

풍력과 태양광의 변동성에 따르는 통합 비용

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 신호순
(0637shin@reseat.re.kr)

1. 머리말

- 풍력 터빈과 태양광 발전은 다른 분야의 투자에서와 같이 자본과 운영비 형태의 직접비를 발생시킨다. 이들 비용은 에너지 균등화 비용 또는 균등화 전력비용(LCOE: Levelized Cost Of Electricity)으로 불리는 평균 할인 생애 비용(average discounted life-time costs)으로 집계될 수 있다.
- 풍력과 태양광 발전 등 변동성 재생에너지(VRE: Variable Renewable Energy)를 전력시스템에 통합시키는 경우, 시스템에 비용이 발생된다. 예를 들면 송배전망, 단기 균형(short-term balancing)서비스, 예비 용량 제공, 기존 발전소의 가동 유연성 등에서 발생하는 비용이다. 이들은 총 경제적 비용 산출 시 풍력과 태양광 발전의 직접비에 합산해야 한다. 통합 비용은 정책 결정, 시스템 계획과 관련이 있고, 이들을 무시하거나 과소평가하면 최적의 전원 구성과 시스템 변환 비용 산출에 있어 적합한 결론을 얻을 수 없다.

2. 통합 비용의 새로운 정의

- 통합 비용은 경제성 평가에 활용될 수 있게 경제성과 포괄성을 유지하는 것이 필요하다. 통합 비용은 €/MWh의 단위로 VRE 전력의 한계 경제적 가치(marginal economic value)로부터 도출된다. 한계 경제적 가치는 풍력발전이 1MWh 증가할 때 증가하는 혜택(welfare)이다. 시장 가치는 투자자가 전력시장에서 판매를 통해 얻는 수입(€/MWh)이다. 여기에는 보조금 등은 포함되지 않는다.
- 풍력의 통합 비용은 부하 가중 평균 전력 가격(load-weighted average

electricity price)에서 풍력의 시장 가치를 제한 값으로 정의한다. 이 정의는 시장 가치를 감소시키는 모든 특성의 경제적 영향을 반영하므로 보편성을 갖는다. 통합 비용은 VRE 기술 특성뿐 아니라 통합 상대인 전력시스템, 그리고 전력시스템의 수용 유연성에도 영향을 받는다.

3. 통합 비용의 분해(decomposing)

- 통합 비용 분해는 VRE를 더 효율적으로 공급하기 위하여 주요 원가 요인을 확인하고 통합 선택(예를 들면 전력 저장 대 송전망의 예측 틀)의 우선순위를 정하는데 도움을 준다. VRE의 기본 특성으로는 불확실성(uncertainty), 입지의 특수성(locational specificity), 변동성(variability)을 들 수 있다.
- 불확실성의 영향은 균형 비용(balancing cost), 입지의 영향은 전력망 관련 비용(grid-related cost), 시간 변동성은 프로파일 비용(profile cost)이라고 부른다. 균형 비용은 1일 선행 발전 계획과의 차질로 인한 VRE 시장 가치의 감소(예를 들면 예측 오류)이다. 전력망 관련 비용은 전력망 내에서 발전 현장 위치에 따르는 시장 가치의 감소이다. 프로파일 비용은 발전 타이밍이 시장 가치에 영향을 끼치는 비용이다.

4. 통합 비용의 기술적 토대

- 균형 비용
 - VRE 발전은 가격 예측 오류의 결과로 실시간 가격이 하락한 시점에 불균형적으로 많은 전력을 발전하는 경향이 있다. 이에 따른 시장 가치의 감소가 균형 비용을 의미한다.
 - 다음 3가지 근본적인 기술적 원인이 균형 비용을 발생시킨다. (i) AC 전력시스템의 주파수 안정성을 위해서는 항상 공급과 수요가 높은 정밀도로 균형이 유지돼야 한다. (ii) 화력발전소의 출력 조정은 비용 상승을 일으킨다. (iii) 인근 단지 간의 기후는 서로 비슷하고 운영자도 유사한 예측 틀을 사용하므로 개별 풍력(태양 광) 발전의

예측 오류는 서로 상관관계가 있다.

○ 전력망 관련 비용

- 전력망 관련 비용은 송전 시의 제약 및 손실의 한계 비용이다. 이 비용은 입지에 따른 가격 차로 반영된다. VRE 발전은 낮은 전기요금 지역에서 더 많은 전력을 생산하는 경향이 있다. 이러한 시장 가치의 감소는 전력망 관련 비용이 된다. 전력망 관련 비용에는 근본적으로 3가지의 기술적 이유가 있다. (i) 송전망은 투자비용이 크므로 이용에 제약이 크다. (ii) 송전에는 손실이 따른다. (iii) VRE 발전 비용은 풍력자원의 질과 토지 가격 차이로 인해 지리적으로 다양하게 변한다.

○ 프로필 비용

- 프로필 비용은 VRE 출력의 시간 변동성의 한계 비용이다. 이 비용은 하루 전 현물 가격 구조에 반영되고 풍력이나 태양광 전력의 감소된 '에너지 가치'로 나타난다. VRE 발전은 값싼 전력가격 시간대에서 불균형적으로 더 많은 전력을 생산하는 경향이 있다. 이러한 시장 가치의 감소가 프로필 비용이다.
- 유연성 효과(flexibility effect) : 프로필 비용 발생의 원인 중 하나는 화력발전소의 출력 조절 비용이다. 발전소의 출력변화는 비용을 증가시키는 램핑과 사이클링(ramping and cycling)을 일으키고, 램핑 제한은 크게 변화하는 잔여 부하(정미 VRE 발전부하)를 추종할 수 있도록 발전소의 부분 부하 운전이 필요하다. 이것을 유연성 효과라고 한다.
- 활용 효과(utilization effect) : 프로필 비용의 성질을 보다 더 이해하기 위하여 모든 발전소가 비용 없이 램프 및 사이클링을 할 수 있다고 가정하면 유연성 효과가 사라진다. 그러나 풍력과 태양광 발전 시장가격은 흔히 평균 전력가격보다 낮고 보급 증가와 함께 감소한다. 이들 비용은 화력발전소의 활용 감소가 원인이다.
 - VRE 적용이 40%까지 올라가면 화력발전의 활용도는 47%까지 감소한다. 감소한 활용도는 특정 자본 비용(€/MWh)을 증가시킨다. 석탄 화력발전의 연간 환산 자본 비용을 €200/MWh으로 가정하

면 활용도 감소가 화력발전 자본 비용을 €33/MWh에서 €49/MWh로 끌어 올린다.

5. 문헌에서 정량화

- 균형 비용: 균형 비용의 최근 조사는 VRE 보급률이 20%일 때 화력발전 시스템에서 2~4€/MWh이고 수력발전시스템에서는 1€/MWh 미만이다. 균형 비용은 주로 풍력발전이 예비 요구량을 증가시키기 때문에 발생한다.
- 전력망 관련 비용: 영국에서 전력망 관련 비용은 20%의 풍력 보급률에서 0.9£/MWh이고, 아일랜드는 30~40% 보급률에서 약 3€/MWh라고 발표했다. 독일은 10€/MWh로 추정된다.
- 프로필 비용: 풍력 프로필 비용은 낮은 보급률에서 0이고 30~40% 시장 점유율에서 약 15~25€/MWh이다.
- 통합 비용
 - 평균 전력 가격이 약 70€/MWh일 때 화력발전시스템에서 3가지 비용 요소를 모두 더하면 30~40% 보급률에서 약 25~35€/MWh이다. 즉 풍력 전력은 동일 조건에서 35~45€/MWh의 가치만 있으므로 평균 전력가격 보다 35~50% 낮다. 이것은 통합 비용이 직접 발전비용을 35~50% 증가시키는 것을 의미한다.
 - 높은 보급률에서 통합 비용 가운데 약 2/3 는 프로필 비용이다. 1%의 풍력 보급률의 증가가 프로필 비용을 0.5€/MWh 만큼 증가시키고 균형 비용보다 거의 10배 더 많다.

6. 맺음말

- 이 글은 변동이 심한 재생에너지를 위한 평가 체제를 제안하고 통합 비용의 새로운 관점을 제공한다. 통합 비용은 풍력터빈이나 태양전지의 수준에서는 발생되지 않지만 전력시스템의 다른 곳에서는 발생한다. 통

합 비용은 평균 전력 가격과 풍력(또는 태양광) 전력의 시장 가치의 격차로 정의한다.

- 균형 비용을 일으키는 불확실성, 전력망 관련 비용을 일으키는 입지의 경직성 및 프로필 비용을 일으키는 시간 변동성의 3가지 VRE의 고유 속성을 따라 통합 비용을 분해했다. 연구는 정의, 방법론, 집중 영역 및 품질에서 상당한 편차를 보여서 결과는 조심스럽게 설명되어야 한다. 더구나 큰 범위의 추정치는 방법론과 파라미터의 상당한 불확실성을 입증한다. 하지만 저자들은 다음과 같이 요약한다.
 - 풍력과 태양전지 발전이 대규모로 배치되면 통합 비용은 높아진다. 화력발전이 풍력을 통합하는 비용은 70€/MWh의 기본 가격을 가정하면 30~40% 보급에서 약 25~35€/MWh이다. 즉, 통합 비용이 발전비용의 35~50%이나 된다.
 - 통합 비용은 높은 수준이므로 비용-혜택 분석이나 시스템 최적화에서 이 비용을 무시하면 결과에 큰 차이를 가져온다. 통합 비용은 전력시스템과 VRE 보급에 영향을 받는다. 통합 비용은 낮은 보급(<10%)에서는 별 영향이 없을 수 있다. 일반적으로 이 비용은 보급 상승과 함께 증가하고, 흔히 화력 보다 수력에서 작다.
 - VRE 이용이 높은 화력발전 시스템에서 이용 효과는 모든 통합 비용의 반 이상에 달한다. 이것이 이 연구의 가장 중요한 발견일 수 있다. 통합 비용 중 가장 큰 구성은 발전시스템에 포함된 자본투자의 효과 감소이다. VRE가 높은 발전시스템에는 유연한 화력발전소가 필요하다. 하지만 보다 더 자본 비용이 낮은 발전소가 필요하다.

출처 : Lion Hirth, Falko Ueckerdt, Ottmar Edenhofer, "Integration costs revisited - An economic framework for wind and solar variability", *Renewable Energy*, 74, 2015, pp.925~939

◁ 전문가 제언 ▷

- 풍력과 태양광 발전의 전력시스템에의 통합은 전력망, 균형 잡힌 서비스, 화력발전소의 유연한 운영, 인프라에 투자된 자본 활용의 감소로 인해 통합 비용을 발생시킨다. 이 글은 이들 비용을 분석하고 정량화하기 위한 체계를 마련한다.
- 통합 비용은 풍력과 태양광 발전의 주요 특징에 따라 시간 가변성, 불확실성 및 위치 제약의 세 가지 구성 요소로 분해될 수 있다. 30~40%의 높은 재생에너지 보급률에서 통합 비용은 25~35€/MWh로 발전비용의 50%인 것으로 알려져 있다. 이와 같이 높은 수준의 재생에너지 보급률에서의 통합 비용은 필히 고려되어야 한다. 통합 비용 중 가장 큰 부분은 대부분의 이전 통합 연구에서 설명되지 않은 화력발전소 건설에 투입된 자본의 활용 감소로 인해 발생하는 비용이다.
- 이 글의 통합 비용 연구에서 다른 논문에서 설명되지 않은 화력발전소에 투입된 자본의 활용 감소를 거론한 것은 통합 비용이 VRE의 높은 보급률에서 통합 비용 가운데 약 2/3가 프로필 비용인 만큼 매우 큰 의미가 있다. 앞으로 우리나라의 재생에너지 통합을 계획 시 이 비용을 반드시 감안해야 한다.
- 비용 효과 분석은 설치된 풍력 발전이 에너지 저장의 증가로 운영비가 절감되는 것을 보여 주었으나 에너지 저장 장치의 대형 투자비를 고려하면 수익성이 있는 개발이 아니다. 열병합발전(CHP: Combined Heat and Power) 설비에 열 보일러를 설치하는 것은 네덜란드의 경우, 대규모 풍력 터빈의 통합을 위한 유망한 해법이다.
- 풍력과 태양광 발전의 통합 비용에 관한 다수의 외국 문헌에 비해 국내 논문은 전무한 상태이다. 풍력과 태양광 발전은 원자력과 더불어 우리나라의 온실가스로 인한 기후변화 대응에 있어서 중요한 에너지원이다. 경쟁력 있는 에너지원의 개발을 위해 풍력과 태양광 발전의 통합 비용에 대한 심도 있는 연구가 추진되어야 한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.