

KEEI ISSUE PAPER

이슈페이퍼 23-09

제주지역 전력계통의 사례분석을 통한 전국단위의 적용가능성 연구

이태의·이유수·전우영



이슈페이퍼 23-09

**제주지역 전력계통의 사례분석을 통한
전국단위의 적용가능성 연구**

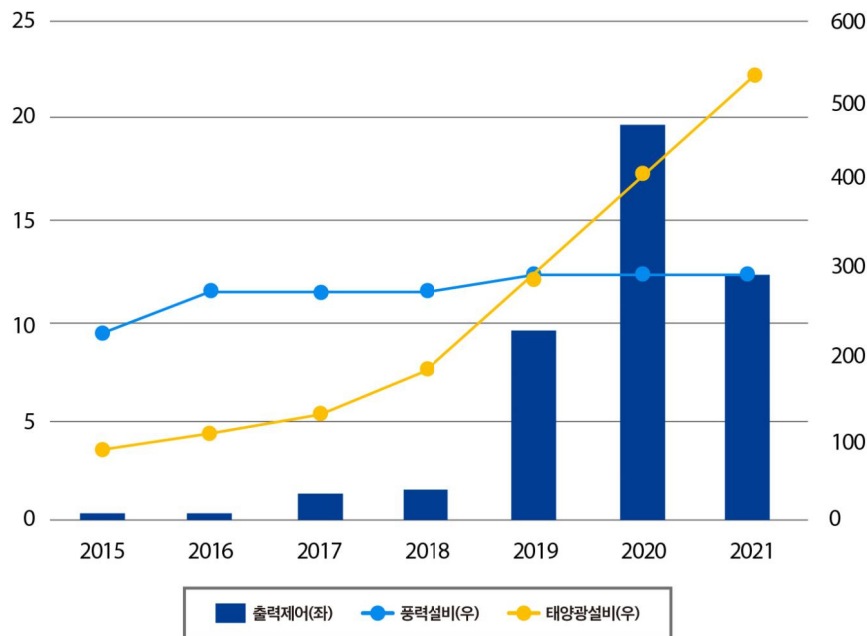
이태의 · 이유수 · 전우영

1. 연구의 필요성 및 목적

□ 연구의 필요성

- 최근 탄소중립 목표달성과 관련하여 태양광 및 풍력 발전 등의 변동성 재생 에너지의 역할이 무엇보다 중요하지만 변동성 재생에너지의 확대는 전력계통의 운영에 부담이 되기 때문에 계통의 안정화 측면에서 지속적인 방안 마련이 필요함.
 - 인버터 기반의 변동성 재생에너지 비중 증가는 회전체 발전기가 가지는 관성 및 동기발전기의 특성이 없고 주파수 및 전압의 변동성에 취약하므로 전력계통의 운영에서는 출력예측 및 변동성을 관리하기 어려움.
- 특히, 제주지역은 2020년 총 발전량 중 변동성 재생에너지의 비중이 18%로 IEA(International Energy Agency)기준의 3단계에 해당되고, 전력계통의 불안 등 전력운영 시스템에 상당한 영향을 미칠 뿐만 아니라 발전설비 운영의 비효율을 야기하고 있으며, 더욱 심각해지고 있는 상황임.
- 변동성 재생에너지설비로 인한 실시간 전력공급 부족 또는 과잉 상황에서 계통의 불안이 가중됨.
 - 전력수요가 낮을 때, 태양광 및 풍력 발전량의 과잉공급으로 인해 풍력의 출력제한 횟수가 획기적으로 증가하고 있음.
 - 2019년부터는 태양광과 풍력설비규모의 역전이 발생할 정도로 태양광의 설비가 급격히 증가하기 시작하였고, 출력제한도 크게 증가함.
 - HVDC #2(High-Voltage Direct Current, 초고압직류송전선로)를 통한 역송이 시작되면서 2021년은 출력제한이 다소 감소하였지만, 2022년부터는 제주도 전력계통 안정성 확보 차원에서 역송을 하고 있지 않기 때문에 출력제한은 더욱 증가할 것으로 전망됨.

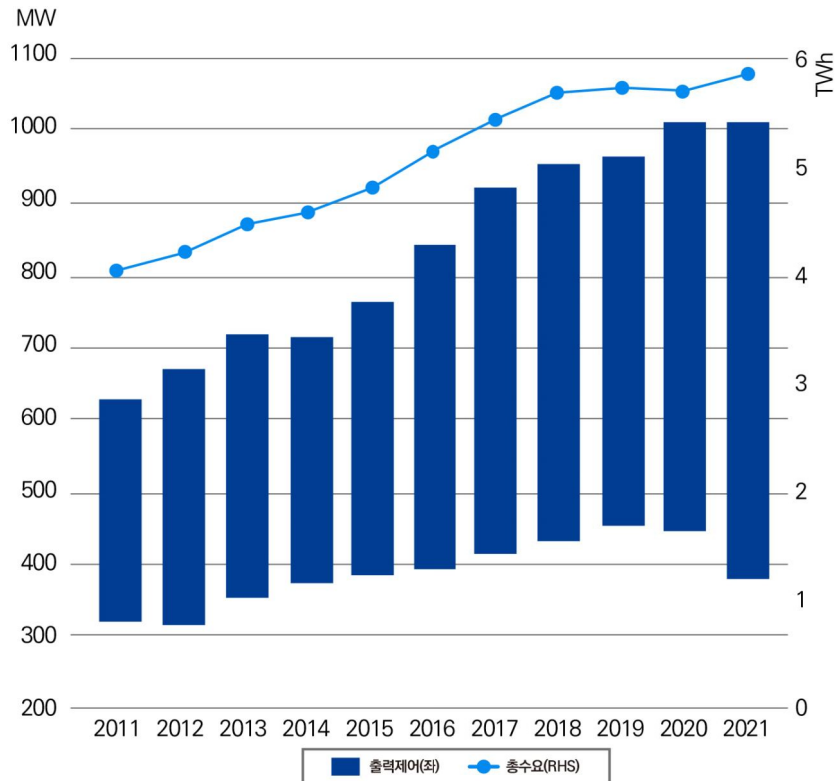
[그림 1] 제주 재생에너지 확대와 출력제한



자료: 김영환(2022) 2050 탄소중립 실현을 위한 차기 정부에서의 전력시장 개선방향 세미나 발표자료, 전력거래소(EPIS) 연료원별 발전설비 자료를 활용하여 저자 작성

- 최근에는 풍력발전의 출력횟수가 증가할 뿐만 아니라 태양광 발전까지 출력제한을 시행할 정도로 재생에너지 발전설비의 비효율적 운영이 계속되고 있음.
 - 2021년 4월 11일 제주도에서 처음으로 태양광 발전설비 15기의 가동을 중단한 바 있음.
- 전력계통에서 관측되지 않는 자가용 태양광이 증가하면서 지속적인 전력수요 증가에도 수요단의 최소부하가 낮아지는 디커플링 현상이 2021년에 나타남.
 - 증가하는 최대수요에 대응하기 위해서 발전설비는 늘려야 하지만, 최저수요가 낮아지기 때문에 초과발전량의 크기가 증가하여 발전기의 이용률은 낮아지고 출력제한은 증가하는 상태로 변화되고 있음.

[그림 2] 제주 전력수요 및 부하 범위



자료: 전력거래소 시간별 전력수요량 자료를 활용하여 저자 작성

주: 태풍 볼라벤(2012.8.28.), 차바(2016.10.5.) 발생일은 대규모 정전발생으로 부하범위 산정에서 제외

○ 전국단위에서는 아직 변동성 재생에너지의 비중이 낮지만, 지역적으로 편중되어 있고 증가속도가 빨라짐에 따라 제주도의 실증경험을 적용할 수 있는지를 검토할 필요가 있음.

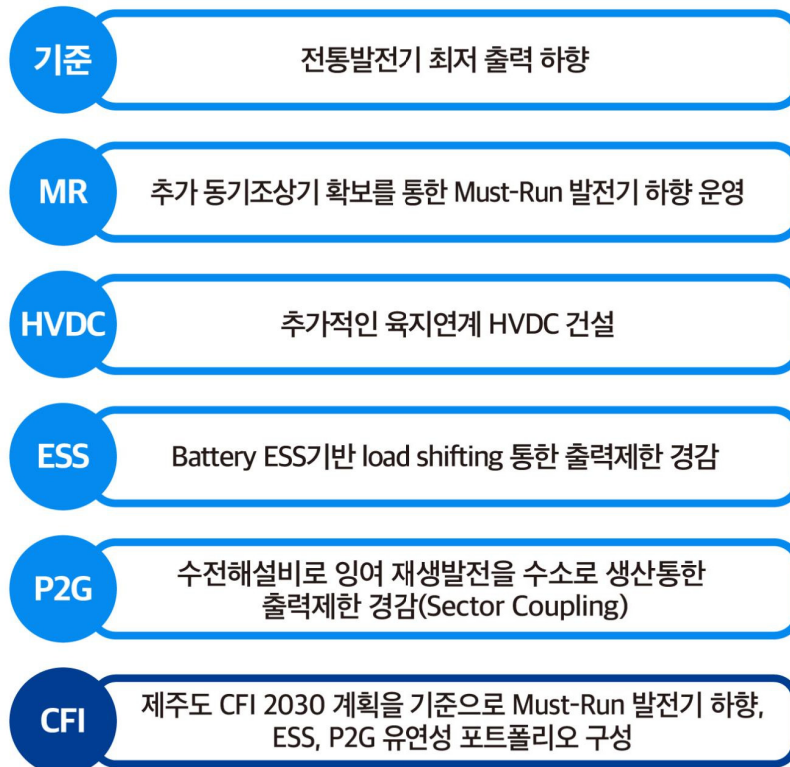
- 전국단위와 제주도는 기본적으로 전원구성, 도매시장가격, REC 가격 등에 차이가 있으므로 제주도의 계통안정성 확보를 위한 시장제도 개선 및 잉여전력 활용문제를 확대 적용하는 것이 가능한지를 살펴봐야 함.

2. 연구내용 및 주요 분석 결과

□ 제주지역의 출력제한 대응방안 시나리오 분석

- 본 연구에서는 제주지역의 출력제한을 경감하는 대응방안으로 다음과 같이 크게 5가지를 고려함.

[그림 3] 제주지역 출력제한 대응방안 시나리오



자료: 저자 작성

- 제주지역의 5가지 출력제한 대응방안에 대한 통합 시나리오를 분석함.
 - 정책적 의의를 높이기 위해 실현가능성이 높거나 CFI2030(Carbon Free Island 2030) 계획에서 발표된 대안들을 중심으로 시나리오를 구성

○ CFI2030 계획에 따라 증가한 VRE(Variable Renewable Energy) 용량과 증가한 수요를 활용, 수요보다 VRE 발전량이 더 큰 초과발전을 분석

〈표-1〉 제주 초과발전, '25 vs '30

	초과발전 시간	초과발전량(MWh)	재생발전 중 초과발전 비중
2025년	2,013	501,509	11.2%
2030년	4,291	2,327,064	28.9%

주 : 역송이 가능한 HVDC로 인해 실제 출력제한은 초과발전에 비해 낮은 수준을 유지함.

자료 : 저자 작성

□ 시나리오 분석 결과 및 시사점

〈표 2〉 시나리오별 시뮬레이션 출력제한 결과

시나리오	구성	2025	2030
시나리오 0	기본 제주 전력시스템, original PMIN	14.6%	19.3%
시나리오 1 (Base Case)	기본 제주 전력시스템, 하향 조정된 PMIN	11.9%	17.1%
시나리오 2 (MR)	시나리오 1 + Must-Run(MR) 발전기 하향	10.3%	15.7%
시나리오 3 (HVDC)	시나리오 1 + 추가 HVDC#4 도입	7.4%	12.8%
시나리오 4 (ESS)	시나리오 1 + 200MW급 BESS 도입	5.5%	10.9%
시나리오 5 (P2G)	시나리오1+ 200MW급 수전해 수소생산 도입	5.7%	11.3%
시나리오 6 (통합)	시나리오 1 + 시나리오 2(MR) + 시나리오 4(ESS, CFI2030)+시나리오 5(P2G, CFI2030)	9.2%	10.7%

출처 : 저자 작성

주 : ESS의 경우 안정성을 위해 110%의 설계규모를 가지는 것을 가정, 실제로 220MW까지 운영을 전제로 함.

○ (HVDC) 계통안정성, 발전비용 및 출력제한 최소화를 동시에 고려한 최적 HVDC 운영 방안의 모색 필요

- 향후 연계된 HVDC#3 완공 이후에도 빠른 VRE 보급으로 인해 출력제한이 지속적으로 증가할 경우 본 연구에서 제안한 바와 같이 현재의 정송중심의 운영 시스템을 역송중심의 운영 시스템으로 전환하는 것이 합리적임.
- 2030년에도 정송중심의 HVDC 운영이 적용될 경우 출력제한이 시나리오 1 기준 28.4%로 17.1%와 상당한 차이를 보임.

○ (출력제한 비율) 일정 수준의 출력제한을 허용하는 것은 전력시스템 전체의 공급비용을 최소화 측면에서 합리적이거나, 적정 출력제한 수준에 대한 합의와 적용이 필요

- BESS(Battery Energy Storage System)나 P2G(Power to Gas)와 같은 출력제한 경감수단들의 용량이 증가할 경우 이에 대한 한계 출력제한 경감량은 하락하는 형태를 보임.
- 이것은 출력제한 경감 수단들의 용량이 커질수록 자원의 효율성이 감소하는 것을 나타내며, 출력제한을 0%로 접근시키기 위해서는 매우 비용 비효율적인 경감수단이 필요하다는 의미임.
- 본 연구에서는 5% 안팎의 출력제한을 허용하는 범위에서 BESS와 P2G의 경제성이 일정부분 확보되는 것으로 분석됨. 출력제한 보상경감 편익을 반영할 경우 더 낮은 출력제한 허용 수준에서도 BESS와 P2G의 경제성 확보가 가능할 것으로 판단됨.

○ (유연성 가치) 출력제한을 유연성 자원으로 인식하고 합리적 보상을 제공하는 인식 전환이 필요함.

- 유연성을 제공하는 가치를 중심으로 출력제한을 낮추는 인센티브를 제공하고, 비용이 낮은 수단들부터 활용할 수 있는 시장 구축이 필요함.
- 이를 통해 출력제한으로 계통운영에 기여하는 재생에너지 발전이 있을 경우 유연성 가치에 근거한 인센티브를 제공하는 것이 합리적임.

- 정당한 보상이 없을 경우 향후 발전사업자 간 출력제한 분배문제도 큰 이슈로 부각될 수 있음.
- (배터리) BESS는 출력제한을 경감시키는데 효과적이지만 계통의 상황에 따라 제한적인 효용이 나타날 수 있음.
 - BESS는 부하이전 자원인데 출력제한이 24시간 이상 지속되는 과도한 상황에서는 부하이전으로 인한 출력제한 효과는 제한적임.
 - BESS 용량이 증가할 경우 SMP가 0원인 시간이 줄어들어 차익거래의 편익이 감소하고 이에 따라 부하이전이 감소하면서 BESS의 이용률 및 경제성이 하락함.
- (섹터커플링) 제주도에서 활용을 가정한 P2G는 부하발생 자원으로서 BESS보다 뛰어난 출력제한 경감효과를 가지지만 수소 수요처 확보가 필요함.
 - P2G는 전력시스템의 출력제한 수준에 상관없이 일정한 출력제한 경감효과 달성이 가능하지만 이 자원이 작동하기 위해서는 합리적인 운송비용 제약하에서 경제성있는 수소 수요처 확보가 필수적임.
 - 섹터커플링을 통해 에너지원간의 전환이 이뤄지면 해당 에너지의 수요가 확보되어야 하며, P2G의 경우 수소인프라가 구축되어야 경쟁력을 가질 수 있음.

3. 전국단위의 적용 가능성 및 시사점

□ 전력계통 관점에서 제주도와 육지의 차이

- 우리나라는 독립적으로 운영되는 전력계통이지만, 제주도는 육지와 연계선을 통해 유연성을 확보한 유럽형의 전력계통으로 근본적인 차이가 존재함.
- 원자력과 석탄과 같은 대규모 경직성 설비 유무의 차이

- 국내 발전믹스에서 절반 이상을 차지하는 석탄과 원자력은 출력 조정이 용이하지 않기 때문에 경부하시간에 출력을 낮추는 것이 어려움
- 대부분의 예비력은 석탄발전의 유휴발전 능력을 통해 확보하고 있어 HVDC가 보조하고 있는 제주와는 큰 차이를 보임.

○ 제주와 육지는 수요측면에서도 차이가 존재

- 육지는 전력다소비 산업인 제조업을 중심으로 구성되어 있어 낮시간의 수요가 상대적으로 높음.
- 낮시간에 높은 수요를 보이는 시장구조는 재생에너지, 특히 태양광의 낮시간 출력을 받아 줄 수 있는 여력이 있어 보이나, 출력제한 발생 확률이 높은 휴일과 주말을 중심으로는 제주와 유사한 수요 특성을 보이는 상황임.

□ 제주지역 출력제한 대응방안의 육지적용 시사점

○ 전통 발전설비의 필수발전량 감축

- 육지에서도 활용이 가능하며, 최소출력의 기준을 낮추는 것 외에도 원자력 감발, G/T단독 운전 등 다양한 수단이 존재하나 안전규제 및 환경규제 등 고려사항이 존재함.

〈표 3〉 전통발전기 필수발전량 감축 방안

	내용	고려사항
원자력 감발운전	하루 전 계획에서 원전 출력감발을 고려한 발전계획 수립	원전안전규제
최소발전기준 하향	최소출력 하향운전 확대, 열계약 최소화(축열조 활용 등)	환경규제
G/T 단독운전	속응성 자원으로 활용가능한 설비 확보 및 운영 인센티브 마련	환경규제

출처: 저자 작성

○ 동기조상기를 활용한 계통 관성 확보

- 전력수요 내에서도 단일 동기조상기가 아닌 다수의 동기조상기를 활용할 경우 계통 관성이 증가하는 효과를 기대할 수 있기 때문에 육지에서도 활용이 가능함.
- 다만, 제주 계통의 전력수요 규모는 1GW 미만에서 형성되는 반면, 2021년 기준 국내 최대전력수요 규모는 약 91GW에 육박하기 때문에 규모면의 차이에 대한 검토가 필요함.

○ BESS의 활용

- 유연성 자원에 있어서 BESS의 활용도를 고려할 때 전력계통의 안정성 차원에서 가치가 있는 수단이므로 유연성 자원 포트폴리오로서 도입 가능하지만, 모든 출력제한 및 안정성을 BESS만으로 충당하는 것은 비용 효율적이지 않음.
- 따라서 장기적으로는 에너지를 전환하여 계통에 안정성을 부가해줄 수 있는 다른 수단들과 적정 포트폴리오를 구성하는 것이 필요함.

○ 섹터커플링의 활용

- 제주에서 P2G도입에 큰 걸림돌로 보이는 수소 활용처의 경우, 육지에서는 산업, 발전, 수송 등 다양한 수요처가 확보될 것으로 기대하고 있기 때문에 활용도가 더욱 높을 것으로 기대함.
- P2G는 용량의 제한이 없다는 특징으로 인해 앞서 설명한 배터리에 비해 장기적인 관점에서 탄소중립에 가까울수록 효용이 높아짐.
- P2H(Power to Heat)는 전력의 초과공급이 발생하는 시기에 열제약 발전으로 인해 계통에서 유입되는 필수발전량을 낮추면서 동시에 부하를 창출하는 이중 효과를 기대할 수 있음.

◆

〈표 4〉 제주와 육지의 출력제한 경감 수단의 활용 비교

구분	제주	육지
출력하향	상대적으로 규모가 큰 발전기의 유연한 운전 가능	석탄, 원자력 등의 출력감발
필수발전기 감축	동기조상기가 충분한 관성을 제공한다는 전제로 가능	계통제약, 열공급 해결이 우선. 수요 증가로 요구되는 발전설비 증가로 폐지발전기의 동기조상기 변환은 불확실
HVDC	가능, 향후 역송중심의 운영 시 효과 증대 단, 제주도의 육지계통 의존성을 낮추는 방안 고려가 필요	지정학적 요인으로 외부계통과의 연계 불확실 지역적 수급불균형 및 민원 회피를 위해 활용
BESS	계통으로부터 전력량을 흡수하여 충전하고, 필요 시 전력을 계통에 방전, 단, 고비용의 유연성 자원 시설이면서 설비의 확장이 경제성의 감소로 이어짐.	안전성을 고려하며, 주파수 제어용을 시작으로 부하 이전, 이후에는 재생에너지 연계까지 활용이 가능. 제주도와 동일한 장단점을 지님.
섹터커플링	용량제약 없이 부하 창출이 가능하나 제주도에서 수소, 열에 대한 수요확보가 필요하며 경제성 확보의 어려움이 있음.	탄소중립을 위해 필요한 수소와 열을 공급하는 수단인면서 재생에너지 초과발전 흡수 가능. 단, 초과발전량만으로는 경제성 확보가 어려움.

자료: 저자 작성