 지역적 특성이 강하기 때문에 지역단위 관제를 통한 실측 데이터를 활용해 예측 정확도를 높임으로써 지역 계통 특성에 맞는 계획을 수립할 필요가 있음
- PG&E 사례와 같이 상위계획인 통합 자원 계획(Integrated Resource Plan)과의 연계*를 통해 중장기적인 관점에서 DER·부하 등의 전망치를 공유할 필요가 있음
 - * PG&E의 경우, 통합 자원 계획 갱신 주기 2년, 배전망 자원계획 갱신 주기 1년
 - 추가로 송전 레벨에서의 보강 필요 요인 등을 연계하면 송전과 배전에서 요구하는 보강 요소의 시점과 위치 등이 겹치는 것을 회피해 중복 투자 등을 방지할 수 있음

■ [규제 보완] 망 보강 대체는 규제 사업에 포함되므로 규제기관 차원에서 배전망에 대한 회피 비용 기준이나 DER 가치 스택 기준 등을 마련해 투명성을 확보해야 함

- 규제기관은 이해관계자들이 참고할 수 있도록 전체 배전 시스템 차원의 회피 비용 기준과 DER 사업자가 수익 구조를 정량화할 수 있는 Value Stacking 방법론*을 마련해야 함
 - * DER이 갖는 가치를 정량화하는 방법으로, DER 사업자가 이를 토대로 어떤 사업에 참여할 것인지 결정할 수 있으며, 향후 시장 제도 개선이 가치 정량화에 영향을 줄 것으로 예상
- 또한 규제기관은 DER 조달과 관련해 유틸리티가 담당할 물량, 시장을 통해 조달할 물량 등의 비중을 검토해 조달 방식별로 물량을 배정하여 최적의 DER 용량 조달 필요
- 추가로 유틸리티의 NWA 사업 수행 타당성을 보장하기 위한 법제도 개선 또한 필요

【참고문헌】

- ▶ 한국전력, 분산에너지법 제18조 관련 제 1차 장기 배전계획, 2025.7
- ▶ Berkeley Lab, Locational Value of Distributed Energy Resources, 2021.2
- ▶ CPUC, 2024 Distributed Energy Resources Avoided Cost Calculator Documentation, 2024.10
- ▶ CPUC, Decision adopting pilots to test two frameworks for procuring distributed energy resources that avoid or defer utility capital investments, 2021.2
- ▶ CYME, Reliable Analytic and Planning Tools to improve electrical network performance, 2015
- ▶ EIA, 2023 Form EIA-861, Annual Electric Power Industry Report, 2024
- ▶ Energy Commission, CalTRACK Methods, 2021.6
- ▶ Integral Analytics, LoadSEER 4.0 Brief : Description, benefits and highlights, 2022
- ▶ Lawrence Berkeley National Lab, Quantifying Locational Net Benefits of DERs for Distribution Systems, 2022.9
- ▶ PG&E, DIDF 2023-24 Partnership Pilot RFO, 2024.1
- ▶ PG&E, PG&E's 2023 Distribution Grid Needs Assessment, 2023.8
- ▶ PG&E, PG&E's 2023 Distribution Deferral Opportunity Report, 2023.8
- ▶ PG&E, TNPF Distribution Service Agreement, 2022.3
- ▶ Quanta Technology, An Analytic Framework for Evaluating the Value of Distributed Energy Resources, 2020.4
- ▶ SEPA, Integrated Distribution Planning : A Framework for the Future, 2020.9

작성자 : 한전 경영연구원 이원풍 선임연구원

Research Activities I : AI 데이터센터 부하 특징 및 계통 영향

자료 Can US infrastructure keep up with the AI economy (Deloitte, 2025.6) 외 2개 자료

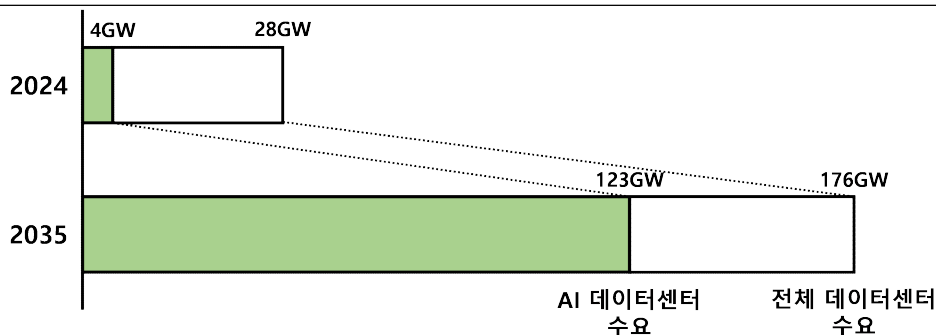
1 AI 데이터센터 개요

□ [전력수요] AI 서비스의 성장으로 AI 데이터센터의 전력수요가 급증하고 있음

- 미국 AI 데이터센터는 전력수요 기준, 4GW(2024년)에서 123GW(2035년)까지 증가할 전망
- AI 전용 데이터센터의 전력수요 급증이 일부 지역 송·배전망 과부하를 유발하고 있는 가운데, 송전망 건설 지연으로 데이터센터의 전력망 연계가 지연*되고 있음

* 2030년 전 세계 데이터센터 용량의 20%는 전력망 연계 지연을 겪을 것으로 전망

I 미국의 AI 데이터센터 전력수요 전망 I

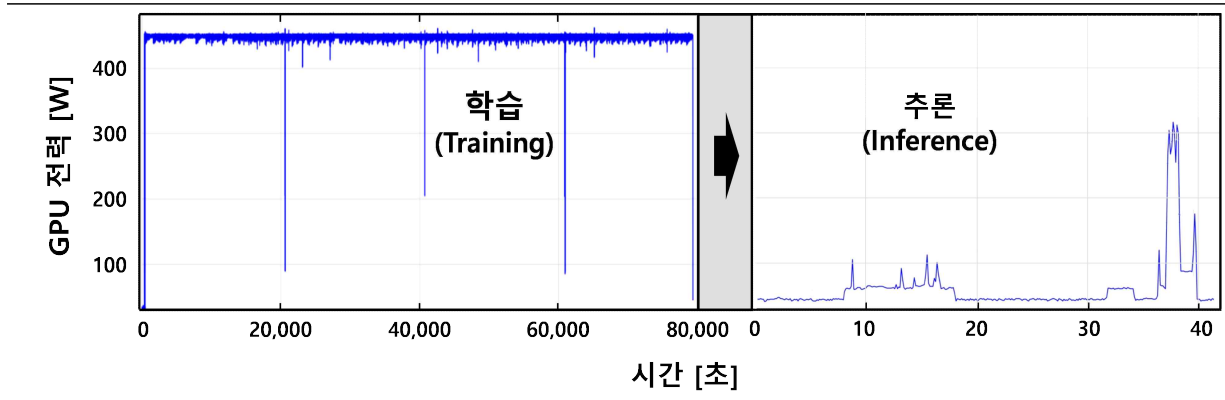


※ 출처 : Deloitte, 2025

□ [작업 유형] 학습(Training)과 추론(Inference)으로 구분

- **(학습)** 방대한 양의 데이터를 알고리즘에 입력하여 모델이 패턴과 관계를 인식하고 특정 작업을 수행하도록 가르치는 계산 집약적인 과정임
 - 수백 대 이상의 그래픽 처리 장치가 동시다발적으로 최대 성능으로 구동되기 때문에, 학습 작업이 진행되는 동안 AI 데이터센터 전력 부하는 항상 최고 수준으로 유지됨
- **(추론)** 학습을 마친 AI 모델을 실제 운영 환경에서 사용하여, 새로운 데이터를 기반으로 예측, 결론 도출 또는 결정을 내리는 실행 단계
 - 단일 요청의 연산량은 학습 대비 낮기 때문에 소비전력 자체는 낮으나, 전력 부하는 요청 빈도 및 복잡도에 따라 변동, 평균 부하는 낮지만 이용 집중 시간대에는 급격한 피크가 반복적으로 발생함

■ AI 데이터센터 작업 유형별 전력소비 패턴 ■



2 AI 데이터센터의 부하 특징

□ AI 데이터센터는 많은 전력을 소비하며, 24시간 상시 가동됨

- **(전력 다소비)** 현대 AI 모델 학습은 초대규모 수치 연산(초당 100京번)을 요구하여 일반적 HPC* 작업보다 높은 전력수요가 발생하며, 또한 다수의 네트워크 및 냉각 부문까지 전력이 사용되어 총 전력 사용이 크게 증가함

* HPC(High Performance Computing) : 높은 성능을 가진 컴퓨터를 이용해 복잡하고 대규모의 계산 문제(날씨 예측, 유전체 분석 등)를 해결하는 작업

- **(24시간 상시 가동)** AI 서비스는 사용자 요청 처리와 주기적 재학습 때문에 24시간 상시 운영되는 경우가 많으며, 이용자 수 변화나 입력(프롬프트) 길이 증가 등으로 순간 전력 사용이 급증할 수 있어 안정적인 전력 공급과 예비 전력 확보가 요구됨

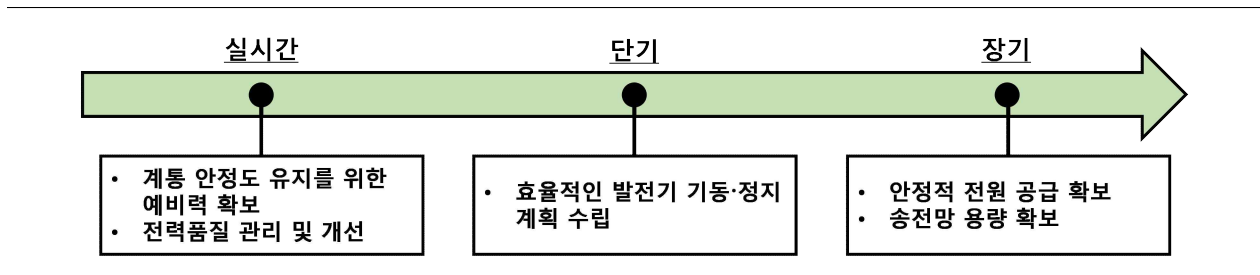
□ AI 데이터센터의 부하는 변동성이 높고 비선형적인 특성을 가짐

- **(높은 변동성)** 학습 및 추론 단계에서 기본적으로 변동성이 크며, 수치 정밀도·학습률 등 연산 파라미터 설정에 따라 전력 소비 패턴이 크게 달라짐
 - **(학습)** 기본적으로 연산량이 커 상시 전력 사용이 많으며, 중간 상태 저장·복구, 장애 처리 또는 서버 재시작 시점에는 전력이 순간적으로 변동함
 - **(추론)** 동시 이용자 수, 프롬프트 길이 등에 따라 전력이 순간적으로 변동함
 - **(연산 파라미터)** 수치 정밀도, 학습률, 동시 처리 개수 조정, 최적화 적용 여부 등에 따라 전력소비 패턴과 총 전력수요가 크게 변동함
- **(비선형 부하 특성)** 데이터 및 연산 규모가 커질수록 연산에 필요한 전력수요는 초선형적으로 증가하나, AI 데이터센터 내 반도체 설비의 효율, 냉각 조건 등에 따라 달라져 단순히 초선형성 공식만으로 전력수요를 예측하기 어려움

* 초선형적 : 어떤 현상이 선형적으로 증가하는 것보다 더 빠르게 성장하는 것을 의미

3 AI 데이터센터 전력수요 증가에 따른 전력망의 과제

■ 대규모 AI 데이터센터 계통 연계의 핵심 과제 ■



□ [실시간 관점] 계통 안정을 위한 예비력 확보 및 전력품질 개선

- **(도전과제)** ① 데이터센터 같은 전력전자 기반 부하는 주파수·전압 변동 민감도가 높아, 대규모 동시탈락에 따른 계통 연쇄 사고 가능성 존재, ② 작업 전환으로 수십~수백 MW가 1/1000초 단위로 변동하여 주파수·전압 유지에 부담이 되며, 진동 및 공진 유발 가능, ③ 데이터센터 내 전력전자 설비의 스위칭으로 고조파 등 전력품질 저하 유발 가능
- **(해결책)** ① 데이터센터 대상 전압·주파수의 FRT* 최소 요건 의무화, ② ESS로 단기 전력 변동 흡수, ③ AI 데이터센터 부하 동특성 모델** 표준화, ④ 계통 운영자와 실시간 정보 연계 및 전력수요 단기 예측 고도화, ⑤ 고조파 필터 설치 의무화

* FRT(Fault Ride Through) : 계통 고장으로 인한 주파수·전압 변동 시 연계 운전 유지 능력

** 부하 동특성 모델 : 계통 외란으로 시간에 따라 전압·주파수가 바뀌는 과도상태 해석에 적합한 모델

□ [단기적 관점] 효율적 발전기 기동·정지 계획 수립

- **(도전과제)** ① 수십~수백 MW의 버스티 부하*로 단기 수요 예측이 어려워지고, 급전(UC/ED) 불확실성과 예비력 요구가 증가하여 운영비 부담이 증가할 것으로 예상, ② 피크 수요 상승으로 용량시장 정산가격에 상방 압력이 커짐, ③ 송전혼잡지역에는 지역별 한계가격(LMP) 급등 리스크 증가 예상

* 버스티부하(Bursty Load) : 전력소비가 갑작스럽고 불규칙하게 급증하는 패턴의 부하

□ [장기적 관점] 안정적 전원 및 송전망 용량 확보

- **(도전과제)** ① AI 중심의 전력수요 급증에 따라 송·배전 설비 확충(계획-허가-시공)에 5~10년 소요, ② AI 데이터센터 입지 집중 및 연계 병목으로 송전혼잡·계통신뢰도 저하
- **(해결책)** ① 데이터센터-계통-전원의 통합 계획(Co-planning)을 통해 입지·규모 최적화, ② 재생e·원전 등 장기 PPA로 안정적 대용량 전원 확보, ③ 대형 부하 전용 요금 및 표준 계약 도입을 통해 전기요금의 예측 가능성 제고

작성자 : 한전 경영연구원 김종인 선임연구원

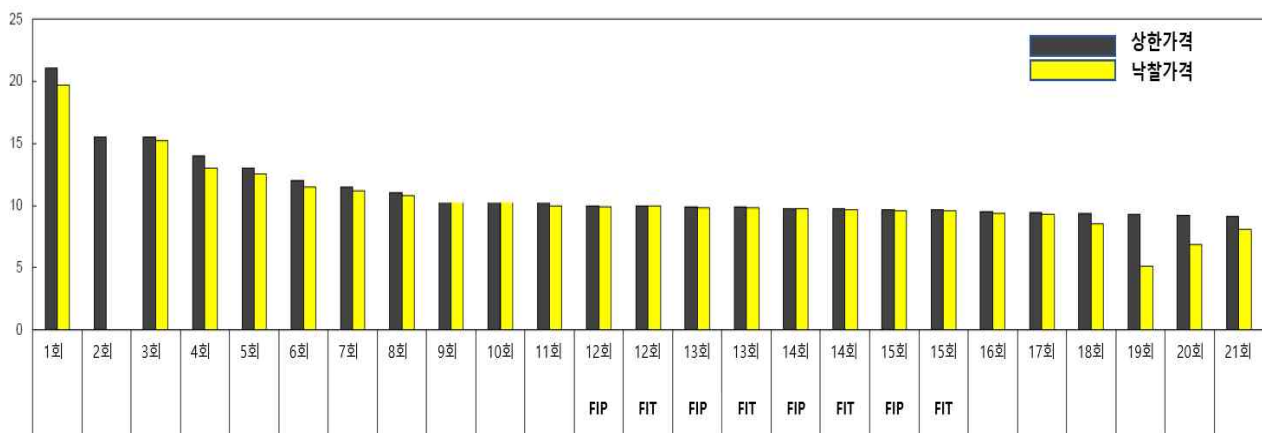
Research Activities Ⅱ : 일본 태양광 FIP/FIT 경매 동향

자료 Trends in Solar Power FIP/FIT Auction (IEEJ, 2025.2)

1 일본의 태양광 경매제도 현황 및 가격 추이

- 2017년 4월 FIT법 개정에 따라 태양광 발전 판매가격을 경매를 통해 결정하는 제도가 도입되었으며, 2017년 9월 1차 경매를 시작으로 현재까지 총 21회의 경매가 진행
 - 2017년 9월 1차 경매의 낙찰가격(가중평균)은 19.64엔/kWh이었으나, 최근 21차 경매에서는 8.08엔/kWh를 기록하며 약 7년간 낙찰가격이 절반 이상 하락함
 - 특히, 21차 경매 결과는 조달가격산정위원회가 설정한 2025년 태양광 발전 목표 비용인 7엔/kWh에 매우 근접한 수준으로, 정책 목표 달성이 가시화되고 있음
- 그러나 총 21회 경매 중 입찰물량이 조달 목표 물량을 초과한 경우는 8회에 불과하며, 21차 경매에서는 입찰물량이 조달 목표 물량의 약 31%에 그쳐 경쟁률이 저조한 상황
 - 또한, 대부분의 경매 회차에서 낙찰가격이 설정된 상한가에 매우 근접하게 형성되어, 실질적인 가격 경쟁이 충분히 이루어지지 않았음을 시사
 - 입찰 참여율이 낮고 낙찰가가 상한가에 근접한 것은 경쟁 촉진에 필요한 충분한 입찰 물량이 확보되지 못했거나, 설정된 상한가가 발전사업자들이 적정 수익성을 확보할 수 있는 한계에 근접했기 때문인 것으로 추정

■ 태양광 FIP/FIT 경매 낙찰가격 추이 [엔/kWh] ■



* 12회 경매부터 FIP 도입 후 15회까지 FIT와 FIP를 구분해서 경매 진행. 이후 FIP중심으로 통합되어 경매 진행

2 입찰사례 및 PPA 활용 전략

□ 제19차 경매는 역대 경매 중 가장 낮은 낙찰가격(5.11엔/kWh)을 기록했는데, 특정 사업자가 제출한 0.00엔/kWh의 입찰가격이 영향을 미친 것으로 분석됨

- 0엔 입찰 사업자(운영사 A)는 낙찰 시 받을 수 있는 프리미엄(보조금)을 받지 않는 대신, PPA를 통해 소비자에게 직접 공급하는 전략을 취한 것으로 추정
 - FIP 사업계획 인증을 취득한 발전 사업자에게 주어지는 요금 면제 혜택*을 받기 위해 0.00엔/kWh의 입찰가격을 제출한 것으로 분석됨
- * 2024년 3월 31일 이전 FIT/FIP 인증을 취득한 전원은 송배전망 유지·확장 비용을 충당하기 위해 발전 사업자에게 부과되는 요금을 면제받음
- FIP/FIT 입찰 상한가가 점차 낮아지고 있어 태양광 발전 사업자들은 가격 변동성이 큰 도매시장에서 수익을 극대화하기 위해 다양한 전략을 취할 것으로 전망됨

□ 제19차 경매에서 가장 낮은 가격을 제출한 8개 시설(6.90엔/kWh 이하 입찰) 중 대부분은 대규모 발전소로 규모의 경제를 통해 비용 절감이 가능한 사업자들이 주로 입찰에 참여하는 것으로 추정됨

- 2023년 기준 500~1,000kW급 시스템의 설치비용은 147,000엔/kW인 반면 10~50kW급 시스템의 경우 251,000엔/kW으로 격차가 존재해 독립발전사업자로서 재생에너지 보조금 없이도 운영이 가능한 시설은 대규모 발전소에 한정되어 있음
- 대규모 태양광의 경우 입지 선정이 점점 어려워지고 있어 향후 소규모 태양광이 대안이 될 것으로 전망됨에 따라, 소규모 태양광 발전에 대한 상세한 비용구조 분석에 기반해 비용 절감과 보급 확대를 동시에 달성할 수 있는 적절한 상한가 설정이 요구됨

Ⅰ 제19차 경매 입찰 최저가 8개 시설의 입찰가격 및 설비용량 Ⅰ

| 운영사 | 입찰가격(엔/kWh) | 설비용량(kW) |
|-------|-------------|----------|
| 운영사 A | 0.00 | 19,900 |
| 운영사 B | 4.94 | 1,990 |
| 운영사 C | 5.00 | 29,910 |
| 운영사 D | 5.09 | 1,999 |
| 운영사 E | 5.37 | 12,000 |
| 운영사 F | 6.00 | 800 |
| 운영사 G | 6.90 | 23,000 |
| 운영사 H | 6.90 | 1,999 |

작성자 : 한전 경영연구원 윤 영 선임연구원

KEMRI 전력경제 Review 2025년 10월호 (Vol.320)

발행일 2025. 11. 14.

발행인 원장 강민석

편집인 경영연구원 편집위원회
 편 집 장 책임연구원 원동규(☎국선 : 02-3456-5490 / 사선 : 021-5490)
 편집위원 선임연구원 김범규(☎국선 : 02-3456-5491 / 사선 : 021-5491)

홈페이지 www.kepco.co.kr/KEMRI

문의처 경영연구원 연구기획팀(☎국선 : 02-3456-5490~1 / 사선 : 021-5490~1)

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