

경사하강법 기반 한·독 순부하 비교와 재생에너지 변동성 연구

박호연

대전대신고등학교(Daejeon Daeshin High.) A.C.T.(KE)

ABSTRACT: 본 연구에서는 풍력과 태양광 발전으로 대표되는 재생에너지 변동성의 등장 배경과 동향을 이해하고, 재생에너지를 선도적으로 보급한 독일과 아직 보급 확대가 필요한 한국을 대상으로 풍력·태양광 발전 변동성이 기성 전력원의 순부하 분산에 미치는 영향을 비교 분석하고자 한다. 이를 위해 독일의 OPSD 공개 시계열 데이터와 한국전력거래소 공개 데이터를 활용하여 시간별 부하와 풍력·태양광 발전량으로부터 순부하를 정의하고, 풍력·태양광 출력에 대한 가중치를 변수로 하는 2 차 손실함수 $L(w)$ 를 설정한 뒤 경사하강법을 이용해 순부하 분산을 최소화하는 최적 가중치를 추정한다. 도출된 최적 가중치와 등고선 분석을 통해 두 나라의 재생에너지 패턴과 설비 비중 차이가 계통 변동성에 어떤 차이를 만들어 내는지 정량적으로 비교하고, 그 결과를 바탕으로 한국이 향후 풍력·태양광 보급 확대와 함께 에너지저장장치, 수요반응, 유연한 발전자원 등을 어떻게 조합해야 독일과 같은 안정적인 에너지 전환을 달성할 수 있을지에 대한 정책·기술적 시사점을 제시하는 것을 목표로 한다.

I. 서론

(1) 연구 배경

오늘날 전 세계 전력 부문은 탄소중립을 목표로 석탄·가스 중심의 발전 구조에서 재생에너지 중심 구조로 빠르게 전환하고 있다. 특히 풍력과 태양광 발전은 짧은 건설 기간과 비용 하락으로 가장 빠르게 보급되는 에너지원이 되었지만, 자연조건에 따라 출력이 시시각각 변한다는 특성 때문에 전력계통의 안정성 측면에서 새로운 도전 과제를 만든다. 독일은 일찍부터 재생에너지 확대 정책을 추진해 최근 전력 생산에서 재생에너지가 매우 높은 비중을 차지하는 대표적 국가이며, 대규모 풍력·태양광 출력과 함께 계통 연계, 유연한 발전 자원, 저장장치 등을 도입하며 변동성을 관리해 온 사례로 평가된다. 반면 한국은 재생에너지 설비는 증가하고 있으나 실제 전력 생산에서 차지하는 비중은 아직 낮은 수준에 머물러 있고, 전력망 혼잡과 입지 규제, 제도적 한계 등으로 재생에너지의 잠재력이 충분히 활용되지 못하고 있다는 지적을 받고 있다. 이러한 상황에서 “재생에너지를 늘리면 오히려 계통이 더 불안정해지는 것 아니냐”는 우려와, “적절한 설계와 보조 수단을 통해 재생 확대와 안정 운전을 동시에 달성할 수 있다”는 주장 사이의

논쟁이 지속되고 있다. 따라서 실제 시계열 데이터를 활용해 풍력·태양광 출력이 기존 기저·석탄·가스 발전이 부담하는 순부하(net load)의 변동성에 어떤 영향을 주는지를 정량적으로 분석하는 작업이 필요하다.

(2) 연구 목적

본 연구의 목적은 독일과 한국의 시간별 전력 부하 및 풍력·태양광 발전 데이터를 활용하여, 재생에너지 출력의 가중치를 어떻게 설정할 때 기존 전력원이 담당해야 하는 순부하의 변동성이 최소화되는지를 수학적으로 분석하고, 이를 통해 한국 계통에 적합한 재생에너지 운영 방향을 모색하는 데 있다. 이를 위해 독일은 OPSD(Open Power System Data) 공개 시계열 자료를, 한국은 한국전력거래소(KPX) 공개 데이터를 사용하여 두 나라 모두에 대해 시간별 부하(load)와 풍력(wind), 태양광(solar) 데이터를 정리하고, 순부하를 $net_load = load - (w_wind \cdot wind + w_solar \cdot solar)$ 로 정의한다. 이후 순부하의 제곱평균을 손실함수 $L(w)$ 로 두어 2 차 함수 형태의 모형을 구성하고, 경사하강법을 이용해 손실을 최소화하는 최적 가중치 (w_wind^* , w_solar^*)를 추정한다. 이 과정에서 등고선 그래프와 (0,0), (1,1), (w^*) 조건의 순부하 분산 비교를 통해 독일과 한국이 재생에너지 패턴 및 비중의 차이로 인해 어떤 다른 결과를 보이는지 시각적으로 제시하고, 마지막으로 이러한 분석을 바탕으로 한국이 재생에너지 입지·패턴 설계, 에너지저장장치와 수요반응, 유연한 발전자원 확충 등을 통해 순부하 변동성을 관리하면서도 재생에너지 확대를 달성하기 위한 방향을 제안하고자 한다.

(3) 이론적 배경

전 세계 전력 부문은 화석연료 사용에 따른 탄소배출과 기후위기 문제로 인해 재생에너지 비중을 빠르게 확대하고 있다. 특히 풍력과 태양광은 설비 단가 하락과 기술 발전으로 보급이 급격히 늘어, 독일과 같은 국가에서는 이미 전력 생산의 절반 이상을 재생에너지가 담당하는 수준에 도달하였다. 예를 들어 독일은 2023 년 기준 공공 전력생산에서 재생에너지 비중이 약 60%에 이르며, 풍력·태양광이 계통 운영의 핵심 자원이 되었다는 분석이 보고되고 있다. 이러한 높은 재생에너지 비중은 화석연료 발전을 대체하는 긍정적인 효과를 가져오는 동시에, 기상 조건에 따라 출력이 시시각각 변하는 풍력·태양광의 특성 때문에 전력계통의 “순부하(net load)” 곡선을 크게 흔들 수 있다는 도전 과제를 만든다. 이로 인해 여러 연구에서

시간별 부하와 재생에너지 출력 데이터를 활용해 순부하의 변동성, 피크 시점, 램핑(ramping) 부담 등을 분석하며, 어떤 재생에너지 조합이 계통에 더 유리한지 평가하는 시도가 이루어지고 있다. OPSD(Open Power System Data)와 ENTSO-E 등의 공개 시계열 데이터는 이러한 분석의 대표적인 기반 자료로 널리 활용된다.

반면 한국은 태양광·풍력 설비가 빠르게 증가하고 있음에도, 실제 전력 생산에서 재생에너지가 차지하는 비중은 아직 주요 선진국에 비해 낮은 수준이며, 석탄·가스·원전 중심의 발전 구조가 여전히 강하게 유지되고 있다는 지적을 받고 있다. 2022년 기준 한국의 재생에너지 전력 비중은 약 9% 수준으로, 독일 등과 비교할 때 “재생에너지를 본격적으로 계통 중심에 편입하기 전 단계”에 머물러 있는 것으로 평가된다. 최근에는 재생에너지 확대 계획과 함께 송전망 포화, 접속 대기, 출력 제한(curtailment) 문제, 전력시장 구조 한계 등이 동시에 논의되면서, “한국에서 재생에너지 확대가 순부하 변동성을 악화시키는 것 아니냐”는 우려와 “오히려 잘 설계된 재생에너지 믹스와 보조자원을 통해 계통을 안정화할 수 있다”는 견해가 맞서는 상황이다. 이에 따라 한국전력거래소(KPX) 공개 데이터와 같이 실제 시간별 부하 및 재생발전량 데이터를 활용해, 재생에너지 도입이 순부하에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 최적의 운영 조건을 탐색하려는 연구의 필요성이 커지고 있다.

이때 핵심 개념이 “순부하(net load)”이다. 순부하는 전체 전력 수요(load)에서 풍력·태양광 등 변동성 재생에너지 출력을 제외한 값으로, 실제로 화력·원전·가스·수력·에너지저장장치(ESS) 등 조절 가능한 전원이 부담해야 하는 실질적인 부하를 의미한다. 풍력·태양광 비중이 커질수록 이 순부하 곡선은 “오목한 낮 시간, 가팔라진 저녁 피크”와 같은 새로운 형태(일명 duck curve)를 보이기 쉽고, 이는 기성 전원과 계통 운영자의 대응 능력을 시험하는 지표가 된다. 이러한 배경에서 다양한 선행연구들은 풍력·태양광 발전량과 부하의 상관관계를 분석하고, 순부하의 분산·램핑 속도·피크 높이 등을 최소화하는 재생에너지 조합 및 보조자원 구성을 모색하고 있다. 본 연구는 이러한 흐름 속에서, 독일(OPSD)와 한국(KPX)의 시간별 부하·풍력·태양광 데이터를 기반으로 순부하를 수학적으로 모델링하고, 풍력·태양광 출력에 대한 가중치 (w_{wind} , w_{solar})를 변수로 하는 2차 손실함수와 경사하강법을 적용하여 “순부하 변동성을 최소화하는 재생에너지 가중 조합”을 탐구하는 데 그 이론적 기반을 둔다.

II. 본론

1. 독일과 한국의 재생에너지 근황

독일은 재생에너지 확대를 가장 적극적으로 추진한 국가 중 하나로, 이미 전력 부문에서 “재생에너지가 중심”인 체제로 넘어가고 있다. 2024년 기준 독일의 공공 전력 생산에서 재생에너지가 차지하는 비중은 약 60%를 넘겼으며, 이 중 풍력과 태양광이 핵심 역할을 한다. 여러 분석에 따르면 2024년 독일의 재생에너지 비중은 순공급 기준 약 62.7%에 달하며, 풍력이 최대 전원, 태양광이 그 뒤를 잇고, 석탄 발전 비중은 계속 감소하는 추세를 보인다. 이렇게 높은 재생 비중에도 독일 계통이 유지되는 것은, 유럽 국가 간 전력망 연계, 가스·수력 등 유연한 발전원, 에너지저장장치, 시간대별 전력시장제도 등을 함께 발전시켜 변동성을 흡수하는 제도·기술적 기반을 구축해왔기 때문이다. 따라서 독일은 “재생에너지 확대와 계통 안정 운용을 동시에 시도한 선행 사례”로, 본 연구에서 비교 기준이 되는 국가이다.

반면 한국은 재생에너지 설비 용량이 빠르게 증가하고 있음에도 전력 생산에서 차지하는 비중은 아직 낮은 편이다. 2023년 기준 한국의 재생에너지 발전 비중은 대략 한 자릿수 중후반 수준에 머물고, 이 가운데 대부분이 태양광과 수력에 치우쳐 있으며 풍력 비중은 매우 제한적이다. 국제 비교에서 한국은 OECD 국가 중 재생에너지 전력 비중이 가장 낮은 그룹에 속해 있고, 정부는 2030년경까지 재생에너지 비중을 20%대 초반 수준으로 끌어올리는 계획을 제시했으나, 송전망 포화, 인허가 규제, 전력시장 구조, 장기 계약(PPA) 미비 등으로 목표 달성에 어려움을 겪고 있다는 평가가 나온다. 이러한 상황에서 한국은 재생에너지를 “얼마나 많이 넣을 것인가”뿐 아니라, 독일과 달리 아직 낮은 재생 비중과 제한된 입지·패턴 속에서 풍력·태양광이 순부하 변동성에 어떤 영향을 주는지를 정량적으로 확인하고, 향후 어떤 방식으로 믹스를 설계해야 계통 안정성과 탈탄소를 함께 달성할 수 있을지에 대한 분석이 필요한 시점이다. 본 연구는 바로 이 지점을 겨냥해, 독일과 한국의 실제 시계열 데이터를 이용해 두 나라의 재생에너지 구조 차이를 순부하 분산 관점에서 비교하는 데에 그 의의를 둔다.

2. 독일의 최적 가중치 추정 결과

OPSD 에서 독일 2019 년 시간별 부하(load), 풍력(wind), 태양광(solar) 데이터를 불러오고, 필요한 기간만 선택한 뒤 결측치를 제거하고 표준화한다. 이걸로 load, wind, solar 세 개의 깨끗한 시계열을 만든다

순부하와 손실함수 정의

가중치 $w = (w_wind, w_solar)$ 를 줄 때 순부하는

$$net_load(w) = load - (w_wind * wind + w_solar * solar)$$

로 정의한다. 순부하의 흔들림(변동성)을

$$L(w) = \text{mean}(net_load(w)^2)$$

로 두고, 이 값을 최소화하는 w 를 찾는 것이 목표이다.

최적 가중치 계산

현재 w 에서의 $L(w)$ 에 대한 기울기(gradient)를 계산한 뒤,

$$w \leftarrow w - \alpha * \text{grad}(L)$$

공식을 여러 번 반복해 w 를 갱신한다. 이렇게 해서 순부하 분산을 최소로 만드는 최적 가중치 (w_wind^* , w_solar^*)를 구한다.

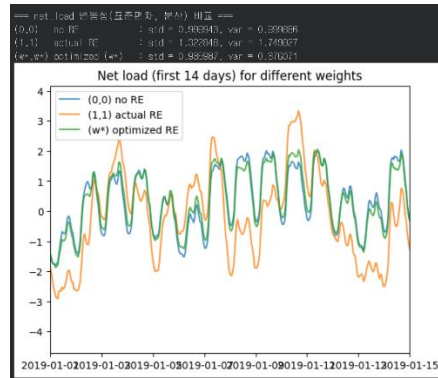
시각화 및 비교

등고선 그래프: 여러 (w_wind , w_solar)에 대한 $L(w)$ 를 계산해 그리면 타원 모양 등고선이 나오고, 그 중심점이 최적 w^* 임을 보여준다.

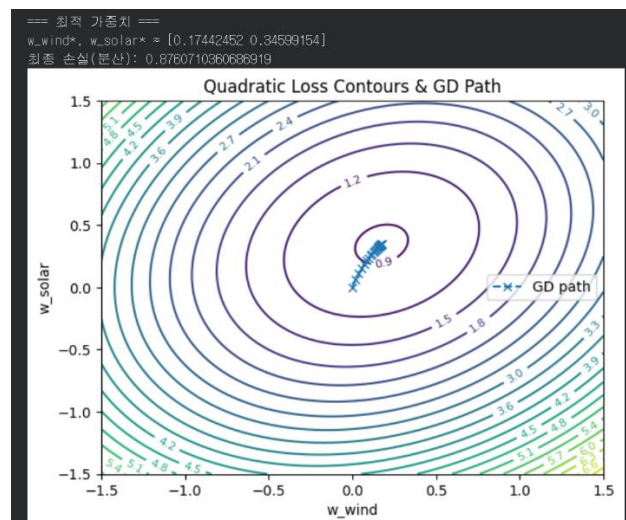
GD 경로: 갱신된 w 값을 등고선 위에 표시해, 경사하강법이 바깥에서 중심으로 수렴하는 과정을 시각적으로 확인한다.

(0,0), (1,1), (w^*) 각각에 대해 net_load 의 표준편차/분산을 계산해, 재생 없음, 실제 값, 최적 가중치 적용 시 순부하 변동성을 직접 비교한다.

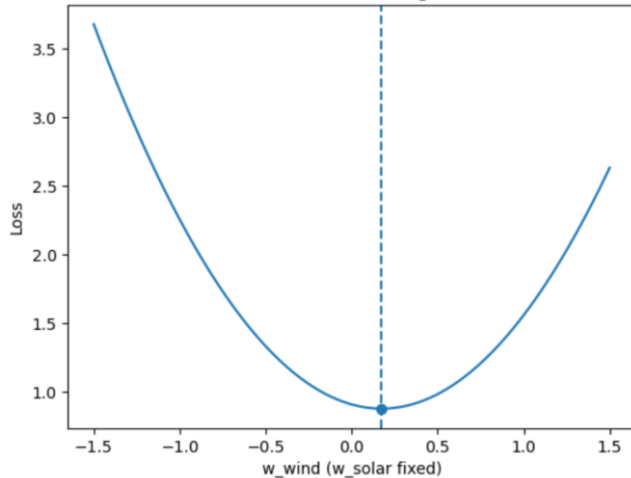
OPSD 독일 2019 년 시계열 데이터를 이용해 손실함수 $L(w) = \text{mean}((\text{net_load}(w))^2)$ 를 최소화한 결과, 풍력과 태양광의 최적 가중치는 약 $w_wind^* \approx 0.17$, $w_solar^* \approx 0.35$ 로 추정되었다. 이는 표준화된 데이터 기준으로 풍력·태양광 출력의 약 17%, 35% 수준을 순부하 계산에 반영할 때, 기존 발전원이 부담하는 순부하의 흔들림이 가장 작아진다는 의미이다.



세 가지 경우의 순부하 변동성을 비교하면, 재생을 고려하지 않은 (0,0)에서 표준편차가 약 1.00, 실제 출력 그대로 반영한 (1,1)에서는 약 1.32로 오히려 변동성이 크게 증가한다. 반면 최적 가중치 (w^* , w^*)를 적용하면 표준편차가 약 0.94로 감소하여, (0,0) 대비 약 6% 정도, (1,1) 대비 약 29% 정도 순부하 변동성이 줄어드는 것으로 나타난다. 첫 번째 그래프(Net load first 14 days)는 이를 시각적으로 보여 주는데, 주황색 (1,1) 곡선이 가장 요동이 심하고, 초록색 (w^*) 곡선은 파란색 (0,0)보다 피크와 골이 약간 완화된 형태를 보인다.



Parabolic Cross-section (Single Minimum)



포물선 단면 그래프(Parabolic Cross-section)는 w_{solar} = w_{solar} ²로 고정했을 때 손실 $L(w)$ 가 w_{wind} 에 대해 U자 모양의 2차 함수가 되며, 그 바닥 지점이 w_{wind} ² ≈ 0.17 임을 보여준다. 이는 손실함수가 볼록하고 최소값이 하나뿐이라, 이 지점이 전역 최적이라는 것을 의미한다. 등고선 그래프(Quadratic Loss Contours & GD Path)에서는 손실값이 같은 점들을 이은 타원형 등고선 안쪽으로 경사하강법 경로(GD path)가 수렴하는 모습이 나타나는데, 초기 (0,0)에서 출발한 점들이 반복 계산을 통해 점차 중심부 (0.17,0.35)로 모여 들어가며 최적 해를 찾고 있음을 확인할 수 있다.

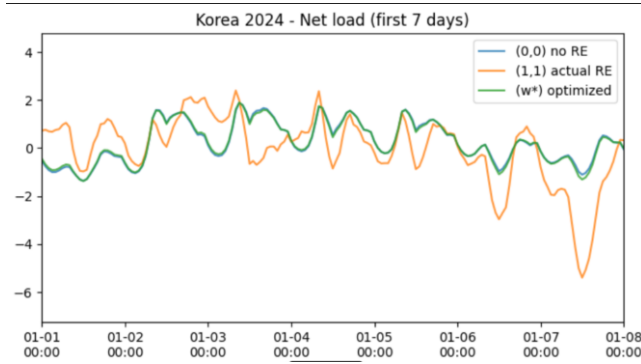
종합하면, 독일 데이터에서는 “재생을 전혀 쓰지 않는 경우”나 “현재 출력 그대로 100% 반영하는 경우”보다, 풍력과 태양광의 기여를 일정 비율로 조정할 때 순부하 변동성이 가장 작아진다. 이는 풍력·태양광 출력 패턴과 부하 패턴 사이에 유의미한 상관관계가 존재하며, 적절한 비중과 운영 방식을 선택하면 재생에너지가 오히려 기존 발전의 부담을 완화하는 방향으로 작용할 수 있음을 보여준다.

3. 한국의 최적 가중치 추정 결과

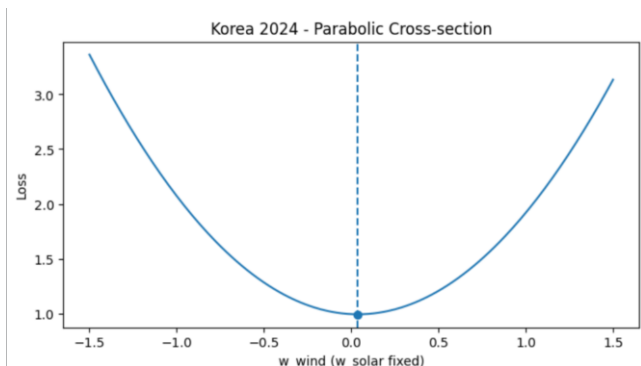
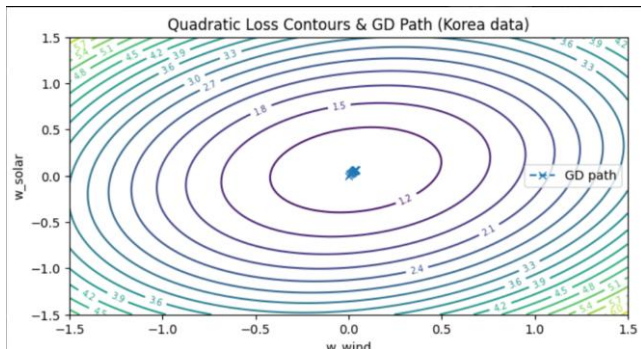
[illegible]

*코드 설명 생략

한국전력거래소 2024 년 시간별 부하와 태양광·풍력 발전량 데이터를 동일한 방식으로 전처리하고, 순부하 손실함수 $L(w) = \text{mean}(\text{"net_load"}(w)^2)$ 를 최소화한 결과, 한국의 최적 가중치는 $w_{\text{"wind"}} \approx 0.08$, $w_{\text{"solar"}} \approx 0.06$ 으로 추정되었다. 이는 표준화된 기준에서 풍력과 태양광을 순부하 계산에 “아주 조금만” 반영하는 것이 수학적으로 가장 안정적인 조합이라는 뜻이며, 최적점이 (0,0)과 매우 가깝다는 점이 특징이다.



세 가지 경우의 순부하 변동성(표준편차, 분산)을 비교하면, 재생을 전혀 고려하지 않은 (0,0)은 $\text{std} \approx 0.9999$, 실제 발전량을 그대로 반영한 (1,1)은 $\text{std} \approx 1.57$ 로 오히려 변동성이 크게 증가한다. 반면 최적 가중치 (w^*)를 적용한 경우 $\text{std} \approx 0.9976$ 으로 (0,0)와 거의 동일하고, 개선 폭도 매우 작다. 첫 7일간 순부하 그래프를 보면 주황색 (1,1) 곡선은 깊은 골과 큰 피크가 나타나지만, 파란색 (0,0)과 초록색 (w^*) 곡선은 거의 포개져 있어, 현재 한국의 풍력·태양광 패턴은 이 단순 모형에서 순부하를 눈에 띄게 평탄화하지 못하고 있음을 보여준다.



포물선 단면 그래프(Korea 2024 - Parabolic Cross-section)는 $w_{\text{solar}} = w_{\text{solar}}^2$ 로 고정했을 때 손실이 $w_{\text{wind}} \approx 0$ 부근에서 최소가 되는 U 자형 곡선임을 나타낸다. 등고선 그래프(Quadratic Loss Contours & GD Path)는 손실함수의 타원형 등고선 중심이 원점 근처에

위치하고, 경사하강법 경로가 (0,0) 부근의 최적점으로 빠르게 수렴하는 모습을 보여준다. 정리하면, 2024 년 한국 데이터와 본 연구의 단순 선형 모형 기준에서는 “풍력·태양광을 현재 형태로 크게 반영할수록 순부하 변동성이 줄어들기보다는 증가하는 경향”이 나타나며, 그 결과 최적 가중치가 거의 0 에 머무는 것으로 분석된다. 이는 재생에너지가 불필요하다는 의미가 아니라, 한국에서는 재생 설비의 입지·시간 패턴과 함께 저장장치·수요반응 등 보조 수단을 설계하지 않으면, 단순 확대만으로는 순부하 평탄화 효과를 얻기 어렵다는 점을 시사한다.

4. 재생에너지의 변동성 문제를 우리나라에서 완화 시킬 해결방안을 제시

앞선 분석에서 한국 2024 년 데이터는 풍력·태양광을 현재 패턴 그대로 크게 반영하면 순부하 변동성이 오히려 커지고, 경사하강법으로 찾은 최적 가중치도 (0,0)에 매우 가까운 것으로 나타났다. 이는 “재생이 나쁘다”가 아니라, 현 구조 그대로 용량만 늘리면 기성 전원이 감당해야 할 순부하가 더 요동친다는 경고다. 따라서 한국은 재생에너지 확대와 동시에 변동성을 흡수·조정할 장치를 함께 설계해야 한다. 아래에서는 제도, 사회, 기술 측면에서 핵심 방향을 정리한다.

1. 제도적 측면

시간별·지역별 가격(동적 요금제, 피크·혼잡 반영)을 강화해, 재생 출력이 많을 때는 소비·저장을 유도하고, 부족할 때는 절감을 유도하도록 해야 한다. 독일·EU 처럼 가격 신호로 유연성을 끌어내는 방식은 검증된 수단이다. 재생 curtailment(출력 제한)를 줄이기 위해, 혼잡 구간에 ESS·수요반응이 참여할 수 있도록 정산·보상 규칙을 명확히 하고, 필요시 합리적 보상체계를 도입해 예측 가능한 투자 환경을 만든다.

2. 사회적 측면

풍력·송전선 반대의 큰 이유는 “피해는 주민, 이익은 외부” 구조다. 주민 지분 참여, 발전 수익 공유, 지역 상생기금 등으로 지역 수용성을 높이면, 입지를 다양화해 재생 출력 패턴을 분산시킬 수 있다. 또한 가정·건물·산업체가 DR, 자가용 ESS, V2G 등에 참여하면, 소비 패턴 자체가 유연성이 된다. 이를 위해 참여 절차 단순화, 인센티브 명확화, 교육·홍보를 강화해야 한다.

3. 기술적 측면

풍력·태양광이 많이 나올 때 ESS 에 저장하고, 순부하가 급상승하는 시간에 방전하면, 우리가 정의한 $\text{net_load}(w)$ 를 직접 평탄화할 수 있다. 독일 등에서도 대규모 배터리와 양수발전이 이런 역할을 수행하며,



최근 한·독 비교 연구도 한국 계통에 ESS 확충이 필수라고 지적한다.

한국에서는 과거 ESS 화재 이후 REC 인센티브 축소 등으로 투자가 위축되었으므로, 안전기준 강화와 함께 “피크 감축·재생 연계·보조서비스 제공” 등 실질 기여도에 따라 수익을 얻는 새로운 시장 설계를 통해 ESS를 다시 활성화해야 한다.

이를 위해 대형 공장·데이터센터·빌딩의 DR, 가정용 태양광·ESS, 전기차(V2G)를 묶어 VPP로 운영하면, 실시간으로 출력과 부하를 조정해 순부하의 급격한 변화(우리 손실함수 $L(w)$)를 줄일 수 있게 해야 한다.

III. 결과

본 연구는 독일과 한국의 시간별 부하 및 풍력·태양광 발전 데이터를 이용하여, 순부하의 제곱평균을 손실함수로 두고 경사하강법으로 재생에너지 가중치를 추정하는 탐구이다. 독일의 경우, 적절히 조정된 풍력·태양광 비중을 적용하면 순부하의 요동이 줄어들 수 있음을 확인할 수 있었고, 이는 높은 재생 비중과 유연한 계통 운영이 결합될 때 기존 발전기의 부담을 완화할 수 있음을 시사한다. 반면 한국 데이터에서는 최적 가중치가 거의 “재생 비중을 크게 반영하지 않는 영역”에 머무르며, 현재의 재생에너지 패턴만으로는 순부하 평탄화 효과가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이 결과는 재생에너지 확대를 부정하기보다, 입지와 시간 패턴을 다양화하고, 에너지저장장치(ESS), 수요반응(DR), V2G, 가상발전소(VPP) 등 유연성 자원을 함께 도입하는 제도·기술 설계가 필요하다는 점을 보여준다. 결국 한국 전력계의 과제는 재생에너지를 “단순히 많이 만드는 것”이 아니라, 이러한 수단을 통해 실제 운영에서 순부하를 안정적으로 관리할 수 있는 구조를 만드는 데 있으며, 본 탐구는 공개 데이터와 기본적인 최적화 기법을 이용해 그 방향성을 정량적으로 제시했다는 점에서 의의를 가진다.

참고 문헌

1. 독일 opsd_de_2019 풍력 태양광 시계열 데이터
2. Kaggle Dataset: 한국전력거래소_지역별 시간별 태양광 및 풍력 발전량_20241231
3. Kaggle Dataset: 한국전력거래소_시간별 전국 전력수요량_20241231
4. 수학 2 다변수 미적분학(정문자)