

KEMRI 전력경제 REVIEW



Vol.307

이전 Review 보기 | 2024년 9월호

▶ Issue Paper

- 글로벌 직류 배전망 연구 사례 검토 및 시사점

▶ Research Brief

- 협력사의 ESG 경영 기반 조성을 위한 사례 연구
- 주요국의 공용송전망과 접속설비 분류범위 및 비용부담 주체 관련 조사

▶ Research Activities

- 英 전기차(EV) 스마트충전 추진계획의 주요 내용
- 전력망 현대화를 위한 인공지능(AI)의 역할 및 활용방안

【 Highlight 】

1. 직류 배전망 등장 배경

- 재생e 발전원 등 DC 기반의 전력자원이 증가하면서 AC 계통이 한계에 직면
 - AC↔DC 변환손실이 증가하고 전력흐름의 방향 예측·제어가 곤란해지는 등 AC 계통의 기술적 한계 직면
- 직류전기는 능동적인 전력흐름 제어, 낮은 손실 등으로 장거리·대용량 전송이 가능하므로, 직류 배전망에 대한 유ти리티의 관심 증가
 - 반도체 기반의 변환장치는 유·무효 전력의 독립제어가 가능하여 필요에 따라 전압, 전류의 자유로운 제어가 용이하고, 전선의 인덕턴스 성분의 영향이 매우 낮아 대전류의 장거리 전송에도 AC 계통 대비 손실 및 전압강하가 낮음

2. 글로벌 직류 배전망 연구 사례

- (활용사례) AC 방식으로 해결이 곤란한 배전망의 문제 해소를 위해 부분적으로 활용
 - 배전용 AC 선로에 직류전기를 적용하여 전송용량이 기존 대비 1.2~2배 상향되면서, 선로 추가 건설에 비해 비용효율적으로 전송·연계 용량이 증대됨
- (표준화) 범용 직류 배전망에 대한 국제 표준은 초기 연구단계로 이와 관련한 지침·기준 부재
 - 대다수의 직류 배전망 설계표준은 BTM 계통전압, 내부 계통구성, 접지와 관련한 것으로 유ти리티의 직류 배전망과 관련한 시설기준, 설비표준은 학술적인 연구 단계
- (비용편익) 직류기술의 높은 투자비로 인해 배전망에 적용하기 위한 타당성 확보가 어려움
 - 직류기술 도입에 따라 발생하는 편익의 공평한 배분 방법, 증가하는 투자비의 부담 주체 등 직류 배전망 도입 관련 사회적 논의, 법·제도 연구는 미흡

3. 국내 적용 시 시사점

- (모델설정) 국내 배전계통에 적합한 비용효율적인 직류 배전망 기술 모델 검토
 - 국내 계통 인프라와 최대한 호환될 수 있는 직류 배전계통 적용모델을 설정하고, 해당 모델 구현을 위한 맞춤형 직류기술 개발로 기술 난개발을 예방
- (기술기준) 직류기술의 원활한 배전망 활용을 위해 KEC 등 관련 기술기준 표준화
 - 원활한 현장 적용을 위해서는 상기 표준모델 설정과 함께 구체적인 설비구성 방법, 시공지침 등 설계기준이 마련되어야 함
- (법·제도) 직류기술 적용에 따른 발생 비용과 편익의 공정한 배분을 위한 법·제도 마련

【 목 차 】

shine Issue Paper

■ 글로벌 직류 배전망 연구 사례 검토 및 시사점

- 허훈 차장

| | |
|---------------------------------|----|
| I . 직류 배전망 등장 배경 | 1 |
| II . 직류기술의 배전망 적용 사례 | 2 |
| III . 표준화 연구 사례 | 6 |
| IV . DC 기술의 비용편익 분석 연구 사례 | 9 |
| V . 국내 적용 시 시사점 | 13 |

shine Research Brief

| | |
|---|----|
| I . 협력사의 ESG 경영 기반 조성을 위한 사례 연구 | 15 |
| II . 주요국의 공용송전망과 접속설비 분류범위 및 비용부담 주체 관련 조사 | 27 |

shine Research Activities

| | |
|--|----|
| I . 英 전기차(EV) 스마트충전 추진계획의 주요 내용 | 38 |
| II . 전력망 현대화를 위한 인공지능(AI)의 역할 및 활용방안 | 42 |

☀ Issue Paper : 글로벌 직류 배전망 연구 사례 검토 및 시사점

I. 직류 배전망 등장 배경

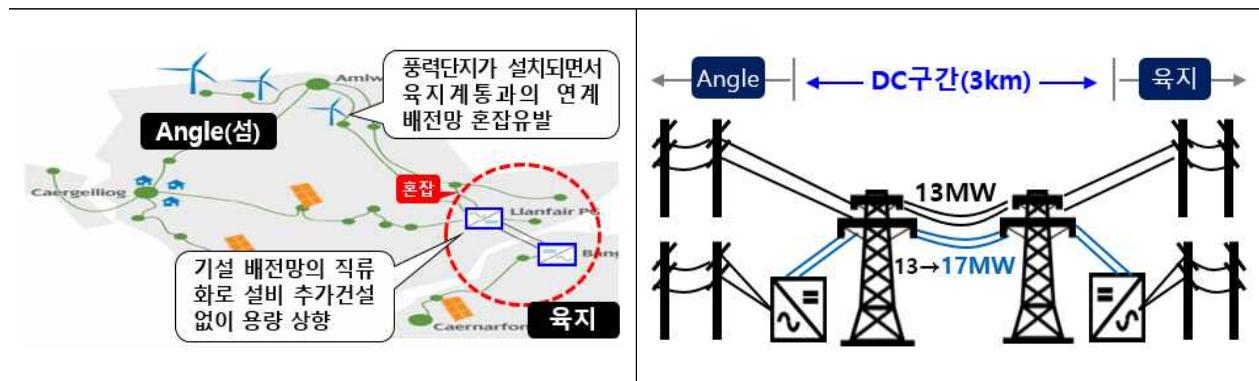
- 교류전기(AC)는 변압의 원리가 간단하고 승압을 통해 저손실로 장거리 전송^{*}이 가능하여 유ти리티의 공용 송·배전망은 일반적으로 교류전기 기반으로 운전 중
 - * 동일한 전력을 공급할 때 고압으로 전송하게 되면 전류 크기가 줄어 거리에 비례하여 발생하는 손실 및 전압강하 크기가 감소하기 때문에 장거리 전송 시 고압이 유리함
- 직류전기(DC)는 전기적 동작 메커니즘이 직관적이고 특성이 복잡하지 않으면서 전력공급 시스템 구성이 간편해 전기를 활용하기 시작한 초기에는 직류전기가 주로 쓰였음
- 전력수요가 증가함에 따라 수요지에서 멀리 떨어진 대형 발전기가 등장하면서 장거리 전송이 필요해졌으며, 변압 기술이 부족했던 DC 대신 변압 과정이 간편한 AC 기반의 계통이 확대되고, 현재까지 AC 기반 송·배전망을 활용 중
- 그러나 전선의 인덕턴스 성분이 교류 전기의 흐름을 방해하여 AC가 장거리·대전류 전송에 불리^{*}해졌고, 디지털 기기, 태양광 패널(PV) 등 직류성 전력자원이 증가하면서 AC↔DC 간 변환손실이 증가함
 - * 교변하는 AC는 전선 주위에 전류의 흐름을 방해하려는 자기장을 유도하게 되어 동일 용량의 전력을 전송할 때 DC가 유리
- 지속적인 전기사용량의 증가에 따라 늘어난 전류로 인해 AC의 한계가 드러났으며, 이로 인해 인덕턴스 성분이 적은 굵은 전선으로 교체, 전압 보상 장치 설치 등에 따른 설비 보강 비용이 증가함
- 또한, 교류기반 계통에서 데이터 서버, 태양광 발전원 등 DC 기반의 전력자원이 늘어나면서 AC↔DC 간 변환손실, 고조파 주입, 재생e 연계선로의 혼잡 등이 발생하고 있음
- 전력 반도체 기술^{*}의 발전으로 DC의 변압, AC↔DC의 변환이 용이해지면서 DC 기술이 적용된 계통에 대한 유ти리티의 관심이 증가하고 있음
 - * IGBT, 싸이리스터로 대표되는 전력 반도체는 태양광 인버터 등 전력변환기의 주요 부품으로 DC의 변압, AC↔DC 간 변환을 가능하게 함
- 장거리·대용량 전송 시 손실이 낮고, 전력흐름 제어가 가능한 직류기술이 등장하면서 유ти리티는 기존 망에 DC 기술을 적용하는 방법에 대한 연구 및 실증 추진 중
- 송전급의 초고압 직류 송전(HVDC) 기술은 이미 상용화되었지만, 배전급의 DC 기술은 도입 초기 단계로 해외 직류 배전망 연구 사례를 통해 국내 적용 가능성에 대한 검토가 필요함

II. 직류기술의 배전망 적용 사례

1. 전송용량 상향, 장거리 전송 시 손실 감소 등을 위해 배전망에 DC 적용

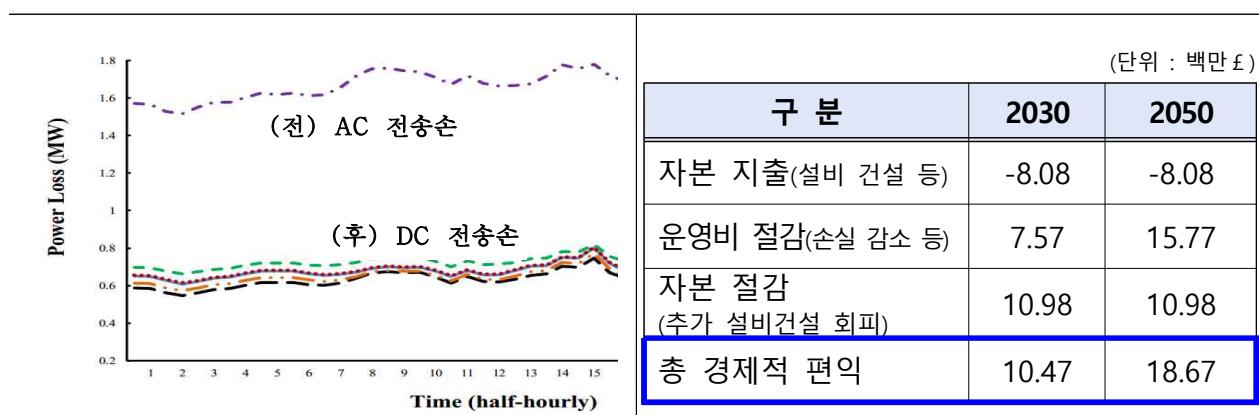
- (영국) Angle DC Project, 기존 AC 선로의 직류화로 전송용량 증대

■ Angle DC Project 개요 ■



- (배경) 섬 지역인 Angle의 북쪽 해상에 풍력단지가 건설되면서 배전 철탑 2회선으로 구성된 육지계통과의 연계선로(용량 13MW/회선)에 혼잡이 발생
- (내용) 기존 AC 배전 철탑 2회선 중 1회선을 직류화하여 전송용량을 25MW에서 30MW로 늘렸으며, 이에 재생e로 인한 섬 계통의 혼잡, 전압 불안정 등을 해소함
- (성과) '30년까지 추가 설비건설 회피, 전송손실 감소 등의 효과로 총 10.47백만 파운드, '50년까지 총 18.67백만 파운드의 경제적 편익이 발생할 것으로 추정

■ Angle DC Project 결과분석 ■



* 컨버터 운전 모드에 따른 손실 차이

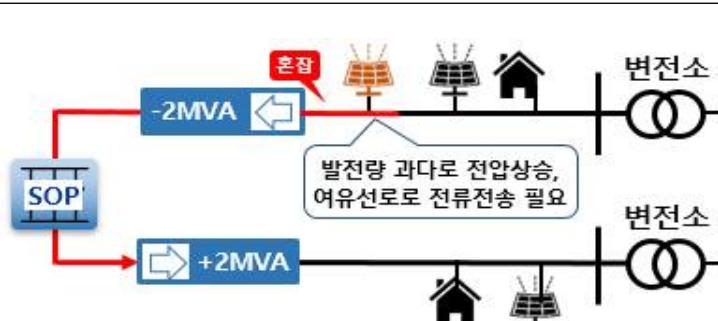
* 변환기 수명 15~25년 가정

※ 출처 : SP Energy 내부 보고서, 2020년

2. 능동적인 망 운영을 위해 전력흐름 제어 기술이 적용된 LVDC* 실증

* Low Voltage Direct Current, 저압 직류 배전망

| 전력흐름 제어 개념도 |



* SOP(Soft Open Point), 전력흐름의 방향을 제어

유·무효 독립제어가 가능한 직류변환기는 원하는 크기의 전류를 원하는 계통으로 유입할 수가 있어, 직류기술이 DSO 체계로의 전환을 위한 기술로서 주목

■ (ITALIA 이탈리아) ASM TERNI*, 에너지 자립률 향상을 위한 전력흐름 제어 기술 실증

* ASM은 인구 10만 명의 작은 도시인 TERNI의 배전망 운영자

- (내용) ASM은 에너지 자급이 가능한 TERNI에서 지역 DSO 역할* 수행을 위해 전력흐름 제어 기술이 적용된 LVDC 실증 시행

* 계통 상황, 태양광 발전량, ESS 충전율 등을 고려하여 비용효율성을 개선하고, 전력흐름의 전략적 제어 등을 통해 배전망의 안정적이고 효율적인 운영을 담당

- '21년 EU RED(Renewable Energy Directive) II에 따라 이탈리아 내 지역 EC*는 1MW 이하의 신재생 발전원을 설치하였으며, EC에 속한 구성원들에게 자체적으로 생산한 전기를 공급할 수 있게 됨

* Energy Community, 동일한 발전원 및 망을 공유한 지역 주민 주도의 집단 에너지 공동체

- (성과) 효율적인 수급균형, 계획 기반의 계통 운영이 가능해져 지역망 외부 계통 의존도를 낮췄으며, EC의 에너지 자급률을 개선함에 따라, 지역 배전망 사업자의 DSO 역할 수행을 위한 계통운영 기술 구현의 가능성이 확인됨

| TERNI 수급패턴 ('21) |

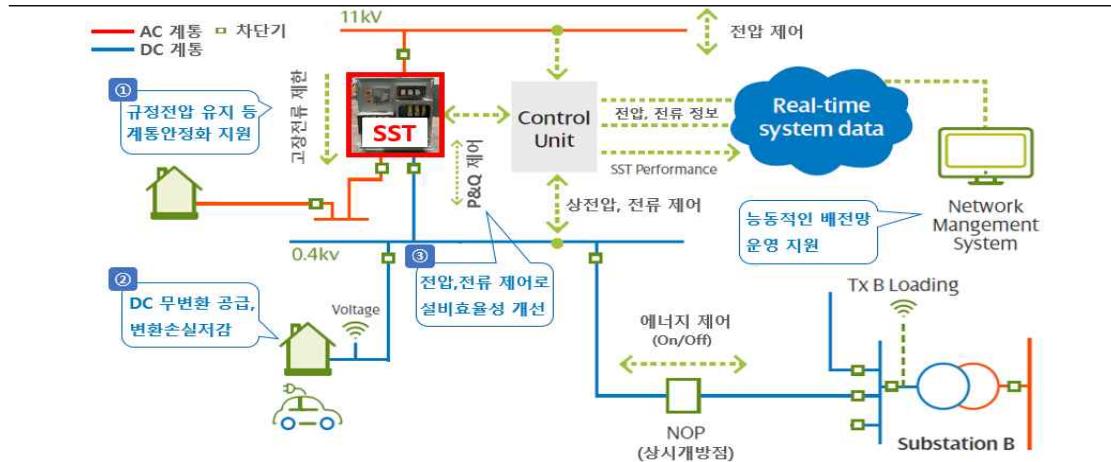


- (영국) 배전용 STT 변압기^{*}를 활용하여 지역 LVDC를 구성하고, DSO 기술 솔루션 검증

* Solid State TR, 반도체 기반의 배전용 변압기로 변압·변환·전력흐름 제어가 가능함

- (내용) 영국 배전망 사업자 SP는 150kW의 STT 변압기를 활용해 지역 저압망의 전력흐름 제어, 전류균등 배분 등 능동적 배전망 운영을 위한 기술을 실증함(LV ENGIE, '18~'24년)

| SST 동작 개념도 |



※ 출처 : LV ENGINE 설명자료('18)

- (성과) 고장전류 제한, DC 무변환 활용, 유·무효 독립제어 등 효율적 계통 운영 지원

- ① (고장전류 제한) 저압측 계통 고장으로 발생하는 순간적인 큰 전류를 고속으로 차단할 수 있어 고장으로 인한 계통의 과도 안정도 저하를 예방할 수 있음
- ② (DC 무변환 활용) 저압 계통에 접속되는 전기차 충전소(EVC), PV 등 직류기반의 전력 자원과 직접적인 무변환 연계가 가능하여 변환손실을 줄일 수 있고, 연계 서비스를 최소화
- ③ (유·무효 독립제어) 유·무효 전력의 독립적인 제어가 가능하여 필요에 따라 MV 또는 LV 계통에 유·무효 전력을 유입하고, 효율적인 계통 운영에 기여

| 저압 배전망 혼잡 해소 |



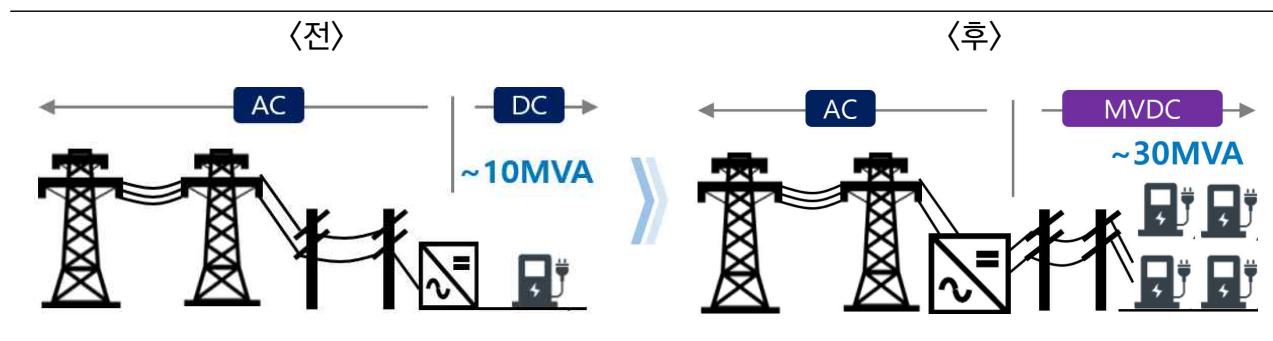
※ 출처 : LV ENGINE 설명자료('18)

3. 변환손실 저감 및 송전망 건설 이슈 해소를 위해 대용량 직류 배전망을 활용하여 EVC 등 대형 직류부하 공급모델 개발

▪ (미국) 고속도로 휴게소 EVC 전력공급을 위한 MVDC* 모델 개발 연구

* Medium Voltage Direct Current, 고압 직류 배전망

| 적용 전·후 개념도 |



- (배경) 美, National Grid는 고속도로 휴게소(Highway Plaza)에 설치된 EVC의 전력수요가 증가할 것으로 전망하고 공급망보강 프로젝트(Electric Highways Project) 계획 수립
- (내용) 고속도로와 근접하여 설치된 송전선로에서 MVDC 계통으로 직접 전력을 공급하는 모델을 검토하였으며, 급증하는 EVC에 신속하게 전력을 공급하기 위해 건설 기간이 1~4년으로 상대적으로 짧은 배전망과 MVDC 기술의 조합이 대안으로 검토됨

4. 직류기술을 활용하여 소규모 계통 독립 운전 지원, 손실 최소화 등 운영 효율 개선

▪ (네덜란드) 장거리 소규모 계통에 직류기술을 적용하는 N470 Road Project 시행

- (배경) 저압 DC 배전계통을 구현한 사례로 4.7km 장거리 선로의 저압공급으로 인한 전압강하 및 전송손실 수준을 낮추고 무전원 상태에서도 신호등과 같은 중요부하에 대한 전원공급을 유지할 수 있는 ‘직류 독립계통’ 구현 목적
- (내용) NPR 9090*에 따라 설치된 LVDC 계통으로 700V DC 전압, TN-S(대지접지) 시스템을 적용하였으며 AC 계통과 DC 계통을 전기적으로 완전히 분리하고, 양 계통 간의 간섭 최소화와 동시에 AC 계통 정전 등 무전원 상태에서도 1MWh 용량의 배터리 저장장치 시스템(BESS)을 사용하여 DC 기반의 무정전 마이크로그리드(MG)를 구현함

* National Practical Guideline, 네덜란드의 전기설비 가이드라인으로 1,500V 이하 DC 설비 설치와 관련한 케이블 시설기준, 접지 방법, 안전기준 등 명시

III. 표준화 연구 사례

1. (설계표준) 전 세계적으로 유틸리티가 활용할 수 있는 '직류 공용 배전망' 설계기준·설비지침 운영 사례가 없음

- 대다수의 직류 배전망 설계표준은 BTM 계통전압, 내부 계통구성, 접지와 관련한 것으로 유틸리티의 직류 배전망과 관련한 시설기준, 설비표준은 학술적인 연구 단계로 판단됨

■ 네덜란드의 전기사용자 건물 内 LVDC(~1,500V) 설비지침(NPR 9090, '20년)

- (공칭전압) 기존에 설치되어 있거나 현행 AC 전선을 그대로 활용하는 조건으로 DC 전압을 설정하였으며 LVDC 활용 분야에 따라 적정 전압을 선택할 것을 권고

■ DC 시스템 전압 선정 ■

* 출처 : NPR 9090

| (기준) AC 계통 | (개선) DC 계통 ※ 전선 재사용 | Pmax (허용전류 16A 기준) | |
|-------------|---------------------|--------------------|--------|
| Vnom_AC | Vnom_DC | DC | AC |
| 230V_AC(1상) | 350V_DC | 5.6kW | 3.7kW |
| 400V_AC(3상) | ±350V_DC | 11.2kW | 11.1kW |
| 690V_AC(3상) | ±700V_DC | 22.4kW | 19.1kW |

※ 기존 AC 시스템의 전선을 재사용할 수 있으며 차단기 및 접지는 직류용으로 변경

- (접지체계) 직류구간 접지 방법에 대해 정의하고 있고, AC 계통 연계형 LVDC 시스템은 '다중 & 간접접지*'를 선택하도록 권고

* 직류 시스템은 접지극을 직접 매설하게 되면 전기적으로 부식을 가속화시키는 단점이 있어 접지극을 다이오드 및 저항과 조합하여 누설전류 제한

※ 국내 LVDC 배전망은 비접지 시스템을 적용하고 있어 부식 우려는 없으나 접지극이 없어 고장전류 검출이 쉽지 않아 추가적인 고장 검출용 설비 부설이 필요함

- (전선 색구분) 전압선(±350V_DC & 0V),
접지선의 색깔을 각기 달리 정의하였으며,
이는 한국전기설비 규정(KEC)에서 정의
하고 있는 AC 저압케이블의 상별 색
구분 체계와 유사함

■ 전선별 색깔 정의 ■

| +350V | 0V | -350V | 접지 |
|-------|----|-------|----|
| | | | |

- (보호장치) 해당 내용은 사용장소 内 과전류차단기의 정격전류를 정의하고 있으며 DC 350V 시스템은 80mA(AC의 경우 30mA)로 설치 권고

- (EMerge^{*}) 사용자 건물 내부의 통신설비, 산업용 전기 설비의 DC 전압에 대한 표준을 설정하였으며 EVC 공급망, MG의 직류전압을 연구 중

* EMerge Alliance, 국제전기기술위원회(IEC), 전기전자공학자협회(IEEE) 등 전력분야 전문기관 협의체로 직류계통 기준수립 등 직류기술 보급 확대를 목적으로 하는 비영리 법인

| ■ MG 관련 표준체계 ■ | ■ DC 관련 표준체계 ■ |
|---|---|
| <div style="background-color: #00AEEF; color: white; padding: 5px; border-radius: 10px; margin-bottom: 5px;">MG 협의체</div> <div style="background-color: #D9EAD3; color: black; padding: 5px; border-radius: 10px; margin-bottom: 5px;">MG 연계 협의체</div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> 현재 운영 중 <div style="display: flex; gap: 10px;"> 상업/산업용 ICT 거주용 설비 </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> 운영 예정 <div style="display: flex; gap: 10px;"> 의료기기 스마트 팜 EV 인프라 군사/안보 </div> </div> | <div style="background-color: #00AEEF; color: white; padding: 5px; border-radius: 10px; margin-bottom: 5px;">특수 목적 직류 설비</div> <div style="background-color: #D9EAD3; color: black; padding: 5px; border-radius: 10px; margin-bottom: 5px;">DC 계량기</div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> 현재 운영 중 <div style="display: flex; gap: 10px;"> 커넥터류 AC/DC입력부 DC 보호회로 </div> </div> |

- **(주택용 전기)** 거주공간의 전등 등 낮은 출력의 전기제품에 대한 최종 공급전압을 DC 24V로 설정하였으며 100VA 이하의 전력을 공급하는 시스템에 대해서는 현행 AC 서비스와 동등한 수준의 사용자 안전성 확보가 가능함을 제시
- **(통신설비 공급계통)** 데이터센터(IDC), 산업용 통신설비 등에 공급하는 전기의 표준전압을 DC 380V로 설정하였으며, 교류→직류 변환설비 생략으로 설치비용 20% 절감, 사용 공간 25% 감소, 변환손실 및 고조파가 없는 전기공급이 가능
- **(EVC 공급망)** 거주용 EVC, 집합 충전소 등 다양한 형태의 EVC 전기공급 모델 설비 구성에 관한 표준 연구를 위해 워킹그룹을 구성
- 전기공급이 어려운 지역에 자체적인 전기 시스템 구축을 위한 DC MG의 설비구성 표준 마련(IEEE 2030.10, '21년)
 - **(계통전압 등)** DC 기반 MG의 구조, 발전원 구성, 제어 및 보호체계 등에 대해서 정의하고 있으며 MG 계통의 DC 전압을 48V로 설정
 - **(계통 종류)** DC 기반 MG의 회로 구성을 Mesh, Radial, Hybrid 3종류로 분류하여 각 구성 방법의 장단점, 보호체계 및 TEST 방법 등에 대해 정의

2. (설비개발) 변환 알고리즘, 직류 보호기기에 대한 개발·연구가 주를 이루며 최근 AC 케이블의 직류 적용 타당성 연구에 대한 유틸리티의 관심 증가

- ▣ 기존 AC 전선·케이블의 재사용을 전제로 할 때 직류 배전망 모델의 경제성 등 적용 타당성 확보가 용이해 최근 허용가능 직류전압 등 적용 가능성 연구 활발

■ (CIGRE) 중압(12/20kV) 교류 케이블에 적용 가능한 직류 전기의 전압 크기 검토

■ DC 전기 특성 ■

- ▣ (+)와 (-)가 주기적으로 교변하는 AC 전기와는 달리 DC는 (+) 또는 (-) 전기가 상시 유지되기 때문에 공간전하^{*}(Space Charge), 전하트랩^{**}(Charge Trap)으로 인한 절연성능 저하의 문제가 발생하므로, DC 시스템에 사용되는 케이블에는 고성능 절연체를 적용

* '전하먼지'라고도 불리우는 공간전하는 일정한 극성을 가지는 물질 주변으로 쌓이는 전하를 지칭하며, 이로 인해 전기적인 절연 거리가 짧아지는 문제 야기

** 전하트랩은 일정한 극성을 가지는 도체를 둘러싸고 있는 절연체에 동일한 극성의 전하가 축적되는 현상을 말하며, 이는 국지적인 전기장을 형성하고, 절연 성능 저하를 유발함

- CIGRE TB 496(HVDC 케이블 시험)에 의거 '12/20kV MVAC 케이블'에 55kV의 직류전압을 적용하는 테스트를 수행한 결과, 통과 기준을 충족하였으며, 약 40년의 사용 수명도 보장
- 다만 해당 결과는 단순히 12/20kV 교류케이블을 55kV 직류 시스템에 활용이 가능함을 의미하며, 케이블 구조 개선 등 최적화에 대한 추가연구가 필요함을 강조

■ TB 496 시험장면 ■



■ (PP^{*} 절연 케이블) 교류 시스템용 PP 지중 케이블의 직류 시스템 활용 가능 여부 검증

* 폴리프로필렌, 기존 절연체 XLPE(Cross Linked Poly Ethylene)에 비해 분자 간 결합력이 높아 절연체의 극성 변화에 대한 내성이 강함

- 현행 케이블의 주요 절연매질 'XLPE'는 전하트랩으로 인한 절연성능 저하 문제에 취약하고, 분자 간 결합력이 높은 PP 절연매질이 DC용 케이블에 유리하다는 연구 결과
- 일부 국내 케이블 제조사는 자사에서 생산한 AC용 PP 케이블을 직류 전용 케이블로 활용하기 위해 자체 DC Test bed를 활용하여 절연 성능 장기 검증 중

IV. DC 기술의 비용편익 분석 연구 사례

- 직류 배전분야는 변환기의 운영 효율, DC 계통의 보호 알고리즘 등 기술적인 측면의 연구가 주를 이루며 BTM 계통의 직류화에 따른 편익에 대한 연구 실적이 일부 존재
- 직류기술 도입에 따라 발생하는 편익의 공평한 배분 방법, 증가하는 투자비의 부담 주체 등 직류 배전망 도입 관련한 사회적 논의, 법·제도 연구는 부족한 실정

1. DC 기반의 MG 도입 타당성 연구*

* (자료) State of Art of Low and Medium Voltage DC MG ('21)
An Overview of Direct Current Distribution System Architectures & Benefits('19)

- 본 연구에서는 총 6가지의 AC&DC MG 모델을 설정하고 각 모델의 구축비용, 안전성 등 유불리 사항을 비교하였으며, 분석 결과 PV, ESS 등 직류성 분산e 자원이 설치된 MG는 직류 배전망을 활용하는 것이 경제성 및 종합효율 측면에서 유리함을 제시

■ (결과 요약) DC 기반 MG의 편익 ■

| 비교항목 | 결과 |
|------|--|
| 투자비 | ◦ 직류성 분산e가 설치된 MG는 각 단위 설비에 개별 설치되던 변환장치를 통합할 수 있어 MG 사업자의 설비 비용을 절감할 수 있으나, 유틸리티의 투자비가 증가 |
| E 효율 | ◦ 계통운영 시나리오 및 부하수준에 따라 유리한 계통방식이 달라지며 PV와 ESS가 연계된 계통의 경우 DC 계통이 2~3%가량 유리 |
| 기술비용 | ◦ 직류계통은 기술검토의 난이도가 높지 않아 보호협조 메커니즘, 계통 해석·운영 시스템 개발 등 엔지니어링 비용이 낮음 |
| 전기품질 | ◦ 전력전자소자 기반의 전력 변환장치는 저전압, 순간정전 등 계통장애 상황에서 고속대응이 가능하여 신속한 규정전압 회복 가능 |

※ DC 기반 MG의 안전성, 설비고장 및 운전 비용 측면의 편익은 AC 기반과 유사한 것으로 결론

- (결론) DC 전력자원 연계용량이 높은 MG의 경우 직류화로 인한 편익은 높지만, 설비 투자비용이 증가할 수 있으며 기준·제도에 대한 보완 필요

- (효율 극대화) DC 기반 MG의 효율 극대화를 위해 PV 연계형 ESS 의무화, 유틸리티 ESS 도입 등 운영기술 및 기준·제도에 대한 검토가 요구됨
- (투자비 보전) DC 기반 MG는 연계용 설비 간소화로 재생e 사업자의 설비 비용 절감을 유도할 수 있고 재생e의 추가 연계를 가능하게 하여, 계통의 직류화를 위해 증가하는 유틸리티 투자비*의 회수방안에 대한 제도적 지원책 마련이 중요함

* 계통의 직류를 위해 변압기와 유사한 변환기를 추가 설치해야 하며, 이에 대한 유지보수 비용도 증가

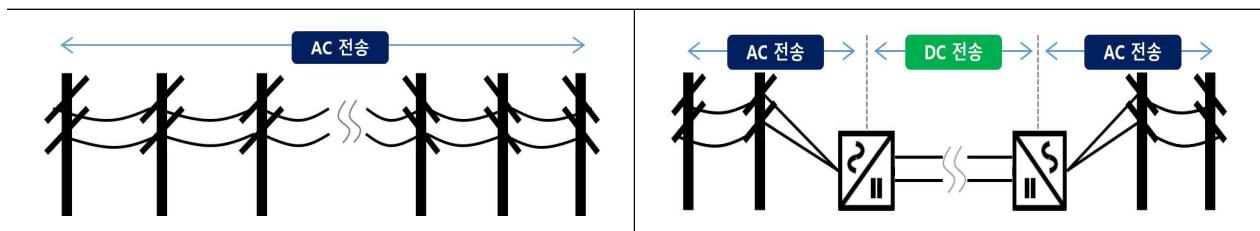
- (운영 시스템) MG 계통의 능동적인 전력흐름 제어, DC 고장 대응 시나리오 등에 관한 추가적인 연구와 동시에 DC 기반 MG의 운영 시나리오 최적화를 위한 운영시스템 개발이 필요함

2. 「MVDC 시스템의 전송손실 + 변환손실」 VS 「MVAC 시스템의 전송손실」 비교연구*

* (자료) Break-even distance for MVDC electricity networks according to power loss criteria ('21)

- MVDC 전송 시스템은 전송손실이 낮아 장거리 전송에 유리하지만, AC→DC 변환 손실이 발생하므로, 해당 연구에서는 손실 측면에서 MVAC와 MVDC 시스템을 비교

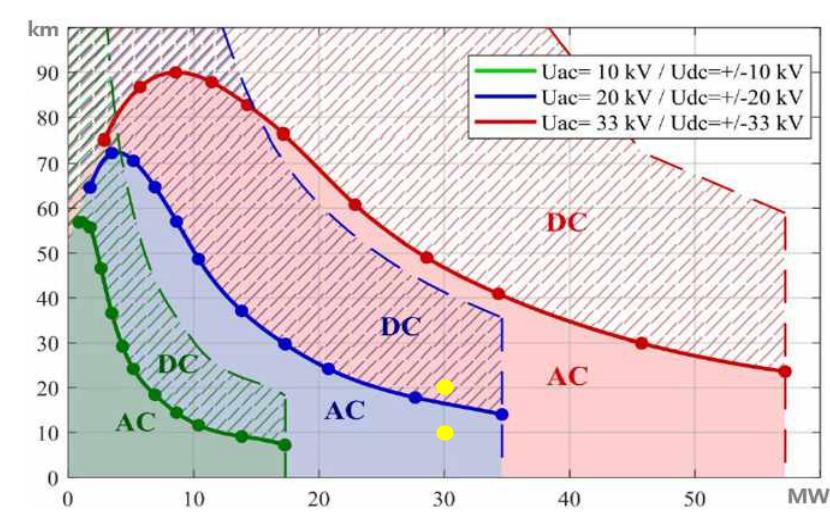
| PtP AC & DC 공급 계통 개념도 |



* (적용전압) AC 계통이 10, 20, 30kV이면 DC 계통은 ± 10 , ± 20 , ± 30 kV로 설정하였으며, 일반적으로 100kV 이상의 HV 시스템에서는 50km 거리를 기준으로 '초과' 시 HVDC가, '이하' 시 HVAC가 손실 측면에서 유리한 것으로 알려져 있음

- 전송 시스템의 적용전압에 비례해서 전송가능 거리가 늘어나는 효과는 있으나 전송 용량이 커질수록 전류가 증가하여 전송손실 및 (DC 계통의 경우) 전력변환기 손실이 동시에 커져 전송용량이 제한됨
- (결론) 아래 그래프에서 빛금 영역의 경우, 특정용량을 전송할 때 해당 전압기준 DC 전송 시스템의 손실이 동일 전압 레벨의 AC 전송 시스템보다 낮다는 것을 의미
 - 예를 들어, 30MW 부하공급을 위한 20kV급 MVDC 시스템의 경우 공급거리 10km는 AC 시스템이, 20km는 DC 시스템이 손실 측면에서 유리함을 의미

| 분석 결과 |



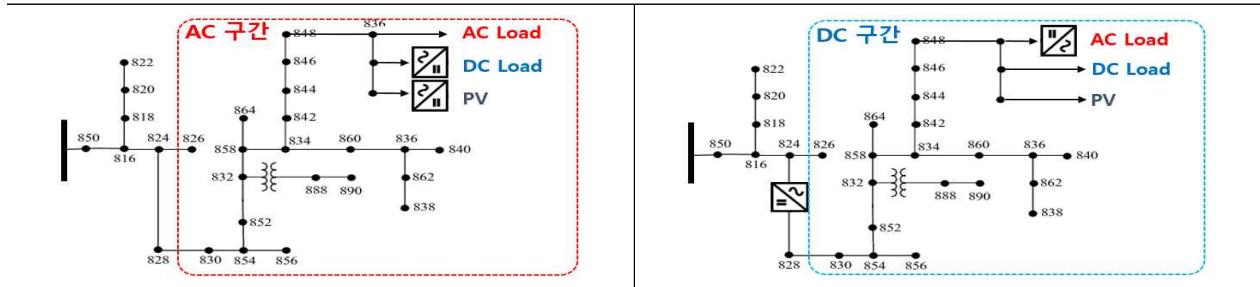
3. 태양광 발전소 계통연계를 위한 'AC모델'과 'DC Hybrid 모델'의 투자비용 비교연구*

* (자료) AC and DC Hybrid Distribution Grids with Solar Integration : Architecture, Stabilization and Cost Assessment(DOE, '20)

- 본 연구에서는 IEEE 34 계통 모델*을 활용하여 일부 구간을 직류구간으로 운영할 때 계통 안정도, 설비구축 및 O&M을 위한 비용을 비교 분석

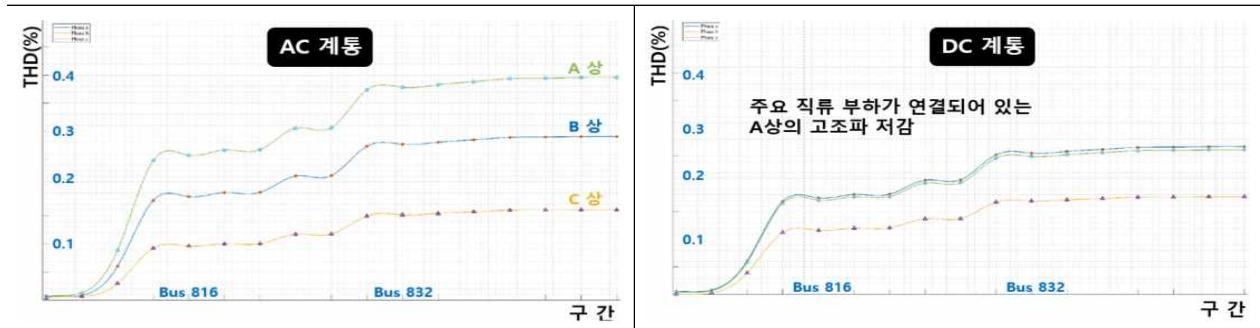
* IEEE 34 모델, 배전망 전력흐름 해석 등 특성 연구를 위해 사용되는 배전계통 해석모델

■ IEEE 34 기반의 AC&DC 계통 해석모델 설정 ■



- (결론 ①) 위 두 가지 계통구성 방법의 구축비용 및 O&M 비용을 비교했을 때
 - ① 구축 비용의 경우 PV 연계 용량이 계통 수용가능 용량의 35% 미만일 경우는 AC 계통이, 이상일 경우 DC Hybrid 계통이 유리하며 ② 두 계통의 O&M 비용은 태양광 연계 수준에 비례하여 증가하나 유사한 수준임
- (결론 ②) 두 계통의 안정성, 전기 품질 및 손실 수준을 비교했을 때는 ① PV 연계용량이 커질수록 AC 계통의 고조파 레벨이 높아지는 반면, DC 계통은 고조파에 대한 통합 관리가 가능해 안정적인 계통운영이 가능하며, ② PV 연계용량 및 직류부하 규모가 작은 경우, 변환손실 또한 낮아 AC 계통이 유리하나, 수용 가능 용량의 약 50%를 초과할 경우 AC↔DC 변환손실이 증가하여 손실 측면에서 DC 계통이 유리함

■ 구간별 고조파(THD*) 비교 ■



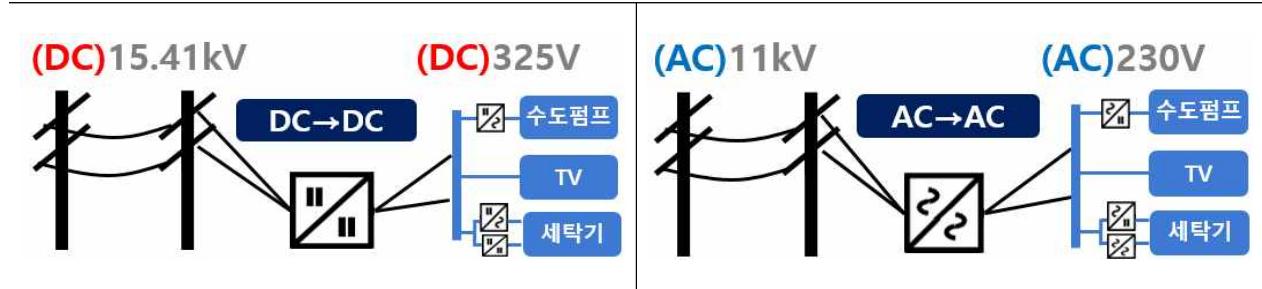
* Total Harmonic Distortion, 전압 파형을 일그러뜨리며 AC↔DC 간 변환 시 많이 발생

4. 주택용 설비 및 내부계통의 직류화 타당성 연구*

* (자료) AC vs. DC Distribution Efficiency : Are We on the Right Path ('21),

Efficiency comparison of AC and DC distribution system at residential level with load characterization and daily load variation ('18)

| AC & DC 공급계통 개념도 |



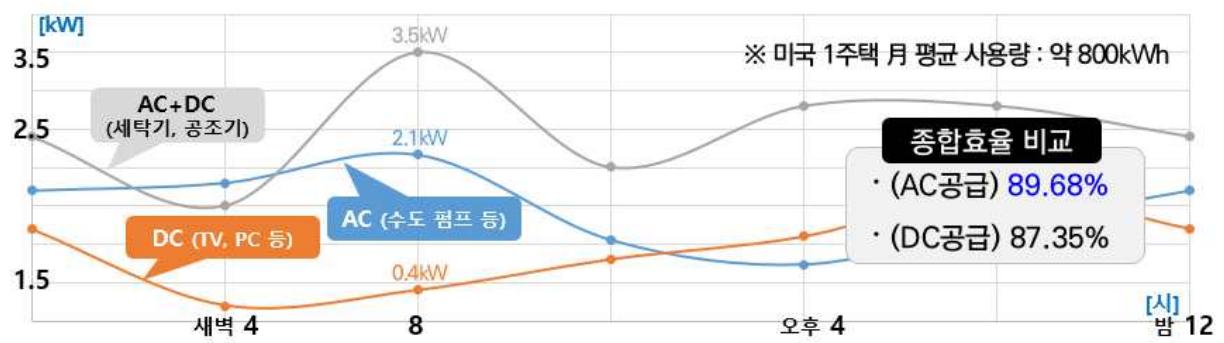
- 본 연구에서는 다양한 주택용 부하의 전기적 특성* 및 하루 동안의 사용패턴을 분석하고 공급하는 전기의 종류(AC 또는 DC)에 따른 종합효율을 비교하여 유리한 공급 방식을 검토

* 50개의 주택용 건물에 설치된 부하의 AC와 DC 사용 비중, 내장 AC↔DC 변환효율 특성 등

- 부하의 종류 및 전기 소비패턴 동일, 공급전기에 따라 전기제품이 내장하고 있는 컨버터 또는 인버터의 교체를 가정하였으며 AC와 DC를 혼용*해서 사용할 때 각각 필요한 전기에 맞게 변환기 교체

* 세탁기 모터 및 물 가열부는 AC 전기, 그 외 제어회로 등은 DC 전기 기반으로 구동

| 시간대별·주택 전기 종류별 사용량 패턴 및 종합효율 |



- (결론) AC 공급 시나리오가 유리하게 나타났으며, 주요 원인으로 ①오랜 기간 사용되어 온 AC→DC 변환기의 높은 변환효율, ②DC→DC 변환기의 낮은 변압효율이 지목됨

- 다만, 향후 BLDC* 등을 활용하여 DC 공급모델의 종합효율 개선 유도가 가능함을 강조

* Brushless DC, 직류전기 구동 모터

V. 국내 적용 시 시사점

1. (모델설정) 국내 배전계통에 적합한 비용효율적인 직류 배전망 기술 모델 검토

- 직류 배전망은 높은 초기 투자비용을 수반하기 때문에 기존의 교류 기술로는 해결이 어렵거나 교류기술을 적용했을 때의 비용이 직류기술보다 높을 것으로 예상되는 경우 직류기술의 부분적인 적용 여부 검토
- 국내 계통 인프라와 최대한 호환될 수 있는 직류 배전계통 적용모델을 설정하고, 해당 모델 구현을 위한 맞춤형 직류기술 개발로 기술 난개발을 예방
- 나아가, 제조사에서는 앞에서 검토된 배전망 문제 해소를 위한 표준형 MVDC 솔루션 패키지 상품 개발 등으로 직류기술의 현장 활용성 강화

2. (기술기준) HVDC 시스템과는 달리 배전급 직류기술과 관련한 국제 표준이 부재하여, 배전망에 원활한 직류기술 활용을 위해 KEC* 등 관련 기술기준 표준화 필요

* Korea Electro-Technical Code, 한국 전기설비 규정으로 직류기술의 공용 배전망 적용을 위해 이와 관련한 설비 지침, 안전기준 등 제·개정이 필요

- 직류 시스템 관련 시공 지침, 안전기준 등이 부재한 경우 실제로 계통 적용에 제약이 발생할 수 있어 ‘직류 배전망 설계기준’에 대한 선제적 연구 필요
- 더불어, 고가의 직류 변환기 등 핵심 직류 설비의 제조 비용을 낮추고 현장 수용성 개선을 위해 산학연 공동으로 추가적인 연구 수행

3. (법·제도) 직류 배전망 도입은 다양한 편익을 발생시키지만, 높은 투자비용을 수반하므로, 발생한 비용과 편익에 대한 공정한 배분을 위해 이와 관련한 법·제도 마련이 필요

- 직류 배전망 도입시 기존 설비의 전송용량을 증대시켜 재생e 자원의 추가접속을 가능하게 하고 설비 운영의 효율을 개선하는 등 다양한 영역에서 편익이 발생함
- 다만, 높은 투자비를 수반하기 때문에 직류 설비에 대한 투자 비용의 부담주체 선정, 직류전용 요금제 시행 등 직류 배전망 도입에 따른 계통 편익의 공평한 분배를 위한 법·제도 검토 필요

【참고문헌】

- ▶ Argonne, AC&DC Hybrid D-Grids with Solar Integration : Architecture, Stabilization and Cost Assessment, 2020.12
- ▶ Aalborg Univ, Efficiency comparison of alternating current (AC) and direct current (DC) distribution system at residential level with load characterization and daily load variation, 2017
- ▶ ANGLE-DC, 2015 Electricity Network Innovation Competition, Ofgem, [Online]. Available: <https://www.ofgem.gov.uk/ofgem-publications/97841/anglesubmission-pdf>
- ▶ CIGRE, Medium Voltage DC Distribution Systems, 2022
- ▶ Current OS DC Microgrids N470 road application, 2022
- ▶ CIRED, International Conference on Electricity Distribution, 2021.7
- ▶ CAU, MULTIFUNCTIONAL AND UNIVERSAL CHARGING STATION, 2022.12
- ▶ DOE, MVDC Use Case, 2023.9
- ▶ E.ON, DC Distribution Grids - Backbone for the Energy Transition, 2022.12
- ▶ EPFL, Break-even Distance for MVDC Electricity Networks According to Power Loss Criteria, 2021
- ▶ FIDES Guide 2009 Edition, "A reliability methodology for electronic systems," 2010
- ▶ HYPERRIDE, Hybrid Provision of Energy based on Reliability and Resiliency via Integration of DC Equipment, 2024.9
- ▶ Longjian Piao, Electricity markets for DC distribution systems: Locational pricing trumps wholesale pricing, 2020.9
- ▶ MDPI, AC vs. DC Distribution Efficiency: Are We on the Right Path?, 2021.5
- ▶ MDPI, An Overview of Direct Current Distribution System Architectures & Benefits, 2018.9
- ▶ MDPI, State of Art of Low and Medium Voltage DC MG, 2021
- ▶ National Grid, Electric Highways : Accelerating and Optimizing Fast-Charging Deployment for Carbon-Free Transportation, 2022.11
- ▶ RWTH&E.ON, Welcome to the German-Korean Symposium on Power Electronics, 2022.06
- ▶ RWTH&SNU, MVDC-Workshop Planning of MVDC Grids, 2022.6
- ▶ SP Energy, LV ENGINE : A Smarter Electricity Network, 2018
- ▶ Schneider, Standardisation in DC installations, what is done in The Netherlands?, 2015

작성자 : 한전 경영연구원 허 훈 차장

☀ Research Brief I: 협력사의 ESG 경영 기반 조성을 위한 사례 연구

I. 검토 배경

■ 최근 ESG 경영이 전 세계적으로 확산되면서, 기업의 공급망관리가 중대한 이슈로 부상

- EU는 기업이 공급망에서 발생할 수 있는 ESG의 문제를 예방하고, 해결할 책임을 지도록 강제한 공급망 실사 지침*을 도입함

* 실사 항목은 인권, 환경, 기후변화로 구성되며, '27년 역내 기업부터 적용

- 최근 ESG 공시 의무화*에 따라 공급망 내 협력사까지 ESG를 준수하도록 공시범위 확대

* 유럽의 ESG 공시기준인 ESRS(European Sustainability Reporting Standard)는 가치사슬의 탄소 배출량(Scope3) 및 인권 준수 등을 공시하도록 요구

■ 국내도 공급망관리 관련 법제화 및 규정들이 논의되기 시작하면서, 기업의 공급망관리 규제가 더욱 강화될 전망

- 21대 국회에서 공급망 실사에 대한 법안이 발의되었고, 조달청은 조달 기업의 ESG 평가를 위한 기본지침('22년)을 마련함

■ 기업은 국내외 공급망 규제 대응을 위해, 공급망 전반에 ESG를 고려한 조달 정책 수립 필요

- 공급망에 대한 ESG 요구가 권고에서 의무로 강화됨에 따라 적시에 대응하지 못하는 공급사는 경쟁력을 상실하고, 점진적으로 산업 내 공급망 위기를 초래할 수 있음

■ ESG 관점에서 국내·외 기업들의 공급망관리 우수사례를 살펴보고, 공급망 협력사의 ESG 경영 기반 조성을 위한 시사점 발굴

- ESG 관점에서 공급망관리가 견고한 해외 유틸리티와 국내 대기업을 선정*

* 선정기업(6개) : Enel(이탈리아), Iberdrola(스페인), PG&E(미국), 삼성, 포스코, SK이노베이션(이상 한국)

II. 주요 기업의 공급망관리 사례

1. 목표 및 지표

■ (목표 설정) 공급망관리의 목표를 기업의 비전과 목표에 연계하거나 혹은 친환경 공급망 구축을 공급망관리 목표로 설정

| 주요 사례기업들의 공급망관리 목표 |

| 구분 | 기업 | 내용 |
|-------------------------|---|---|
| 기업의 비전과 목표에 연계 |  (Enel) | ▪ 조달 절차의 전반에 탈탄소화, 순환 경제, 인권, 윤리적 구매를 고려한 지속 가능한 공급망 구축 |
| |  (Samsung) | ▪ 공정, 개방, 상생의 기업이념에 따라 협력사의 사업 경쟁력뿐만 아니라 노동인권·환경·안전보건의 역량향상을 지원하여, 책임감 있고 환경적인 공급망 구축 |
| |  (Posco) | ▪ 공급망 전반에 걸쳐 ESG 리스크를 관리하여 친환경 철강 생태계를 조성 |
| |  (SK Innovation) | ▪ 지속 가능한 공급망 및 안정적 조달의 목표를 달성을 위해 공급망관리 로드맵을 설정 |
| 탄소 중립 목표 |  (Iberdrola) | ▪ '2040년 탄소중립 목표 달성을 위해 공급망의 지속가능성 강화 목표 수립 |
| |  (PG&E) | ▪ '2040년 탄소중립 목표 달성을 위해 공급사의 탄소 감축목표를 수립하여 관리 |

※ 출처 : 각 회사의 공급망 포털 및 지속가능경영보고서

■ (지표 설정) 목표 이행을 위한 다양한 지표를 설정하고, 지표에 대한 이행 상황을 공개

-  (Enel) 탄소발자국을 공개한 협력사의 비율*, 환경과 사회적 인증이 필요한 공급 계약의 비율 등을 지표로 설정하여, 연도별 성과를 공개

* '25년 탄소발자국을 공개한 공급사의 비율을 68%로 설정('23년 달성 비율 66%)

-  (Iberdrola) '25년까지 자체 ESG 평가를 통해 적격 협력사의 비율을 85%로 설정 * '22년 기준 77% 달성

-  (PG&E) '30년까지 모든 협력사가 탄소중립을 달성하거나 협력사의 50% 이상이 과학 기반 감축목표 이니셔티브(SBTi)*에 가입하도록 로드맵을 수립함

* Science Based Targets initiative는 기업·단체 등의 탄소 감축에 대해 과학적 방법에 따른 측정과 계획실행을 요구하는 이니셔티브를 의미함

■ (목표 공유) 자사의 공급망관리 목표를 다양한 방식으로 홍보 및 공유 시행

-  (Enel) 공급망 포털을 통해 공급망의 미션·가치·조달 선언문 등의 자료를 공개하여, 자사의 공급망 정책을 누구나 쉽게 확인 가능

-  (Iberdrola) 공급망관리 목표가 포함된 행동강령의 안내서를 제작하고, 캠페인을 전개함

- **SAMSUNG(삼성전자)** 협성회^{*}의 정기회의(분기 1회)를 통해 공급망 목표 공유
 - * 삼성전자의 주요 협력사들이 참여하는 협의체
- **SKinnovation(SK이노베이션)** 반기별 주요 협력사의 CEO를 대상으로 세미나를 개최하고, 기업의 공급망 ESG 목표 및 전략에 대해 공유

2. ESG 평가

- (사전등록) 적격업체 등록을 위한 사전평가를 시행하여 공급망 전반에 발생할 수 있는 ESG 리스크를 최소화하도록 노력
- **Enel(Enel)** 기술평가를 통과한 협력사 중에서 안전·보건, 환경, 인권에 대한 평가 시행

| Enel의 등록업체 평가 시 ESG 평가지표 |

| 항목 | 내용 |
|-------|--|
| 안전·보건 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 안전 및 보건에 대한 자체 규정을 만들어 인증 시행 |
| 환경 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 조달 품목군에 따라 1~3등급이 부여되며, 환경위험의 노출 우려가 큰 품목의 경우 추가 조치* 필요 <p>* ISO 14001(환경 국제 표준) 추가 인증 또는 현장 실사 필요</p> |
| 인권 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 근로자 인권, 강제 노동 및 아동, 공정한 근무 조건, 지역사회와의 관계 등에 대하여 평가 |

※ 출처 : Enel(2024), Sustainability Report

- **Iberdrola** 계약 금액과 사업상 중요도에 따라 협력사의 위험 수준을 3가지(초급, 중급, 상급)로 구분하여 평가 방식을 차등
 - 계약 금액이 일정 수준(€700,000) 미만이거나 협력사의 하도급 업체의 경우 중급 단계 평가까지만 진행
 - 사업상 중요도가 높은 품목을 조달하거나, 계약 금액이 일정 수준(€700,000)을 초과할 경우 상급으로 분류하여 ESG 평가를 시행함

| Iberdrola의 적격업체 평가 방법 |

| 구분 | 비대면 검사 | 현장 방문 및 실사 | ESG 평가 |
|----|--------|------------|--------|
| 초급 | ● | | |
| 중급 | ● | | |
| 상급 | | ● | ● |

※ 출처 : Iberdrola(2024), Procurement and Supplier Management Activity Report

- **SAMSUNG(삼성전자)** 영역별 사내 전문가들이 참여하는 현장 실사를 통해 신규업체를 선정하며, 평가지표에 책임 있는 비즈니스 연합(RBA)*의 기준을 적용

* Responsible Business Alliance, 글로벌 공급망에서 사회적 책임을 전담하는 산업 연합체

- 6개의 평가지표* 중 ESG 평가 항목으로 환경·안전, 노동·인권, 부패 방지가 포함

* ①구매, ②품질, ③환경·안전, ④노동·인권, ⑤부패 방지, ⑥재무 현황

| 삼성전자의 신규업체 평가지표 중 ESG 관련 지표 |

| 구분 | 세부 내용 |
|-------|--|
| 환경·안전 | <ul style="list-style-type: none"> RBA 표준을 활용해 26개 조항에 대해 현장점검 (9대 필수 항목 : 소화설비, 위험물 및 폐기물, 오·폐수 시설 등) |
| 노동·인권 | <ul style="list-style-type: none"> RBA 표준을 활용해 19개 조항에 대해 현장점검 (8대 필수 항목 : 강제 근로 금지, 아동 근로 금지, 근로 시간 규정 준수 등) |
| 부패 방지 | <ul style="list-style-type: none"> 국내 청탁금지법과 해외 부패방지법 등 국제기준 부패행위 금지에 대한 법적 규제 및 관리를 위한 협력사 부패 관련 리스크 사전점검 평가 |

※ 출처 : 삼성전자 홈페이지

- (사후평가) 협력업체 등록 또는 조달 계약 체결 이후에도 협력사의 ESG를 평가하여 안정적인 공급망 유지를 위해 노력

- **enel(Enel)** 계약기간 동안 협력사의 성과를 주기적으로 평가하기 위해 협력사 성과 관리 프로그램(이하 SPM*)을 운영 중 * Supplier Performance Management

- 6개의 평가 항목*이 존재하며, 조달 품목군에 따라 가중치를 차등하여 100점 만점으로 평가

* ①안전, ②환경, ③품질, ④정시성, ⑤인권 및 윤리 ⑥혁신성 및 협업

| Enel의 평가지표 중 ESG 관련 정의 및 지표 |

| 구분 | 세부 내용 |
|-------|--|
| 안전 | (정의) 작업 현장에서 발생하는 사고를 줄이고, 안전한 작업환경을 유지 (지표) 건강, 안전사고의 수, 작업 중 개인 보호 장비 미사용 등 |
| 환경 | (정의) 환경에 미치는 부정적 영향을 최소화하고, 지속 가능한 운영을 촉진 (지표) 환경 사고의 수와 유형, 명시된 규정에 따른 온실가스 배출 한도 준수 등 |
| 인권·윤리 | (정의) 협력사가 인권을 존중하고 윤리적인 운영을 유지 (지표) 노동자의 기본권 보장, 평등 대우와 차별 금지 등 |

※ 출처 : Enel의 공급망 포털

-  (Iberdrola) 자체 개발한 ESG 프로그램인 『360° 지속가능성 평가』를 통해 협력사의 ESG 실행 내용을 주기적으로 평가함
 - 대부분류는 ESG이며, 총 43개 측정 항목에 가중치를 부여하여 100점 만점으로 평가
 - Iberdrola의 ESG 평가는 공급망의 다양한 분야*에 활용되고 있음
 - * 협력사의 계약 안정성 평가 이외에 공급망 목표 수립, 관리 등에 이용됨
 - 협력사의 구매조달 지원을 위한 플랫폼인 『GoSupply』에 업데이트한 정보 기반으로 평가

■ Iberdrola의 ESG 관련 평가지표 ■

| 구분 | 주요 평가지표 |
|---------|--|
| 환경(E) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 기업에서 설정한 환경정책, 온실가스 산정 체계 및 인증, 온실가스 감축 조치 및 목표, 수질 관리 조치, 순환 경제를 채택하려는 노력, 생물다양성을 취하려는 조치 등 |
| 사회(S) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 인권과 관련된 인증 여부, 지속가능경영에 관련된 인증 여부, 아동노동 및 강제노동 여부, 평등과 다양성을 증진하려는 정책, 공정한 채용 및 적절한 보상, 조직이 소재한 지역사회를 지원하기 위한 사회활동 등 |
| 지배구조(G) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 기업의 사회적 책임 정책, 자체 윤리강령이나 행동강령 및 준법 시스템 보유, 이해관계자와의 소통 채널 구축, 기업이 당국으로부터 제재를 받은 이력 등 |

※ 출처 : Iberdrola, Procurement and Supplier Management Activity Report, 2024.

-  (PG&E) 협력사는 연 1회 성과평가를 받게 되며, PG&E는 평가 결과를 기반으로 환경 관련 교육 및 시정조치 대상업체를 선정함
 - PG&E는 상위 협력사(top-tier)*대상으로 지속 가능한 전력공급망 협회(SSCA)가 시행하는 환경평가에 참여하도록 권고
 - * 중요한 제품이나 서비스를 제공하는 상위 100위 협력사

■ SUSTAINABLE SUPPLY CHAIN ALLIANCE 지속 가능한 전력공급망 협회(SSCA) ■

- ▶ SSCA는 전력 유ти리티와 협력사들이 함께 협력하여 유ти리티 공급망 및 협력사 네트워크에서 지속 가능한 관행을 증진하는 조직임
- ▶ 협력사의 지속가능성과 관련된 성과를 벤치마킹하고 모범사례를 공유함
- ▶ 100개 이상의 회원으로 구성되어 있으며, 이들 회원은 공급망에 \$1,200억 달러를 투자함

※ 출처 : 지속 가능한 전력공급망 협회 홈페이지(<https://www.thessca.org/>)

- PG&E는 매년 9월 협력사의 환경 성과평가 시행을 위해 SSCA에 의뢰하고, 평가 결과를 바탕으로 환경 관련 교육 및 시정조치 대상업체를 선정

■ SSCA의 평가 항목 및 점수체계 ■

| 구분 | 평가 항목 | 점수(평가 기준) |
|--------------------------|--|---------------------------------|
| 환경 경영시스템(EMS) 구축 및 추적 | 환경 경영 시스템(EMS)의 구축 여부 | 2점 (EMS 구축 필수, 5가지 모두 충족) |
| | 온실가스가 측정되고 추적되는지 여부 | |
| | 에너지 소비가 측정되고 추적되는지 여부 | |
| | 물 사용이 측정되고 추적되는지 여부 | |
| | 무해한 폐기물이 측정되고 추적되는지 여부 | |
| | 환경 관련 성과가 측정되고 추적되는지 여부 | |
| 자발적 감축목표 설정 | 온실가스 감축 목표 | 2점 (3개 이상 충족) |
| | 에너지 소비 감축목표 | |
| | 물 소비 감축목표 | |
| | 무해한 폐기물 감축목표 | |
| 환경 개선 결과에 대한 공시 | 환경 개선 결과를 외부에 공개했는지 여부 ex) 웹사이트 게시, 지속가능경영보고서 또는 사업보고서에 공개했는지 여부 등 | 1점 |

※ 출처 : PG&E, PG&E Supplier Environmental Management Guidance and Metrics

- **POSCO(포스코)** 협력사의 지속가능성을 평가하기 위해 SRM*을 시행하며, 거래실적이 있는 모든 협력사가 평가 대상임

* Supplier Relationship Management, 기업이 협력사와의 관계를 체계적으로 관리하는 방식

- 평가 주기는 분기 및 연간이며, 평가 항목은 신용, 납기, 가격, 품질, ESG로 구성*
- * 평가점수는 100점 만점이며, ESG는 30점으로 평가
- ESG는 환경, 사회, 지배구조에 대한 각각의 세부 평가 항목이 존재함

■ 포스코의 ESG 관련 주요 평가 항목 ■

| 구분 | 평가지표 |
|------|---|
| 환경 | ▪ 친환경 인증 건수 (인증마크, ISO 14001등), 환경 보건 안전 인증 유무(KOSHA 18001 or ISO 45001), 친환경 구매 실적 등 |
| 사회 | ▪ 사회 봉사활동, 환경 및 안전, 공정거래, 부패 방지 등 교육실적, 대금 지급 일수, 1~2차 동반성장 협약체결 등 |
| 지배구조 | ▪ 부패 방지 활동, 포스코 윙크 참여율(상생 결제), BS과제 참여(성과 공유제), POSCO형 공정거래 시스템 인증 등급 등 |

※ 출처 : 포스코 홀딩스, 지속가능경영보고서, 2024

- SKinnovation(SK이노베이션) 1년 이내 발주 실적이 있는 협력사를 대상으로 연 1회 정기 평가 시행
 - 글로벌 기관들의 운영 사례, 국내 법·제도 및 기준을 기반으로 중점 관리가 필요한 항목을 지표*로 구성
 - * 22개의 중분류, 66개의 세부 지표로 구성됨
 - 객관성 확보를 위해 평가는 외부기관에 의뢰하는 것을 원칙으로 함

■ SK이노베이션의 ESG 평가 항목 ■

| 영역 | 대분류 | 중분류 |
|------|------------|--------------------------|
| 환경 | 환경경영 | 환경경영 관리체계 |
| | 친환경 기회 | 환경 친화 제품 |
| | 기후변화 대응 | 온실가스 배출, 에너지 소비 |
| | 오염방지 및 폐기물 | 폐기물 관리, 유해 물질 관리, 대기오염물질 |
| 사회 | 자연자본 | 생물다양성, 원부자재, 수자원 보호 |
| | 인적자본 | 정보보호, 인권, 안전보건, 고용, 근로환경 |
| | 제품·고객 | 분쟁 광물 |
| | 협력사 | 공정거래 |
| 지배구조 | 지역사회 | 사회공헌 |
| | 기업 지배구조 | 정보 공시, 관리시스템, 감사 |
| | 기업 행동 | 윤리경영 |

※ 출처 : SK이노베이션, 지속가능경영보고서, 2024

3. 지원 및 협업

■ (교육) 협력사의 역량 강화를 위해 산업적 특성을 고려한 교육프로그램을 운영함

- Enel(Enel) 별도의 교육 홈페이지를 운영하고, 전력산업 특화 교육프로그램을 운영
 - 배전 분야 전문가 양성 프로그램을 통해 4,000명이 교육을 받았고, 이 중 약 2,600명이 Enel 협력업체에 고용됨
 - 탄소발자국 측정 및 기록(350개사 참여), 태양광 발전소 건설 및 해체(3,200명 참여) 등의 교육 진행
 - Iberdrola(Iberdrola) 협력사가 글로벌 수준의 지속 가능 역량을 보유할 수 있도록 실무 교육 확대
 - UN 글로벌 콤팩트 프로그램을 무료로 이수할 기회*를 부여하고 조직 내 지속가능 발전목표(SDGs) 설정할 수 있도록 교육을 진행 * '23년 4월 UN 글로벌 콤팩트에 가입
 - 세부적으로 지속가능 발전목표, UN 글로벌 콤팩트의 4개 모듈, 비재무 공시, 온실가스 산정 방식 등의 교육프로그램을 운영함*
- * 38개국 2,000개 이상의 중소기업이 교육에 참여

- **SAMSUNG(삼성전자)** 협력사의 ESG 리스크를 최소화하기 위한 ESG 실무 중심의 교육 프로그램 운영
 - 탄소 관리, 공급망 실사, 에너지 경영·환경경영·안전보건 경영시스템 구축, 지속가능 경영보고서 작성 등의 교육과정을 운영
- (역량개선 지원) 다양한 유형의 역량개선을 지원하여, 공급망의 지속가능성을 강화
- **Enel(에네랄)** 협력사의 경쟁력 강화를 위해 인증제도 획득 지원과 자문 서비스 제공
 - 협력사의 다양한 ESG 인증^{*}에 대한 지원 및 컨설팅 프로그램을 운영
 - * 탄소 배출량 인증, 환경제품 선언(EPD), 환경 전 과정 평가(LCA) 등
- **Iberdrola(이베르드로라)** 협력사의 탈탄소를 위한 맞춤형 지원 프로그램을 운영
 - Iberdrola가 자체 개발한 프로그램인 Net zero Emission^{*}을 통해 에너지 소비에 따른 맞춤형 컨설팅을 제공함(1년간 무료 제공)
 - * 탄소 배출량 계산, 에너지 진단, 탈탄소 계획 수립 등
- **SAMSUNG(삼성전자)** 협력사와의 협업을 통해 효율적으로 탄소 배출량을 감축할 수 있도록 지원하고, 전담 조직을 구성하여 전문 컨설팅을 제공함
 - 협력사의 에너지 사용 효율화, 재생에너지 사용 확대, 탄소 저감 기술을 지원함
 - 협력사의 CDP(탄소 정보공개프로젝트)^{*} 참여를 독려하고 지원을 확대함
 - * Carbon Disclosure Project, 참여한 기업 대상으로 기후 위기에 대한 정보를 공개하도록 요구하고, 이를 기반으로 기업들의 지속가능성을 평가하는 비영리단체
- **POSCO(포스코)** 컨설팅 추진 및 2차 협력사들의 ESG 역량 강화를 위한 프로그램 운영
 - 사내 전문가가 참여하여 협력사 대상 공급망 ESG 개선을 위한 컨설팅^{*}을 추진함
 - * 작업환경 개선, 안전 위해 요소 제거, 에너지 절감/탄소배출 저감 등
 - 포스코로부터 지원받은 내용을 2차 협력기업에 전파하도록 1~2차 협력기업 간 공정거래협약체결^{*}을 권고 * 협약체결 사항을 검토하여 향후 1차 공급사의 성과평가 시 반영
- **SKinnovation(SK이노베이션)** ESG 평가점수가 낮은 기업들에 대해 컨설팅 및 설비 지원
 - 전년도 평가 결과를 바탕으로 협력사별 맞춤형 ESG 교육 및 컨설팅을 시행
 - 공급망 내 환경 분야 리스크를 개선하기 위해 ‘탄소저감 설비도입 지원사업’을 시행*
 - * 온실가스 및 에너지 저감효과 검증, 사업장 안전 환경 개선 효과 분석 등 외부 전문기관의 분석을 거쳐 지원 대상 기업을 선정함

4. 피드백

- (평가 결과의 피드백) 자체 성과평가에 기반한 명확한 등급 체계를 구축하고, 평가 결과에 따른 대응 방안을 마련함

-  (Enel) 자체 개발한 SRM 평가점수에 따라 협력사를 5단계*로 구분하고, 단계별로 취하는 조치 결정

* 계약종료(50점 이하), 벌점 부여(60점 이하), 조사 및 지원(80점 이하), 계약 지속(90점 이하), 수상 자격 부여(90점 이상)

-  (Iberdrola) 계약유지를 위해 평가점수의 총점과 E, S, G 항목에 대한 과락 기준 운영
 - 평가점수가 최소 평균 50점 이상이어야 하고, E·S·G의 항목이 각각 40점, 30점, 30점 이상 유지
 - 만약, 협력사가 해당 수준을 만족하지 못하면, 계약 강제 종료 또는 향후 입찰 불가*

* 전체 협력사 중 91.5%가 50점 이상을 득점('23년 기준)

-  (포스코) SRM의 평가 결과에 따라 등급별 차별화된 공급망관리 운영
 - 평가점수에 따라 Excellent(90점 이상), Good(80점 이상), Average(60점 이상), Weak(55점 이상), Poor(55점 미만) 등 5개 등급으로 구분
 - 우수 협력사(Excellent, 90점 이상)는 우선협상권을 부여하거나 계약 관련 보증금 납부를 면제하고, Poor 이하(55점 미만)의 협력사는 '개선 활동 계획'을 제출하도록 요구*

* 개선이 미흡한 공급사의 경우 최소 3개월부터 1년까지 입찰 참가를 제한함

-  (SK이노베이션) 평가 결과는 7등급 체계로 구분되며, 등급별 지원체계를 마련

■ 평가결과의 등급 및 지원내용 ■

| 등급 | 구분 | 평가등급별 지원 내용 |
|----|---------|--|
| 1 | Leader | ▪ 인증 및 포상, Benefit 제공 ex) 차년도 계약·하자 이행 보증 적용 100% 면제 |
| 2 | Average | 취약 분야 맞춤 컨설팅 지원 |
| 3 | Laggard | ▪ 개선 이행 계획 수립 및 이행 활동 컨설팅 지원 ex) ESG 리스크 심화 평가 결과 2년 연속 'Laggard' 등급시 3개월간 입찰 참가 제한, 정기 평가 결과 중 SHE(안전, 보건, 환경) 분야 평가에서 4급(70점 미만) 2회 누적시 거래정지 1년 |
| 4 | | |
| 5 | | |
| 6 | | |
| 7 | | |

※ 출처 : SK이노베이션, 지속가능경영보고서, 2024

■ (인센티브 및 제재) 성과평가를 바탕으로 협력사에 인센티브와 제재를 부여

-  (Enel) 6개월마다 평가위원회에서 평가를 시행하고, 우수업체에 인센티브 부여
 - 지난 12개월을 기준으로 안전 및 환경 사고가 없어야 하고, SRM 지표 중 품질·안전·적시성 지표가 90점 이상이어야 함
 - 보증금 면제, 결제 대금의 선지급, 표창 수상, 입찰 자격 자동 갱신 등의 혜택을 부여
 - 계약 중 심각한 계약 위반 사고가 발생하거나 SRM의 점수가 낮을 때(50점 이하) 계약종료

■ 장·단기 성과평가 및 조치 사항 ■

| 구 분 | 단기 평가 | 장기 평가 |
|-------|--|------------|
| 평가 기간 | 직전 달 및 과거 3개월 평균 비교 | 지난 12개월 평균 |
| 조치 사항 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 점수가 낮은 업체 : 계약종료, 블랙리스트 배치, 조달 정지(패널티 부여) ▪ 점수가 높은 업체 : 별도 비용 없이 계약 갱신, 추가 물품 조달(인센티브 부여) | |

※ 출처 : Enel의 공급망 포털

-  (Iberdrola) 자체 ESG 평가 결과를 연계하여 계약의 지속성을 평가하고, 사업상 중요한 협력사에 개선 방안을 제시함
 - 잠재적으로 중요하다고 분류된 업체를 평가하고*, 개선해야 하는 조치와 기한을 설정
 - * '23년 기준 95개 기업 대상으로 평가
 - 협력사의 온실가스 배출량 데이터를 매년 확인하여, 감축 수준이 부족한 경우 개선 조치 제안*
 - * 약 900개사가 개선 제안을 받았고, 이 중 53%가 개선됨(나머지 업체는 개선 중)
 - 매년 우수한 성과를 보인 업체를 선정해 포상하고, 구매계약 등에 인센티브 제공
 - * '23년 기준 혁신, 평등, 지속가능성, 일자리 창출에 기여한 6개 기업을 시상

III. 결론 및 시사점

■ (목표 및 지표) 안정적인 공급망 구축을 위해 목표 및 지표를 설정하고, 협력사에 목표를 공유하여 ESG 리스크를 사전에 관리

- ESG 공시나 공급망 실사지침 시행 등이 새롭게 제도화됨에 따라 현안을 반영한 목표 수립이 중요하며, 설정한 목표의 이행력을 제고하기 위해 명확하고 간결한 지표를 설정하고, 매년 이행 상황을 공개해야 함
- 공급망 내 모든 협력사가 설정한 목표를 이해하고 달성을 할 수 있는 목표 공유 방안이 필요

- (평가) 구매 프로세스 전반에 걸쳐 ESG 평가를 진행하되 조달 품목 및 계약 금액에 따라 평가 방식 차등이 필요하며, 다양한 방식의 ESG 평가시스템을 갖출 필요가 있음
 - 조달하는 품목의 특성이나 계약 규모에 따라 평가 방식을 차등 적용하여 공급망 리스크를 최소화할 방안을 마련해야 함
 - 협력사가 다른 검증기관에 ESG 평가 및 인증을 받는 경우, ESG 평가를 면제하거나 가산점을 부여하는 등의 평가 체계 다변화가 필요
- (지원 및 협업) 원활한 공급망관리를 위해 실무적으로 도움이 될 수 있는 교육과 컨설팅을 중심으로 협력사 지원 정책 도입이 필요
 - 협력사들이 실무에 필요한 지원 수요를 파악하고, 실무에 즉각적으로 적용할 수 있는 도구, 지침, 프로그램을 지원
 - 외부 전문기관과 협업*을 통해 협력사 대상 ESG 역량 강화 프로그램의 전문성 제고
* Enel은 협력사 대상으로 에너지 컨설팅기관(CESI 등)과 협업하여 컨설팅 제공
- (피드백) 평가 결과에 따른 명확한 평가 등급을 부여하고, 이에 따른 상벌 기준 마련
 - 협력사의 ESG 평가 결과에 따라 인센티브 및 패널티 제도를 확대 운영하고, 불합리한 경우가 발생하지 않도록 명확한 평가 기준 체계 수립
 - 계약 규모, 기자재 종류, 사업적 중요도 등의 조달 특성을 고려하여 평가 결과에 따른 세부적인 피드백 방안 마련도 필요

【참고문헌】

<문헌>

- ▶ 삼성전자, 2023 지속가능경영보고서, 2024.
- ▶ 포스코, 2023 POSCO 지속가능경영보고서, 2024.
- ▶ SK이노베이션, 2023 지속가능경영보고서, 2024.
- ▶ Enel, 2023 Sustainability report, 2024.
- ▶ Iberdrola, Procurement and Supplier Management activity report 2023-2024, 2024.
- ▶ PG&E, PG&E Supplier Environmental Management Guidance and Metrics, 2022.

<홈페이지>

- ▶ 삼성전자 (<https://www.samsung.com/sec/sustainability/people/supply-chain/>).
- ▶ 포스코 (https://sustainability.posco.co.kr/S91/S91F10/kor/UI-PK_W020.do).
- ▶ SK이노베이션 (<https://www.skinnovation.com/sustainability/esg-risk-management>).
- ▶ Enel (<https://globalprocurement.enel.com/>)
- ▶ Iberdrola (<https://www.iberdrola.com/suppliers>)
- ▶ PG&E (<https://www.pge.com/about/doing-business-with-pge/purchase-programs/supply-chain-responsibility>)
- ▶ 유틸리티 지속가능공급망협회 (<https://www.thessca.org/>)

작성자 : 한전 경영연구원 김영식 선임연구원

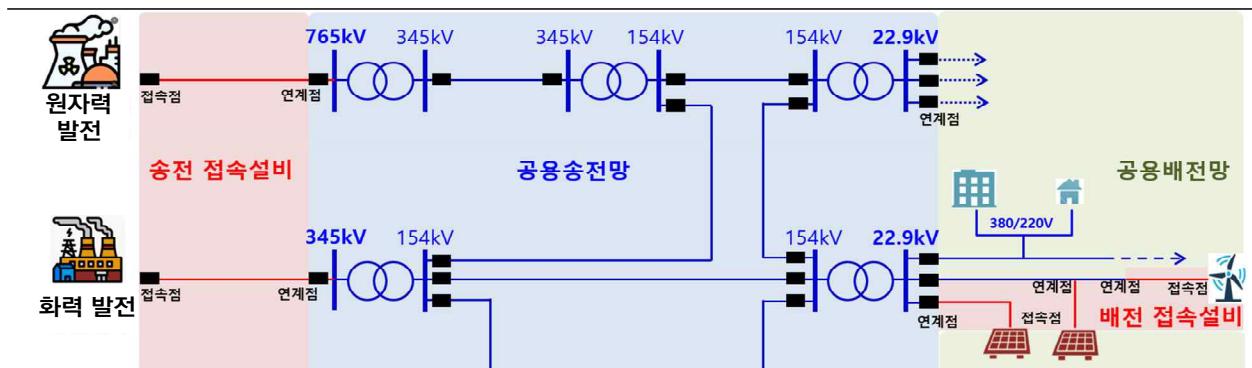
阳光 Research Brief II: 주요국의 공용송전망과 접속설비 분류범위 및 비용부담 주체 관련 조사

I. 발전소의 송전망 접속 및 비용부담 방식 개요

- (발전소 접속 필요설비) 신설 발전소를 전력계통에 연계하기 위해서는 ① 공용 전력망에 대한 교체, 보강 및 ② 발전소와 공용망을 연결하는 접속설비의 신설 등이 필요함

① 공용망 : 다수의 일반고객이 공용하는 전기설비로 변전소, 송전선로 등을 포함

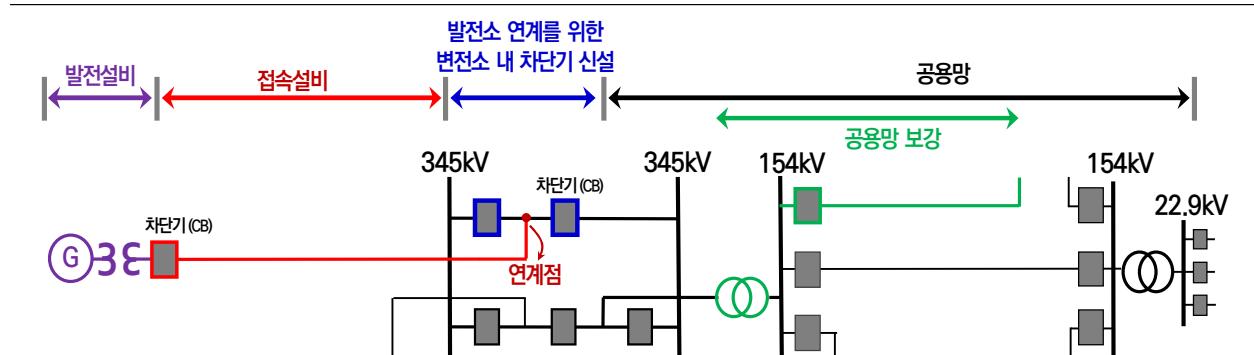
| 국내의 송전접속설비, 공용송전망, 공용배전망 구분 |



② 접속설비 : 발전소를 공용망까지 연결하는 설비로 전선로와 발전측 차단기 등을 포함

- 발전설비와 공용망을 연계하는 경우, 발전설비 보호목적의 발전소 측 차단기*와 변전설비 보호목적의 변전소 측 차단기를 설치함 (154kV의 경우 양측에 1개씩 총 2개)
- * 차단기는 전력개폐장치의 일종으로 전력 송수전, 절체, 정지 등을 계획적으로 수행하거나 전력계통에 어떠한 이상이 발생하였을 때 계통을 신속히 차단하는 역할을 함
- 일반적으로 발전소 측 차단기는 접속설비로 분류되나, 변전소 측 차단기는 전세계적으로 통일된 분류 기준이 없어 접속설비/공용망 판단에 모호함이 존재

| 발전소 접속으로 인한 전력망 보강 구분 |



- [비용부담 방식] 발전소 접속 필요설비 중 접속설비는 대부분 국가에서 발전사가 비용을 부담하고 있음. 그러나 공용망의 경우 국가별 기준에 따라 비용부담 주체가 다름

- 비용부담 방식은 공용망 보강 및 신설 비용을 발전사업자에게 부과하는지 여부에 따라 Shallow, Semi-Shallow, Deep 등으로 구분 가능함
 - (Shallow) 발전사가 접속설비 비용만을 부담하는 방식, 비용산정이 단순해 발전사의 비용예측이 용이하나 공용망 보강의 비용유발자와 부담주체가 달라 공용망 비용의 사회적 최적화 관점의 입지신호가 약해 교차보조가 발생함
 - (Semi-Shallow) Shallow, Deep의 중간방식으로 발전사가 접속설비 및 공용망 보강 비용의 일부를 부담
 - (Deep) 발전사가 접속설비와 공용망 보강 비용을 부담하는 방식, 비용유발자와 부담 주체가 동일해 입지신호를 제공하나, 비용산정 과정이 복잡한 단점 보유

| 접속비용 부담방식 구분(발전사업자 관점) |



| 발전설비 접속 시 공용송전망 보강·신설 비용의 발전사업자 부담여부 |

| 국가 | 비용부담 방식 | 공용망 비용의 발전사업자 부담여부 |
|-----|--------------|--|
| 미국 | Deep | O (발전사의 수혜비율에 따라 차등부과) |
| 일본 | Deep | O (154kV 이하 설비에 발전사의 수혜비율에 따라 차등부과) |
| 영국 | Semi-Shallow | △ (발전사의 접속전압과 동일 전압인 공용망에 한해 부과) |
| 프랑스 | Shallow | X |
| 한국 | Shallow | X |

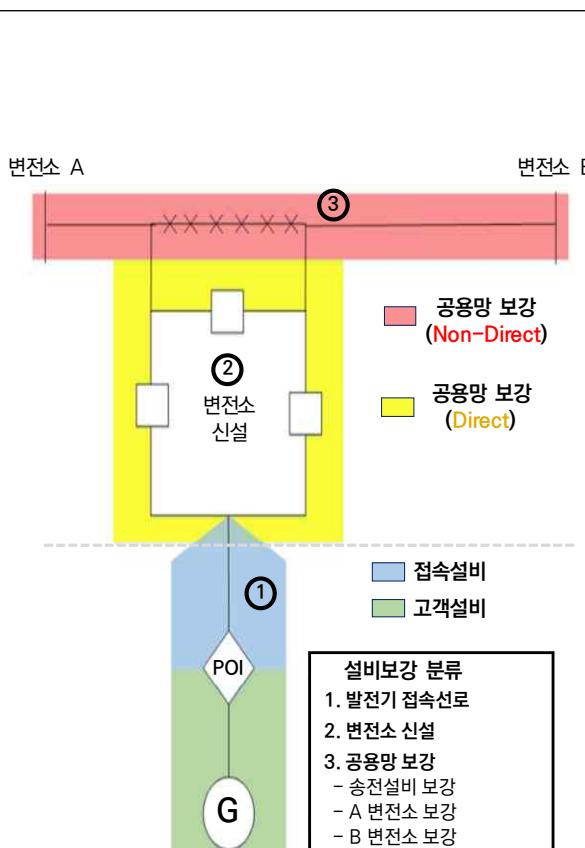
II. 해외 사례 검토 - 접속설비/공용망의 범위 및 비용부담 주체 등

1. 미국 PJM

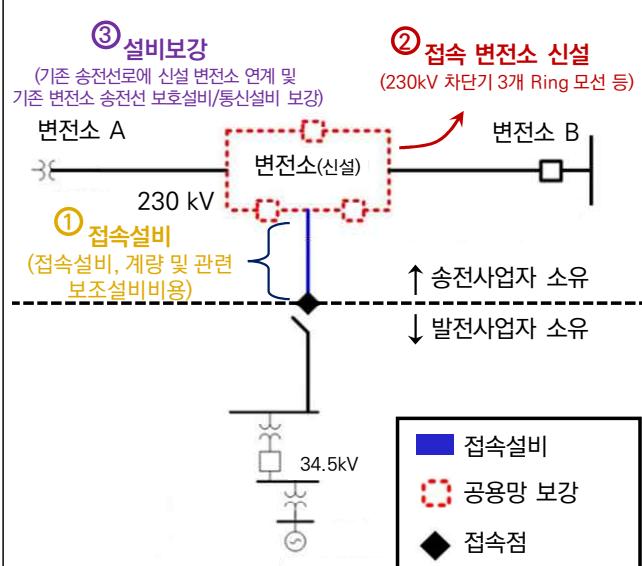
■ 접속설비/공용망 분류

- (접속설비) 발전측 차단기부터 송전사업자 변전소측 차단기 전까지를 접속설비(Attachment Facilities)로 정의 (변전소측 차단기는 공용망에 포함됨)①
- (공용망) 송전사업자 변전소측 차단기를 포함한 변전소, 송전선로 등을 공용망(Network Upgrade)으로 분류하며, Direct / Non-Direct Network로 세분
 - (Direct Network) 발전소와 전선로로 직접 연계되는 변전소, 차단기 신설 등②
 - (Non-Direct Network) 발전소와 직접 연계되는 변전소 뒷단의 송전선로와 변전소 내 차단기 등에 대한 교체 및 보강 등③

| PJM의 접속설비/공용망 분류 기준 |



| (예시) PJM 관할 발전사업 시 접속비용 |



| 접속 시 설비비용 분류 | 비용(추정, \$) |
|-----------------------------|------------|
| ① 접속설비 (전선로 등) | 550,000 |
| ② Direct Network (변전소 신설) | 5,600,000 |
| ③ Non-Direct Network (설비보강) | 1,650,000 |
| 합계 | 7,800,000 |

■ 비용부담 주체 (발전사 - 접속설비, 공용망 일부(변전소 측 차단기 포함) / 송전사 - 공용망)

- (비용부담 방식) 발전사에 공용망 비용도 부과하는 Deep 방식 적용 중
- (발전사업자 부담) 접속설비 비용과 Direct Network 비용은 발전사업자가 전액 부담하며, Non-Direct Network 비용은 발전사업자가 일부 부담
 - (Non-Direct Network 비용) 독립계통운영자가 계통영향평가를 통해 Non-Direct Network 보강 여부를 검토하고, 발전사 수혜 비율*에 따라 비용을 결정
 - * 최대부하/경부하 시점의 전력설비 1기 고장(N-1)에 따른 정전 여부와 단락 사고시 차단기의 과부하 여부 등을 검토하여 공용망 보강이 필요한지 여부를 검토

| (예시) PJM 관할 Trowbridge 변전소의 발전설비 접속 |

■ (예시) 美 Dominion 지역 발전소(484MW)의 230kV 변전소(Trowbridge) 연계

- PJM이 계통영향평가를 통해 송전선로 재구축, 회선 분리, 노후화 선로 교체, 변전소 북측지역 확장 등 발전소 연계에 필요한 Non-Direct Network 보강 요소를 검토
- PJM이 발전사의 수혜 비율에 따라 송전선로 재구축(\$39백만), 회선 분리(\$4백만), 변전소 북측지역 확장(\$17백만) 등 발전사가 부담할 비용 산정

Trowbridge 230kV 变电站

Diagram illustrating the connection of the Trowbridge 230kV Substation to the grid. The substation is connected via Line #2126 from Mackeys and Line #2034 to Cashie. It has two main busbars: 230/115kV and 34.5kV. The 34.5kV bus is connected to a 484MW generator. Various connection points are highlighted with numbers 1 and 2, corresponding to service fees and network costs.

Legend:

- ★ 연계점 (Connection Point)
- 계통 연계설비 (Network Connection Equipment)
- 선로, 모선 (Circuit, Transmission Line)
- 부착설비 (Attachment Equipment)
- ↑↓ 변압기 (Transformer)
- 차단기 (Breaker)
- (◎) 계량기 (Meter)

| 구분 | 비용(\$, 추정) |
|--------------------------------|-------------------|
| ① 접속설비 (전선로 등) | 3,956,516 |
| ② Direct Network (차단기 신설) | 4,000,000 |
| ③ Non-Direct Network (설비 보강 등) | 61,792,297 |
| 합계 | 69,748,813 |

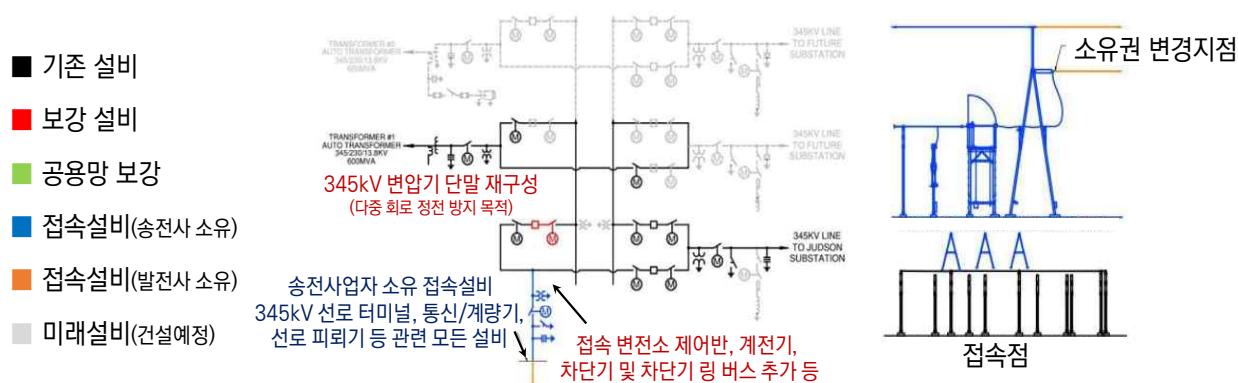
| 구분 | 비용(\$, 추정) |
|--|-------------------|
| ③ Non-Direct Network | 비용(\$, 추정) |
| 인근 변전소(Everetts-Greenville) 사이 송전선로 재구축 | 39,923,299 |
| Duke Energy 社 노후화 230kV 타워 재구축 | 0 (기여도 없음) |
| Duke Energy 社 1개 회선 재구축 및 단말장비 설치 | 0 (기여도 없음) |
| 인근 타워의 회선공유 시 N-1 신뢰도 기준 위반 발생으로 회선분리 시행 | 4,737,743 |
| 변전소 재구성(230/115kV) | 17,131,255 |
| 합계 | 61,792,297 |

2. 미국 SPP

■ 접속설비/공용망 분류

- (접속설비) 발전측 차단기부터 송전사업자 변전소측 차단기 전까지를 접속설비(Interconnection Facilities)로 분류 (변전소측 차단기는 공용망으로 분류)①
 - 송전사업자 변전소측 차단기 연계지점에 설치되어 있는 통신설비, 계량기, 피뢰기, 계전기 등은 접속설비로 분류
- (공용망) 송전사업자 변전소측 차단기를 포함한 송전선로, 변전소 등을 공용망(Network Upgrade)으로 정의하며, Non-Shared/Shared로 세분 (PJM과 유사)
 - (Non-Shared) 발전소와 전선로로 직접 연계되는 변전소에서 발생하는 공용망 보강으로, 변전소 내 설비구조 변경, 차단기 신설 등을 포함②
 - (Shared) 발전소 연계로 보강이 요구되는 인근지역의 송·변전 설비들로, 독립계통운영자가 계통영향평가를 통해 보강이 필요한 설비들을 선정③

■ (예시) SPP 관할 발전소 연계시 접속비용 산정 ■



| 구분 | 총 비용 | 발전사의 부담 비율 | 비용(\$, 추정) |
|----------------------|-----------|------------|------------|
| ① 접속설비 | 933,099 | | 933,099 |
| ② Non-Shared Network | 1,587,602 | 100% | 1,587,602 |
| | 3,221,700 | | 3,221,700 |
| ③ Shared Network | 0 | 0% | 0 |
| 합계 | | - | 5,742,401 |

■ 비용부담 주체 (발전사 - 접속설비, 공용망 일부(변전소 측 차단기 포함) / 송전사 - 공용망)

- (비용부담 방식) 발전사에 공용망 비용도 부과하는 Deep 방식 적용 중

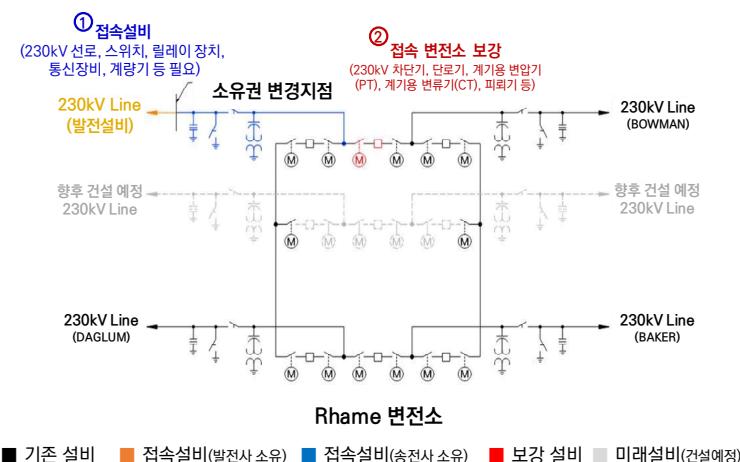
○ (발전사업자 부담) 접속설비 비용과 Non-Shared Network 비용은 발전사업자가 전액 부담하며, Shared Network 비용은 발전사업자가 일부 부담

- (Shared Network) 독립계통운영자는 계통영향평가를 통해 발전소 연계로 인해 발생하는 Shared Network 비용을 산정하고 발전사 수혜 비율에 따라 비용 결정
- SPP 관할구역 내 발전소 연계로 인근 MISO 관할구역 내 전력설비 보강이 필요한 경우, SPP와 MISO가 합동으로 계통영향을 검토하여 발전사에게 비용을 부과

■ (예시) SPP 관할 발전사업 시행 시 접속비용(공용망 보강 포함) 부담 ■

■ (예시) ND Bowman County 지역 발전소(200MW)의 230kV 변전소(Rhame) 연계

- 발전소 연계 시 하계 최대부하 시점에 신뢰도기준 위반이 발생하여 타지역 변전소의 변압기 교체가 필요, 발전사 수혜비율(34.59%)을 고려해 \$3,480,221의 비용 부과
- SPP 구역 내 발전소 연계 시, MISO 구역 내 변전소 전압 상향을 위한 STATCOM 설치가 필요하여 발전사에 해당 비용을 부과(SPP-MISO 합동 접속비용 검토를 통해 비용 도출)



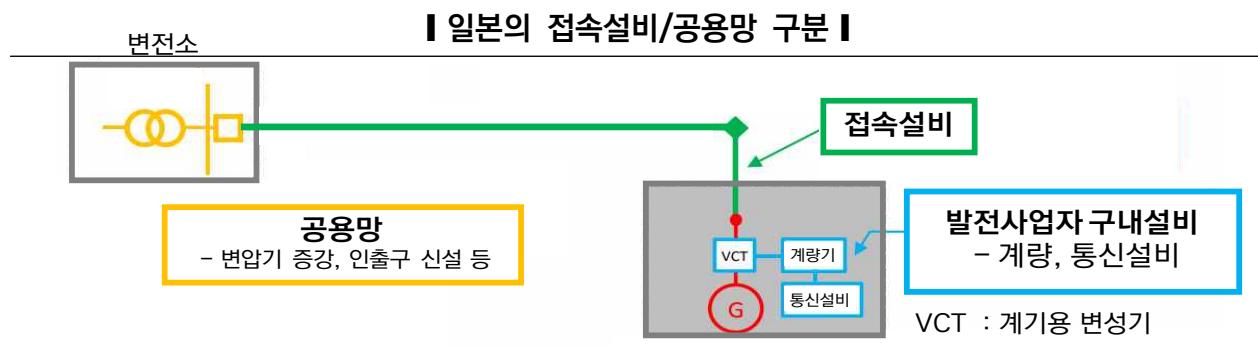
■ MISO 지역 변전소 보강비용 상세*

| 구 분 | 비용(천\$) |
|-----------------------|-----------------|
| 비상장치(피뢰기, 절연체, 도체 등) | 250 |
| 변전소 철구, 모선 등 | 500 |
| STATCOM | 27,000 |
| 스위치 / 차단기 | 120 / 1,100 |
| 계측 변압기 / 송전선 비용 | 200 / 2,500 |
| 제어, 계량, 통신장비 | 500 |
| 토목 공사(기초, 배선, 접지, 구내) | 4,000 |
| 컨설턴트 설계 인건비 | 1,000 |
| 계약자 인건비 및 시운전 비용 | 5,650 |
| 회사 인건비 / 운송비 / 금융비용 | 250 / 5 / 2,500 |
| 잡비 / 관리비 | 500 / 3,925 |
| 합계 | 50,000 |

| 구분 | 전체 비용 | 고객부담 비율 | 고객부담 비용(\$, 추정) | |
|--|---|------------|-----------------|-----------|
| ① 접속설비 | 1,674,744 | 100% | 1,674,744 | |
| ② Non-Shared Network | 1,122,522 | | 1,122,522 | |
| ③ Shared Network (Broadland 345/230kV 변압기 교체) | 10,061,320 | 34.59% | 3,480,211 | |
| MISO 지역 345kV 변전소 설비보강 | Montezuma 변전소 345kV 100 MVAR 커패시터 뱅크1개 | 6,000,000 | 15.4% | 924,731 |
| | ※ Blackhawk 변전소 345kV 100 MVAR STATCOM 1개 설치 | 50,000,000 | 17.6% | 8,800,000 |
| 합계 | | - | 16,002,208 | |

■ 접속설비/공용망 분류

- (접속설비) 발전측 차단기부터 송전사업자 변전소측 차단기 전까지를 접속설비(전원선, 電源線)로 분류
- (공용망) 송전사업자 변전소측 차단기를 포함한 변전소, 송전망을 공용망으로 분류



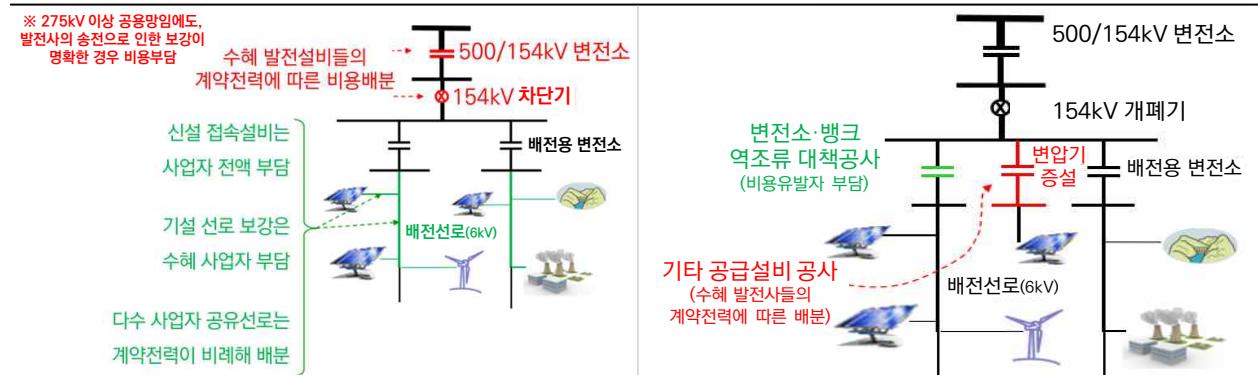
■ 비용부담 주체 (발전사 - 접속설비, 공용망 일부(변전소 측 차단기 포함) / 송전사 - 공용망)

- (비용부담 방식) 발전사에 공용망 비용도 부과하는 Deep 방식 적용 중
- (발전사업자 부담) 접속설비 비용과 발전소 연계로 인한 변전소측 차단기 보강 비용, 수혜 범위가 명확한 공용망 보강비용 등을 부담 (공용망 비용은 송전사업자가 산정)
 - (접속설비) 전선로, 계량기 등은 모두 발전사가 부담하며, 발전소 구내 지역에 설치된 기설 통신설비 및 수요 계량기의 경우만 송전사업자와 50%로 분담함
 - (공용망) 발전소 연계로 275kV 미만 공용망에 신설·보강이 필요한 경우, 발전사업자에게 특정부담*이라는 명목으로 공용망 비용을 일부 부과 중**

* (특정부담) 송전사업자가 발전사의 공용망 보강에 대한 수혜 수준을 산정해 비용 부과

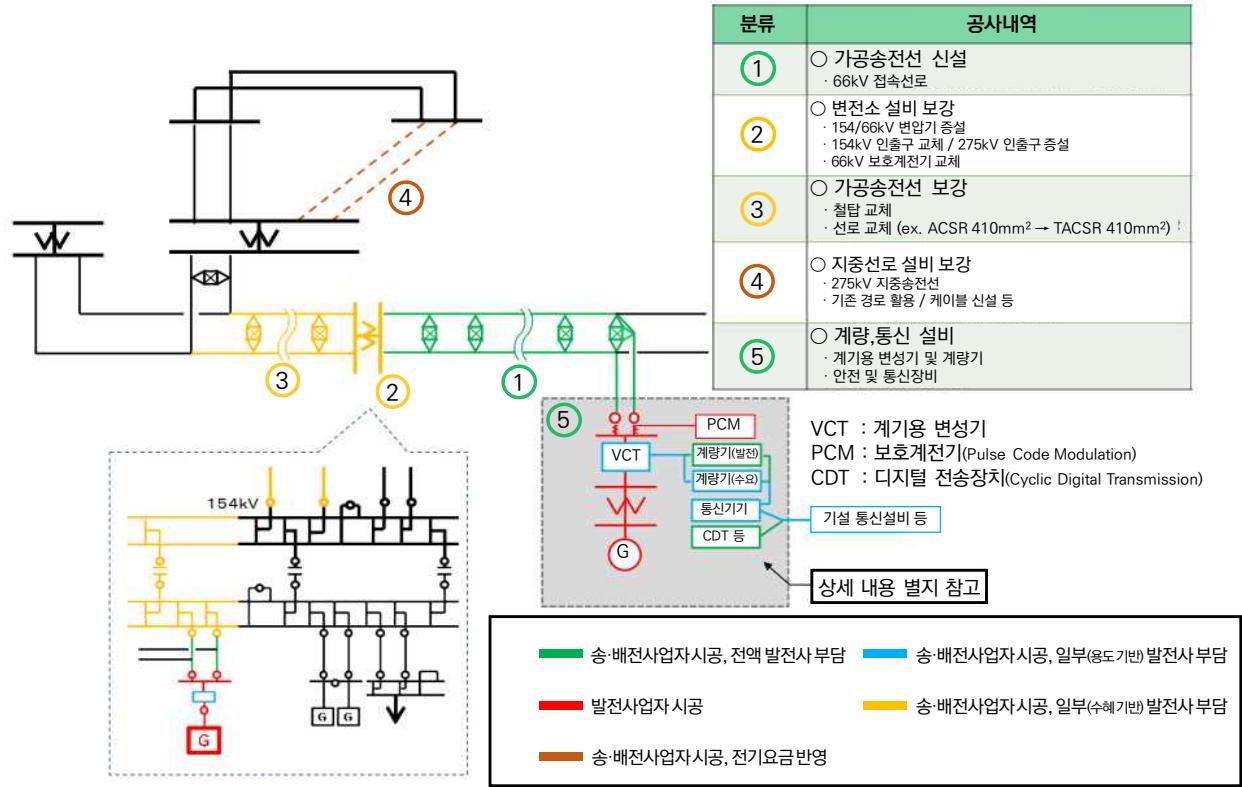
** 단, 275kV 이상 공용망임에도 특정 전원의 송전을 위해서 보강되는 경우 발전사에 비용을 부과함

| (예시) 발전설비 공동접속 시 비용 분담 |



- (송전사업자 부담) 275kV 이상의 초고압 기간망과 같이 불특정 다수에게 수혜가 발생하는 전력망의 경우, 송전사업자가 공용망 보강 비용을 부담
 - (예외 조항) 발전소 연계시 송전사업자가 부담하는 비용이 4.1만엔/kW을 초과하는 경우, 발전사업자에게 이를 초과하는 금액을 부과할 수 있도록 허용

I (예시) 66kV 발전설비 접속설비 시 설비보강이 필요한 경우 비용부담 주체 I



4. 영국

■ 접속설비/공용망 분류

- (접속설비) 발전사 차단기부터 송전사업자 변전소측 차단기 전까지를 접속설비로 분류
- (공용망) 송전사업자 변전소측 차단기를 포함한 변전소, 송전망을 공용망으로 분류

■ 비용부담 주체 (발전사 - 접속설비, 공용망 일부(변전소 측 차단기 포함) / 송전사 - 공용망)

- (비용부담 방식) 발전사가 접속비용 및 공용망 비용 일부를 부담하는 Semi-Shallow 방식
- (발전사업자 부담) 발전사가 접속설비 비용(①)은 전액 부담함. 발전소와 전선로로 직접 연계되는 변전소 내 설비 비용의 일부(②)를 발전사업자가 부담
 - (공용망 비용) 발전소와 직접 연계된 변전소 내 발전소와 동일 전압의 설비에 신설 및 보강, 교체 등이 필요한 경우, 해당 비용을 발전사가 부담

■ (예시) 영국 발전사업자의 연계전압별 설비보강 비용 부담 ■

■ (예시) 85MW 발전소의 132kV 연계 요청에 따른 공용망 보강비용 부담 사례

- (접속설비) 발전소 접속을 위한 132kV 지중 케이블 200m 신설 (£400,000)
 - (공용망) 발전소 연계 시 송전사업자 차단기(9140MVA)의 교체 필요 ⇒ 신설 발전소의 고장전류 기여 용량(85MVA)을 고려해 차단기 교체비용의 일부(2.8%) 부과 (£280,000)
- * 발전소가 33kV 연계시 상위전압인 132kV 설비에 대한 보강비용은 부담하지 않음



■ (좌측) 132kV 발전기 연계 시 접속비용 예시 ■

| 구분 | 비용(단위 : £) | 부담비율(%) | 고객부담 비용(단위 : £) |
|--------------------------|------------|----------------------------|-----------------|
| ① 신설 (200m 132kV 지중 케이블) | 400,000 | 100 | 400,000 |
| ② 변전소 내 132kV 설비 보강 | 10,000,000 | $3 \times (85/9140) = 2.8$ | 280,000 |
| 합계 | | | 680,000 |

■ (우측) 33kV 발전기 연계 시 접속비용 예시 ■

| 구분 | 비용(단위 : £) | 부담비율(%) | 고객부담 비용(단위 : £) |
|-----------------------------|------------|--------------------|-----------------|
| ① 신설 (33kV 케이블, 고객 변전소 차단기) | 75,000 | 100 | 75,000 |
| ② 변전소 내 132kV 설비 보강 | 10,000,000 | 0 (상위전압 보강 시 부담 X) | 0 |
| 합계 | | | 75,000 |

5. 프랑스

■ 접속설비/공용망 분류

- (접속설비) 다른 해외 국가들과는 다르게 발전측 차단기부터 송전사업자 변전소측 차단기까지를 접속설비(Raccordement)로 분류

- 발전설비 접속 법령*에 접속설비가 차단기를 2개 포함하도록 규정 ⇒ 발전측 차단기 뿐만 아니라 송전사업자 변전소측 차단기도 접속설비로 분류

* (2020. 6. 9 발효) 발전설비의 공용송전망 접속을 위한 설계 및 운영기술 규정에 관한 법령 제11조

- (공용망) 송전사업자 변전소측 차단기 이후를 공용망으로 분류

| 공용망과 접속설비의 분류범위 개요도 |



■ 비용부담 주체 (발전사 - 접속설비(변전소 측 차단기 포함) / 송전사 - 공용망)

- (비용부담 방식) 발전사가 공용망 비용을 부담하지 않는 Shallow 방식 적용
- (발전사업자 부담) 발전사가 접속설비 비용 부담 (변전소측 차단기 비용도 발전사가 부담)
 - 발전소 연계를 위해 변전소 신설이 필요한 경우, 변전소 설비용량 대비 발전소 설비용량에 비례해 비용을 부과한다고 명시되어 있으나, 상세 내용은 비공개*
- * 프랑스 에너지법 L. 342-17, L. 342-18 규정에서 접속설비-공용망의 비용부담 주체를 정의하고 있으나, 실제 EDF(발전)-RTE(송전)간 비용분담 상세내용은 공개되지 않음
- 프랑스는 Shallow 방식임에도 발전소와 전선으로 연계되는 변전소의 비용을 부과하는 것으로 보이나, 상세 내용이 비공개 됨에 따라 사실 확인이 어려움
- 재생e 보급 확산을 위해 재생e에 한해 신설 변전소 비용 등을 부과하지 않음

| 발전사업자 접속비용 부담 범위 |

| 재생e(EnR) | 일반 발전설비(non-EnR) |
|--|-------------------------|
| 접속설비 / 접속용 변전소 신설 (기준설비의 보강 비용은 면제) | 접속설비 / 접속용 변전소 신설·보강 비용 |

III. 종합

- 조사한 주요국의 경우 발전사가 전용하는 설비(접속설비, 변전소측 차단기 등)에 대하여 발전사가 비용을 직접 부담하고 있으며, 공용 송전망에 대해서는 국가별 비용부담 방식에 따라 다른 기준을 적용하고 있음
 - (미국/일본) 접속설비 비용, 발전소 연계 변전소 보강 비용 및 발전소 연계로 인한 타 지역 송·변전 설비 보강 비용을 모두 발전사업자가 부담 (Deep 방식)
 - (영국) 접속설비 비용 및 발전소 연계 변전소 보강 비용을 발전사업자가 부담 (Semi-Shallow 방식)
 - (프랑스) 공용망 비용을 발전사에 부과하지 않으나, 송전사업자 측 변전소의 차단기가 접속설비로 분류되어 발전사가 비용을 부담함 (Shallow)

【참고문헌】

- ▶ CRE, Consultation publique du 17 juillet 2024 relative à l'encadrement de l'instruction des demandes de mutualisation des raccordements des consommateurs au réseau public de transport, 2024.4
- ▶ Energy Networks Association, G99 Connecting Type B - D Power Generating Modules Guide, 2021.12
- ▶ National Grid, STATEMENT OF METHODOLOGY AND CHARGES FOR CONNECTION TO NATIONAL GRID ELECTRICITY DISTRIBUTION (WEST MIDLANDS) PLC'S ELECTRICITY DISTRIBUTION SYSTEM, 2024.5
- ▶ PJM, PJM Manual 14A, 2023.7
- ▶ PJM, Generation Interconnection System Impact Study Report For PJM Generation Interconnection Request Queue Position AA1-038, 2015.12
- ▶ PJM, Generation Interconnection System Impact Study Report For PJM Generation Interconnection Request Queue Position AD1-074/075/076, 2023.1
- ▶ RTE, Schéma régional de raccordement au réseau des énergies renouvelables de la Région Auvergne, 2018.12
- ▶ RTE, Documentation Technique de Référence Article 8.1.1, 2023.9
- ▶ SPP, INTERCONNECTION FACILITIES STUDY REPORT GEN-2016-151 (IFS-2016-002-62), 2020.5
- ▶ SPP, INTERCONNECTION FACILITIES STUDY REPORT GEN-2017-010, 2023.2
- ▶ 경제산업성, 접속설비에 관련 비용 시행령(電源線に係る費用に関する省令), 2023.4
- ▶ 동경전력, 도치기현 북부·중부 지역에서의 발전설비 접속 관련 개요 (栃木県北部・中部エリアにおける 電源接続案件募集プロセスの概要について), 2016.1
- ▶ 동경전력, 계통 접근 규칙 [특별 고압 버전] (系統アクセスルール [特別高圧版]), 2021.7
- ▶ OCCTO, 접속비용 검토양식 – 특고압 (接続検討回答書 (特別高圧版)), 2023.4
- ▶ 프랑스 에너지법, L. 342-1 ~ L. 342-18 / D. 342-1 ~ D.342-27
- ▶ 프랑스 법령, relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement aux réseaux d'électricité, 2020.6
- ▶ 한국전력공사, 송·배전용전기설비 이용규정, 2024.7

작성자 : 한전 경영연구원 조호진 선임연구원

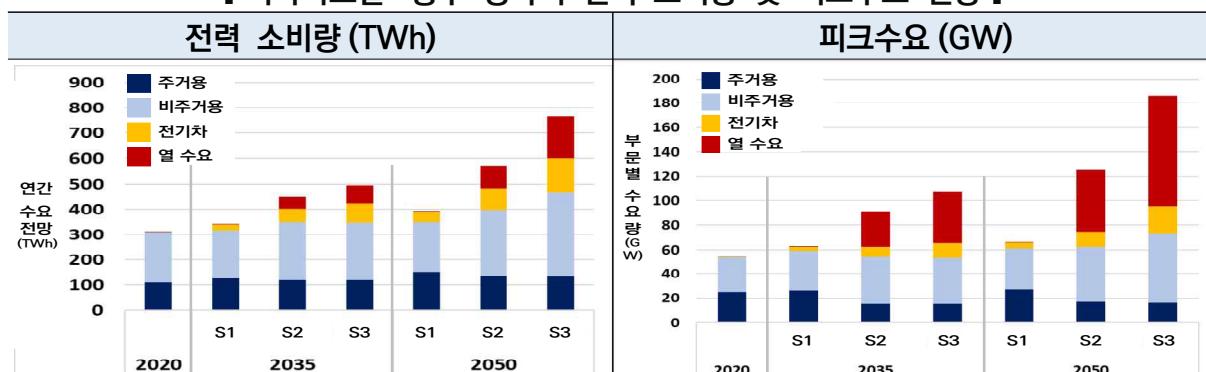
Research Activities I : 英 전기차(EV) 스마트충전 추진계획의 주요 내용

자료 Electric Vehicle Smart Charging Action Plan (UK BEIS, 2023.1)

1 전기차(이하 EV) 스마트충전 추진계획 개요

- '21년 10월, 영국 정부는 2050년 넷제로 목표를 달성하기 위해 '35년까지 탄소배출량을 '90년 대비 77% 감축하겠다는 계획을 발표하면서 경제 전반의 탈탄소화를 추진 중
 - 정부는 2035년까지 발전부문의 완전한 탈탄소화를 달성하겠다는 목표를 설정하였으며, 현재 화석연료를 저탄소 에너지원으로 전환하는데 상당한 진전을 이루고 있음
 - 운송 부문은 2035년까지 내연기관 차량의 판매를 단계적으로 폐지하겠다는 정책을 발표하여, EV로의 전환이 빠르게 이루어질 것으로 예상되며, 영국이 G7 국가 중 가장 빠르게 운송 부문의 탈탄소화를 달성할 수 있을 것으로 기대됨
- 탈탄소화에 따른 운송, 열 부문 등의 전기화로 인해 2050년 영국의 전력수요는 '20년 대비 2배 이상 증가할 것으로 전망되며, 정부는 급증하는 전력수요에 대응하기 위해 수요자원과 에너지 저장 기능을 제공할 수 있는 EV 배터리에 주목
 - 정부는 2030년 EV 누적 보급대수가 약 1,000만 대에 이를 것으로 분석하였으며, 대다수 EV 소유주가 차량 사용 및 충전에 있어 일정한 패턴을 유지하고 있으므로, 이를 이용하여 EV 배터리에 충전된 전력을 유연성 자원으로 활용한다면 재정적, 환경적 이점을 얻을 수 있다고 판단함

■ 시나리오별* 향후 영국의 전력 소비량 및 피크수요 전망 ■



* 영국의 사업·에너지·산업 전략부(BEIS)에서 제시한 시나리오

: S1(기존 정책을 유지), S2(낮은 수준의 전기화 달성), S3(거의 완전한 전기화 달성)

- 에너지 규제기관 Ofgem^{*}은 전력 유연성 자원으로서 EV의 활용도를 극대화하고, 비용효율적인 전기화를 달성하기 위해 「EV 스마트충전 추진계획」 수립(‘23년)

* Office for Gas and Electricity Markets, 가스전력시장국

- 스마트충전은 지능적으로 전력망 영향, 충전 요금 등을 고려하여 EV 충전을 제어, 관리, 조정하는 기술로 EV 소유주의 비용을 절감하고, 전력망 안정성을 증대시킬 수 있음
 - (비용 절감) 충전요금이 저렴한 시간대에 충전함으로써 소유주의 비용을 줄일 수 있음
 - (전력망 안정성 증대) 피크수요 시간대를 피하고, 재생에너지 발전량이 많은 시간대에 충전함으로써 전력망의 과부하 방지
 - 궁극적으로 EV 배터리가 분산에너지 공급원의 한 형태로 활용될 수 있도록 양방향 제어가 가능한 V2X^{*} 기술을 구현하고 확대할 계획
- * Vehicle to Everything, EV 배터리를 다양한 대상(전력망, 가정, 건물 등)과 연결하는 기술
- 소비자는 V2X 기술을 활용하여 요금이 저렴한 시간대에 충전하고, 높은 시간대에 방전 함으로써 비용 절감뿐만 아니라, 유연성 서비스 제공에 대한 수익도 창출할 수 있음

2 「EV 스마트충전 추진계획」의 주요 내용

① EV 스마트충전에 대한 고객 접근성 확대

- 스마트충전에 대한 고객 접근성 확대를 위해 해당 기술 접근이 어려운 저소득층, 임차인 등을 지원하고, EV 소유주가 스마트충전에 대한 실질적인 편익을 체감할 수 있도록 전력 흐름, 충전요금 등 실시간 정보제공이 가능한 플랫폼을 확대할 계획
 - (접근성 확대) 정부는 저소득층과 임차인들의 스마트충전 접근성을 확대하기 위한 관련 규정 개정 및 충전소 설치보조금 확대 추진
 - EV 소유주들은 주로 집에서 전용 스마트충전기를 사용하여 충전하지만, 주거지에 충전기를 설치할 경제적 여력이 없는 저소득층과 주거지 내 자유롭게 충전기를 설치할 수 없는 임차인은 주로 직장이나 공공 충전소에서 충전해야 하는 불편함이 존재
 - (정보제공 지원) EV 소유주가 사용패턴, 충전 시간대 등을 고려하여 비용효율적인 스마트 충전 요금제를 선택하는 데 도움이 될 수 있도록 전력 흐름 및 비용정보를 실시간으로 확인할 수 있는 플랫폼 개발지원*

- * 영국 정부는 EV 소비자들의 스마트충전에 대한 이해를 돋기 위해 웹사이트를 개설하여 스마트 충전에 대한 아점, 교육 자료, 관련 정책 정보 등을 제공한 바 있음('21년)
- EV 고객은 본인에게 적합한 요금제를 선택하기보다는 기존 요금제를 계속 유지하는 경향이 있어, 일반충전과 스마트충전 간 전기요금을 비교할 수 있는 사이트 등 정보제공 플랫폼 개발을 통해 소비자들이 실질적인 비용 절감을 예상하고 체감할 수 있도록 지원할 계획

② EV 스마트충전 사업 기반 마련

□ 스마트충전소 보급을 확대하고, 스마트충전 정보의 표준화와 V2X 시범사업을 통해 대규모 V2X 구현을 위한 기반 마련

- (스마트 충전소 보급 확대) '21.12월 정부는 잉글랜드와 웨일스 지역의 주차장, 신규 건축물, 리모델링이 진행 중인 건물 등에 스마트 충전소 설치를 의무화한 바 있으며, 이에 따른 보급 현황과 시장 영향을 모니터링하고 분석할 계획('25년 중간보고, '27년 최종보고)
- 전력망 영향, EV 충전비용, 탄소배출량 등을 종합적으로 고려하여 스마트충전과 일반 급속충전의 비용편익 분석을 시행할 계획이며, 스마트충전이 일반 충전보다 더 우수할 것으로 예상됨
- (대규모 V2X 구현) 자율주행 및 전기차 법(AEVA*)을 기반으로 스마트충전 관련한 정보의 표준화를 완료하고, 2025년까지 V2X의 상용화를 위한 12.6백만 파운드 규모의 시범 사업을 추진할 계획

* AEVA(Automated and Electric Vehicle Act, '21.12월 개정)에는 EV 스마트충전을 위해 충전설비가 갖춰야 하는 요건 등이 명시되어 있음

- 시범사업 재원은 넷제로 혁신 포트폴리오*(Net zero Innovation Portfolio)에 편성된 10억 파운드 중 일부를 활용할 예정
 - * 기후변화 대응에 필요한 기술을 개발하기 위해 구성된 자금으로, ① 탄소포집 및 저장, ② 바이오e, ③ 온실가스 저감, ④ 에너지 저장 및 유연성, ⑤ 해상풍력, ⑥ 수소 ⑦ 산업용 연료전환 등에 지원 예정
- (라이센스 도입) EV 충전 인프라의 안정성과 표준화를 강화하고 충전 서비스의 신뢰성을 높이기 위해 충전사업자에 대한 라이센스 제도 도입을 검토
 - 충전 인프라 확장을 촉진하고 소비자 보호를 강화하기 위한 조치로, 해당 제도를 통해 충전사업자가 일정한 기준을 충족해야만 서비스를 제공할 수 있게 되어, 안정성, 보안성 등이 확보된 충전소가 늘어날 것으로 예상
 - 또한, 라이센스 도입은 충전기의 상호운용성을 높이고, 최신 기술과 호환되도록 보장하고 있어 스마트충전 인프라가 다양한 지역에 쉽게 확장되도록 지원

③ EV 스마트충전을 위한 전력시스템 개편

- 스마트충전 확대에 따른 EV의 전력망 연결 증가에 대비하여 수요자원의 통합관리를 검토하고, 가격신호 기능을 강화하기 위해 배전망 요금을 모니터링하고 개편할 계획
 - (수요자원 통합관리) EV를 포함한 여러 수요자원이 같은 가격신호에 반응할 경우, 계통 안정성이 저하될 수 있어*, 통합적인 수요자원 관리를 위해 적정한 요금체계를 지속하여 개발할 계획
 - * 기존 전력수요뿐만 아니라 EV 충전수요 등 다양한 부하가 동일한 시장가격 신호에 동시에 반응하면, 오히려 기존의 피크시간대가 아닌 다른 시간대에 수요가 급증할 수 있음
- (망요금 개편) 특정 시간 및 지역의 소비자 행동을 효율적이고 유연하게 유도하고 전력망의 효율성을 높이기 위해 배전망 요금을 개편할 계획
 - Ofgem은 지역별, 시간대별로 세분화된 요금의 필요 여부를 검토할 예정
- (데이터 표준화) 배전망사업자가 보유한 데이터를 표준화하여 EV 배터리를 활용한 유연성 시장의 활성화를 유도할 계획
 - 배전망사업자가 스마트미터·AI를 통해 수집한 데이터(전력망 상태, 전력 수요 등)를 표준화하여 사업자(배전망, 충전사업자 등) 간 공유함으로써 유연성 시장의 투명성을 높일 수 있으며, 이를 통해 시장참여자들은 유연성 자원을 효율적으로 활용할 수 있음
 - 또한, 데이터 표준화는 EV뿐만 아니라 다른 유연성 자원의 효율적 관리, 새로운 유연성 서비스 창출, 전력망의 효율성 증대에 기여할 것으로 예상

작성자 : 한전 경영연구원 정해영 선임연구원

Research Activities II : 전력망 현대화를 위한 인공지능(AI)의 역할 및 활용방안

자료 AI for Energy : Opportunities for a Modern Grid and Clean Energy Economy
(U.S. Department of Energy, 2024.4)

1 개요

- 2023년 한 해 동안 미국에서 28건 이상의 기후 재해로 인해 수백 명의 인명 피해와 931억 달러에 달하는 손실이 발생하면서 전력 부문을 포함한 많은 분야에서 신기술을 활용한 신속한 기후위기 대응 필요성이 제기되고 있음
- 전력 부문의 기후위기 대응은 방대한 양의 전력 데이터를 의사결정에 필요한 정보로 신속하게 전환할 수 있는 기술인 인공지능(이하 AI)에 의해 주도될 것으로 보임
 - 특히, 복잡한 시스템을 지닌 전력망에서 AI 도입은 다양한 문제를 실시간으로 분석하고, 해결함으로써 전력공급의 안정성과 효율성을 크게 향상시킬 수 있음
- 이에 미국 에너지부(DOE)는 전력망의 현대화를 위한 AI의 역할을 검토하고 구체적 활용 방안을 제시함

2 전력망 현대화를 위한 AI의 역할 및 활용방안

① 전력망 계획 수립 지원

- [데이터 품질 강화] 대부분의 전력망은 수십 년 전에 건설되어 전력망 관련 데이터가 부재하거나 정확성이 낮아 투자 계획 수립에 활용하는데 한계가 존재하였으나, AI의 데이터 가공 및 보완 기술을 통해 망 계획 수립에 활용 가능한 고품질의 데이터를 취득할 수 있음
 - 유틸리티, 규제기관, 이해관계자 등은 확보된 고품질의 데이터를 통해 현재 전력계통 상태를 정확히 평가할 수 있고, 설비 보강, 신설 등 망 투자 결정에도 활용할 수 있음
- [인허가 기간 단축] 인허가 단계에서 사업 검토 및 데이터 수집·분석에 많은 시간이 소요되었으나, AI 기반 자동화 시스템 도입으로 인허가 기간을 단축할 수 있음
 - 프로젝트 인허가를 위해서는 과거 인허가 승인 사례 외에도 다양한 법률, 규정, 조례, 지리 공간 및 이미지 데이터 등 방대한 양의 데이터를 검토해야 함

- 이러한 데이터들은 대부분 여러 기관에서 서로 다른 데이터베이스에 저장 및 관리하고 있어 검색과 취득에 많은 인력과 시간이 필요하나, AI 기반 자동화 시스템 활용하여 정보를 빠르게 수집하고 필요한 소스들을 최적화함으로써 작업 시간이 대폭 감소함

② 전력시스템 분산화 촉진

- [분산전원 연계 최적화] AI를 활용할 경우 분산전원 연계에 필요한 데이터 검증 시간이 줄고, 더 많은 시나리오를 평가할 수 있어 전반적인 계통접속 대기시간이 감소함
 - 재생e, ESS 등 계통연계가 필요한 설비들이 늘어나 계통의 복잡성이 커지고 있어, 기존의 전력 흐름 분석모델을 이용한 전력망 계획 및 운영은 한계에 직면
 - 2000년부터 2004년까지 접속 신청 건수는 연평균 약 300건이었으나, 2021년과 2022년에는 3,000건 이상이며 2022년 말 기준, 접속 대기 용량이 약 2TW에 달함
 - 이에 계통 연계 신청부터 상업 운전까지 걸리는 기간은 2000년대 초 2년 미만이었으나, 2022년 5년으로 늘어나며 계통접속 대기가 청정에너지 보급의 장애 요인으로 대두
 - AI는 전력망의 상태를 실시간으로 분석하여 계통접속을 신청한 분산전원의 연결 우선 순위 등을 자동으로 파악하여 접속 절차를 자동화하고 최적화할 수 있음
- [영농형 재생에너지 확대] 농업용 토지에 재생에너지 자원을 보급할 경우, AI를 이용하여 농산물과 재생에너지의 생산을 동시에 극대화할 수 있는 최적의 입지를 선정
 - AI를 활용해 재생에너지 보급 위치에 따른 발전량, 농산물 생산량 변화를 정확히 예측
 - NREL^{*}은 영농형 태양광 부지 선정, 토지 이용 최적화 등을 지원하는 AI 모델을 개발했으며, 향후 풍력, 지열 등 태양광 이외의 자원도 분석 가능한 AI 모델을 개발할 예정
- [EVC^{*} 배치 최적화] AI와 EVC의 결합을 통해 미래 전력수요에서 증가할 것으로 예상되는 전기차 충전수요의 분산, 대규모 전력인프라 보강 최소화 등이 가능

* Electric Vehicle Chargers, 전기차 충전설비

- AI를 통해 EVC 배치를 최적화할 경우, 전기차 소유주 대상으로 충전 기회의 형평성을 제고할 수 있고, 설비의 가용성 및 이용률이 향상됨

- 또한, 전기차 충전기에 강화 학습 등의 AI 기법을 적용하면 가격신호를 반영하여 충전 수요를 유연하게 제어할 수 있어, 충전 과정에서 전력망 혼잡을 최소화할 수 있음
- [V2G* 운영 최적화]** AI가 사용자 행동 패턴, 전력망 상태 등을 고려하여 대다수 전기차의 충전 일정을 최적화하고, 전기차 배터리를 에너지저장장치(ESS)처럼 활용하여 전력계통의 유연 자원으로 활용

* Vehicle to Grid, 전기차와 전력망 간의 양방향 전력 전송이 가능한 기술

- AI가 전력 수급, 전기차의 충전 상태, 사용자의 행동 패턴 등을 고려하여 현재 충·방전 제어에 적합한 전기차를 식별함으로써 V2G 운영을 최적화할 수 있음

③ 전력계통의 신뢰도 제고

- [발전량 예측 정확도 향상]** AI는 기존 글로벌 기후 모델의 해상도를 높여 세부 지역의 온도 변화, 강수 패턴, 기상 이변 예측 등에 대한 보다 정밀한 분석이 가능하고, 이를 활용하여 정확도 높은 전력 수급 계획을 수립할 수 있음
- 변동성 재생e 발전량이 늘어나고, 화석연료 기반 급전 설비가 줄어들면서 전력수급의 예측 기술 고도화가 매우 중요해지고 있는 가운데, AI는 약 10m 단위까지 해상도를 높일 수 있어 특정 지역의 재생e 발전량 예측 정확도를 대폭 향상시킬 수 있음
- [에너지소비 최적화]** AI를 활용한 건물의 냉·난방 부하 및 조명 제어는 에너지 소비를 줄이는 동시에, 전력망 안정성에 기여하는 수요자원으로서의 역할을 수행
 - 현재 대다수 빌딩에서는 온도, 전력 사용 패턴, 공기 상태 등을 분석하는 AI 기술을 활용하여 냉난방 시스템을 최적화하고, 실시간 전력 부하 제어를 통해 에너지 소비를 감축
 - 에너지소비 감축을 통해 확보한 수요자원은 계통 유연성 자원으로 활용되고 있으며, 이는 변동성이 높은 재생에너지에 대비한 막 수용성 증대에 도움이 될 것으로 기대
- [유지 보수 고도화]** AI와 머신러닝 기법을 통해 전력인프라의 실제 상태에 기반한 유효 수명을 정확히 평가할 수 있어 유지 보수의 적시성을 개선할 수 있고, 이를 통해 전력망 운영의 효율성과 안정성을 높일 수 있음
 - 기존에는 과거 유지 보수 데이터, OEM(주문 제작) 장비의 사양 등을 토대로 정기적으로 전력인프라 설비를 교체해 왔음

- AI와 머신러닝 모델은 대량의 실시간 데이터를 분석하고 패턴을 학습하여 특정 장비가 고장 나기 전 이상 징후를 발견할 수 있으며, 이를 통해 필요한 시점에 맞춰 유지 보수가 가능
- 또한, 산불, 홍수, 폭염, 허리케인, 가뭄과 같은 이상 기후 현상을 미리 식별하여 효율적이고 선제적 대응이 가능

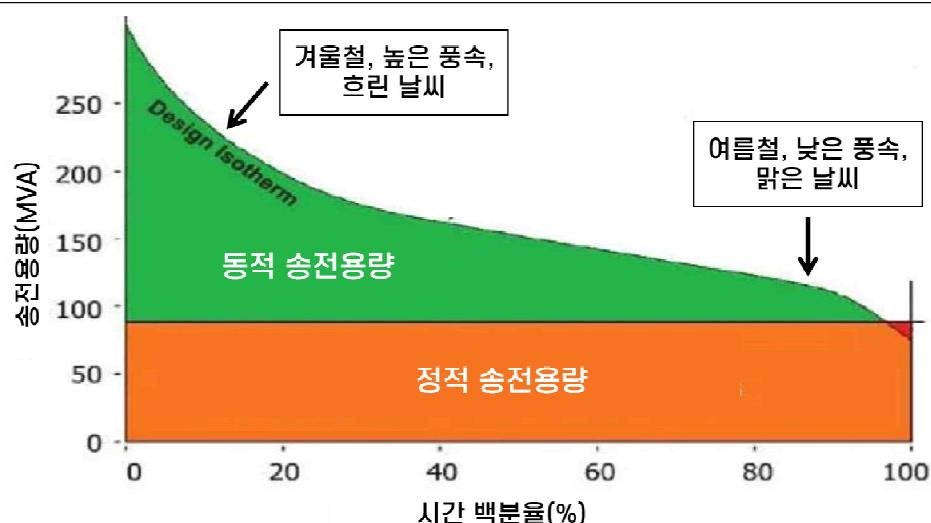
□ [송전용량 확대] AI의 우수한 연산·예측 능력을 활용하여 전력망에 변동성 재생 에너지 연계를 확대할 수 있으며, 부하 급변에도 전력망 강화 기술로 안정적인 전력공급이 가능

- AI 기술을 통해 주변 환경을 고려하여 송전용량을 확대하거나(DLR*), 전력망을 재구성하여 설비 이용률을 증가(TO**)시키는 전력망 신기술을 더욱 강화할 수 있음

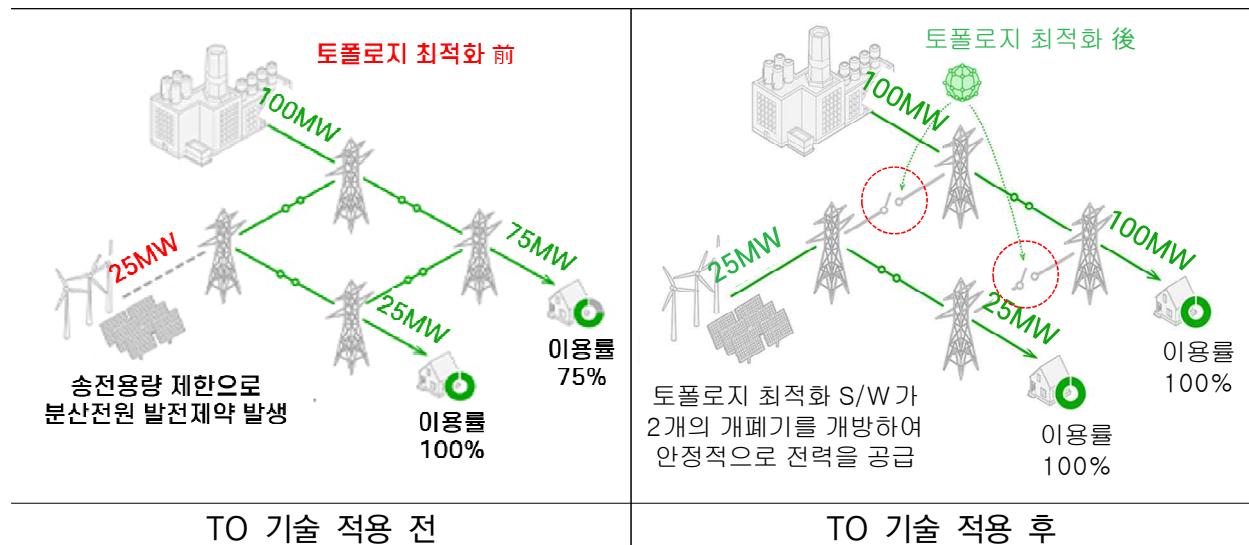
* Dynamic Line Rating, 동적 송전용량 ** Topology Optimization, 송전선의 구조 최적화

- (DLR) 풍속, 일사량, 기온, 정격전류 등 주위 환경조건을 고려하여 능동적으로 송전 용량을 조정^{*}하는 기술로, 재생에너지 수용 한계 증대 및 출력제한 감소에 기여
 - * 기온이 낮은 겨울철, 높은 풍속, 흐린 날씨 등의 환경조건에서 송전용량은 늘어남
- (TO) 특정 지역의 전력 소비량 증가로 주변 선로의 과부하가 발생하면 송전용량을 초과하여 발전기의 출력을 제어 또는 제한(Curtailment)하여야 하나, 선로의 개폐기를 제어하여 전력망을 재구성 함으로써 송전용량 확대가 가능

■ DLR 기술 개념도 ■



TO 기술 개념도



④ 전력계통의 복원력 향상

- 【공급 중단 가능성 예측】 AI는 기상 변수와 CMRA* 데이터를 결합하여 기상이변이 발생할 가능성을 분석하고, 이 분석을 통해 전력망의 취약점을 파악하여 전력공급 중단이 발생할 수 있는 상황을 정확하게 예측함

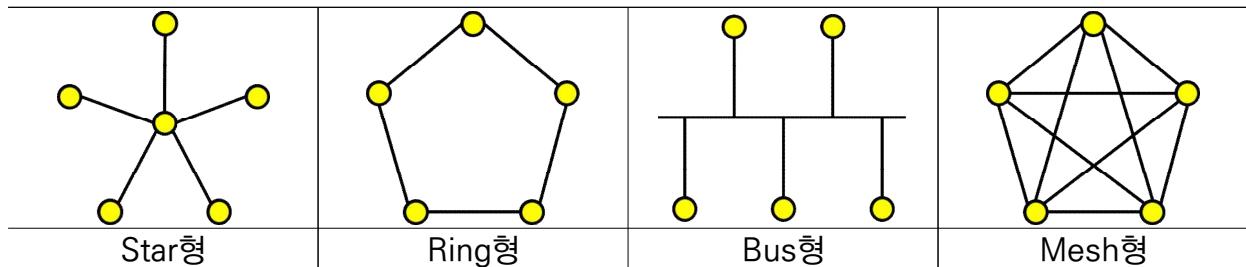
* CMRA(Climate Mapping for Resilience and Adaption) : 미국 내무부와 국립해양대기청이 지역별 기후 위험 노출을 평가하기 위해 개발한 도구로, 현재 기후 위험이 발생하고 있는 지역을 실시간으로 확인할 수 있음

- 기존에는 CMRA 데이터를 수집하여 전력공급 중단 가능성을 예측해 왔으나, 광범위하게 분포한 전력망의 특성상 CMRA 데이터만으로는 전력공급 중단과 같은 비상 이벤트 발생 시기를 판단하기 어려운 한계가 존재
- AI는 기상 데이터와 CMRA 데이터를 동시에 처리함으로써 기존보다 더 정교한 예측이 가능하며, 전력공급 중단을 사전에 대비함으로써 전력계통의 신뢰성과 복원력 유지를 위한 전력망 운영자의 대응 능력을 강화할 수 있음

- 【자가 복원 인프라 구축】 AI 기반 고차원적인 자가 복원 모델은 대규모 자연재해 등으로 다수의 전력인프라가 동시에 손상되는 문제가 발생했을 때 자동으로 탐지하고 신속하게 복구할 수 있음

- 전통적으로 다양한 전력망 구성 방식을 통해 전력인프라의 성능 저하에 따른 전력공급 중단과 같은 비상 이벤트에 대비

| 전통적인 전력망 구성 방식 |



- 그러나 전력망 복잡성이 커지고, 동시다발적인 고장에 따른 대응이 어려워지고 있어, AI 기술을 활용해 예상치 못한 전력중단 상황에도 전력 흐름을 최적화하고, 전력공급이 가능한 자가 복원 시스템을 구축함으로써 높은 수준의 망 안정성과 신뢰성 유지 가능
 - DOE는 AI 자가 복원 모델 개발을 위해 700만 달러 규모의 자금 지원(FOA*)을 발표
- * Funding Opportunity Announcement, 정부가 연구개발, 혁신 프로젝트 등에 재정지원을 알리는 공식 발표

작성자 : 한전 경영연구원 이순정, 강대영 선임연구원

KEMRI 전력경제 Review 2024년 9월호 (Vol.307)

발행일 2024. 10. 18.

발행인 원장 주재각

편집인 경영연구원 편집위원회
편집장 책임연구원 원동규(☎국선 : 02-3456-5490 / 사선 : 021-5490)
편집위원 선임연구원 나 응(☎국선 : 02-3456-5492 / 사선 : 021-5492)

홈페이지 www.kepco.co.kr/KEMRI

문의처 경영연구원 연구기획팀(☎국선 : 02-3456-5490~2 / 사선 : 021-5490~2)

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