

여러가지 발전소의 LCOE 비교

오성민, 박현진, 최소율, 허치영

표선고등학교

인류가 전기를 생산하는 다양한 발전 방식 중 가장 효과적이고, 현실적이며, 효율이 뛰어난 방식은 무엇일까? 천연가스, 원자력, 태양광, 풍력 네 가지 발전 방식의 LCOE(균등화 발전 비율)를 계산하여 각 방식의 효율을 계산하고, 그 결과를 비교한다. 이에 멈추지 않고 현재 핵심 기술의 발전 동향 파악을 통해 미래에서의 활용을 예측까지 나아간다.

서론 (Introduction)

인류는 다양한 발전 방식을 통해 전기를 생산하고 있다. 한 가지의 통일된 방식이 아닌 다양한 방식으로 전기를 생산하는 이유는 무엇일까? 그 중에서도 더욱 효과적이고, 현실적이며, 효율이 뛰어난 방식이 분명히 존재하지 않을까? 이 연구에서는 이와 같은 물음을 해결하기 위해 에너지 효율 지표인 'LCOE(균등화 발전 비율, Levelized Cost Of Electricity)'의 계산 방식을 활용하여 천연가스와 원자력, 태양광, 풍력 네 가지의 발전 방식에 대한 효율성을 비교한다.

한국전력공사의 '2022년 한국전력통계'에 따르면 2022년 대한민국 사업자가 생산한 발전전력량의 총합인 594,400 GWh 중 천연가스, 원자력, 태양광 발전이 원자력 발전은 176,054 GWh(29.62%), LNG(액화 천연가스, Liquefied Natural Gas)를 사용한 화력 발전은 123,684 GWh(20.81%), 태양광은 26,975 GWh(4.54%)로 총합 54.97%로 절반 이상을 차지하고 있는 것을 확인할 수 있다.

따라서 위의 네 가지 발전 방식은 화력 발전을 대체하여 사용 가능한 대한민국의 전력을 책임지는 중요한 발전 방식이다. 또한, 풍력 발전은 본 연구를 진행한 제주에서 쉽게 볼 수 있는 발전 방식 중 한 가지이며, 많은 신재생 에너지들 중 폭발적으로 성장하고 있는 발전 방식이기에 연구 대상으로 선정하였다.

본 연구는 천연가스, 원자력, 태양광, 풍력 네 가지 발전 방식의 LCOE 값을 계산한 뒤 각 값을 비교 및 대조하여 효율성 측면의 공통점과 차이점을 알아본다. 또한 해당 발전 방식의 핵심 기술에 관한 최신 연구 동향을

파악하여 향후 발전원별 LCOE가 어떻게 변화할 것인지 예측한다. 이후 미래의 발전소 동향을 파악하여 미래 발전소들의 효율성들을 구해보려한다.

재료 및 방법 (Materials and Methods)

본 연구는 LCOE 계산에 필요한 값들을 문헌조사를 통해 수집하였다.

LCOE 계산은 다음의 식을 활용하였다.

$$\frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i + M_i + F_i}{(1 + d)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{(1 + d)^i}} \quad (1)$$

n : 설비의 총 운영기간

C_i : 설비의 초기 설치 비용

M_i : 설비의 운영 비용

F_i : 설비의 연료비

d : 사회적 할인율(돈의 가치 변화 반영)

E_i : 설비의 에너지 생산량

천연가스 발전기의 LCOE 계산에 활용한 식은 다음과 같다.

$$LCOE = \frac{\text{연간 총 비용}[KRW]}{\text{연간 에너지 생산량}[kWh]} = \frac{(\text{연간 설치 비용}) + (\text{연료 구입 비용}) + (\text{연간 유지 보수 비용})}{\text{에너지 생산량}[kWh]} \quad (2)$$

본 연구에서는 사회적 할인율을 10%로 설정하고, 에너지량의 단위는 kWh로 변환하여 계산하였다. 가격은 원(KRW) 단위를 사용하였다.

본문 (main text)

1. 발전 방식별 LCOE 계산

1-1. 천연가스 발전

제주에서 7년동안 가동한 LNG복합 발전기의 LCOE를 계산하였다. 대상 발전기의 연간 에너지 생산량은 801,014,400 [kWh]이다. 연간 설치 비용은 19,736,263,736.26 [KRW]으로 나왔다. 연료 구입 비용은 필요한 연료 양과 연료 가격을 곱해서 구했는데, 연료 가격은 2023년 연평균 가격을 사용하였으며, 필요한 에너지량은 연간 에너지 생산량을 발전 효율로 나누어 구했다. 계산한 연료 구입 비용은 2,878,844,258.56 [KRW], 연간 유지 보수 비용은 관련 기사에 언급된 300억 원으로 계산하였다. 이 값을 식 (2)에 대입하여 계산하면 천연가스의 LCOE는 약 65.69 [KRW/kWh]이다.

1-2. 원자력 발전

원자력 발전은 1977년에 가동을 시작하여 2017년 영구 정지 될 때까지 40년 동안 운영했던 고리원전 1호기의 LCOE를 분석하였다. 따라서 현재 원자력 발전의 LCOE와 차이가 존재 할 수 있다. 계산에 필요한 수치들은 고리원자력 본부에서 공개한 비용과 발전량, 발전 효율과 가동 시간을 통해 구했으며, 식을 토대로 LCOE를 계산하면 약 27.87 [KRW/kWh]이다.

1-3. 태양광 발전

25년간 가동한 100 [kWh] 용량의 태양광 발전기를 기반으로 발전량, 설비 비용 등의 데이터를 수집하여 이를 토대로 LCOE를 계산하였다.

설비의 운영 기간은 25년이므로 $n = 25$, 발전기의 발전 효율은 연간 0.44% 씩 감소하였고 이를 토대로 해당 설비가 25년 간 생산한 에너지 양은 3,184,800 [kWh]이다. 따라서 $E = 3,184,800$, 설비의 초기 비용은 201,000,000 [KRW]으로 $C = 201,000,000$, 설비의 운영 비용 총합은 201,000,000 [KRW]으로 설비의 연간 운영 비용 $M = 201,000,000 \div 25 = 8,040,000$ [KRW], 태양광 발전은 연료 구입이 필요하지 않기 때문에 설비의 연료비 $F = 0$, 사회적 할인율은 10%로 $d = 10\% = 0.1$

해당 데이터를 종합하여 식 (1)에 대입하여 LCOE를 계산하였다.

$$LCOE = \frac{\sum_{i=1}^{25} \frac{8,040,000 + 10,920,000}{(1+0.1)^i}}{\sum_{i=1}^{25} \frac{3,184,800}{(1+0.1)^i}} \quad (3)$$

1-4. 풍력 발전

풍력 발전은 평균 20년을 가동한 kWh 당 166.8원의 지상식 풍력 발전기를 기준으로 발전량, 설비 비용 등의 데이터를 수집하여 이를 바탕으로 LCOE를 계산하였다. 이때 설비의 운영 기간(n)은 20년, 발전기의 발전량(E)은 2839622.64151, 사회적 할인율은 10%로, 지상식 풍력 발전의 초기 설치 비용(C)은 약 60억, 연료비(F)는 들지 않기 때문에 0으로 두고 계산하였다. 이를 토대로 계산한 결과 31.01 [KRW/kWh]의 값을 도출하였다.

$$LCOE = \frac{\sum_{i=1}^{20} \frac{6000000000 + 168 + 168}{(1+0.1)^i}}{\sum_{i=1}^{20} \frac{2839622}{(1+0.1)^i}} \quad (4)$$

2. LCOE 값 비교 및 대조

2-1. LCOE 값 비교

천연가스 65.69 [KRW/kWh], 원자력 27.87 [KRW/kWh], 태양광 65.64 [KRW/kWh], 풍력 31.01 [KRW/kWh]으로 LCOE 값은 천연가스 발전이 가장 크고, 원자력 발전이 가장 작은 값이 나왔다.

표 1. 발전 방식별 LCOE(균등화 발전 비용)

천연가스	원자력	태양광	풍력
65.69	27.87	65.64	31.01

[단위: KRW/kWh]

2-2. 차이의 원인 분석

천연 가스 발전 방식은 발전 연료로 사용되는 천연 가스의 비용과 비교했을 때 발전량이 크지 않으며, 설비의 초기 설치 비용과 운영 비용이 매우 큰 편이다.

원자력 발전은 발전 설비의 규모 자체는 분석한 다른 발전 설비의 규모에 비해 매우 커 설비의 초기 설치 비용, 운영 비용, 연료비의 총합이 가장 크다.

하지만 원자력 발전에 사용되는 연료인 우라늄의 큰 에너지 밀도가 매우 크기 때문에, 발전 시 사용 연료량 대비 가장 큰 발전량을 확보할 수 있다.

태양광 발전은 설비의 초기 설치 비용 외에 따로 크게 지출을 할 필요가 없어 설비를 운영하면서 필요로 하는 운영 비용은 적은 편에 속한다.

하지만 태양빛을 이용해 발전을 하기 때문에, 시간에 따른 태양빛의 차이와 날씨의 흐리거나 맑은 정도에 따라 발전량이 크게 변화하고 이를 제외하더라도 발전량 자체가 다른 발전 방식에 비해 미미한 편이다.

풍력 발전 또한 태양광 발전과 마찬가지로 설비의 초기 설치 비용 외에 큰 운영 비용을 필요로 하지 않는다.

자연적으로 생성되는 바람을 이용한 발전 방식으로 상시 발전을 할 수 있다는 이점을 가지고 있지만, 전체 발전 용량을 초과하는 상황을 대비하기 위해 설비를 정지시켜놓는 경우가 많다.

이를 종합하였을 때 원자력 발전은 큰 설비 운영 비용을 감당할 발전량을 가지고, 풍력 발전은 발전 시간이 지속적이고 적은 추가 운영 비용을 가지기 때문에 상대적으로 낮은 LCOE가 나타나게 되었다.

반대로 천연가스 발전은 큰 설비 운영 비용에 비해 미미한 발전량과 큰 연료 비용을 가지고, 태양광 발전은 발전량 자체의 미약함과 시간, 날씨에 따른 발전량 차이로 인해 상대적으로 높은 LCOE가 나타나게 되었다.

3. 미래 동향 예측

3-1. 천연가스 발전

LCOE가 감소할 것으로 보인다. 현재 개발 중에 있는 핵심 기술이 다양하며, 이 기술들이 상용화에 성공하면 효율이 증가하여 LCOE는 감소할 것이다.

그러나, 천연가스는 발전 과정에서 지구 온난화의 주범인 온실가스의 배출량이 다른 발전 방식에 비해 큰 편이며, 원료의 양이 한정적이라는 치명적인 단점이 있다.

따라서 천연가스는 국가적 측면에서 발전량이 제한됨과 동시에 발전에 사용하는 핵심 기술에 대한 연구도 점차 줄어들 것으로 예상된다. 이로 인해 천연가스는 다른 발전 방식과의 효율 차이가 점점 커지며 발전량이 줄어들 수 있다.

3-2. 원자력 발전

LCOE가 감소할 것으로 보인다. 현재 많은 국가들이 기후위기를 대처하기 위해서 탄소 중립을 실천하고 있는데, 다른 에너지원의 경우 화력 발전보다 발전 효율이 떨어지거나, 발전 과정 도중 환경이 오염되는 등의 문제가 있다.

하지만 원자력 발전은 다른 발전방식과 비교해 탄소 배출량이 거의 없다는 점과 압도적인 발전 효율을 가진다는 점, 그리고 지속적인 발전으로 인해 안정성 또한 크게 증가했다는 장점을 가지고 있다.

이러한 이유로 화력발전을 대체할 에너지원으로 원자력 발전이 크게 주목받고 있으며, EU(유럽연합, European Union)에서도 탈원전을 철폐, 원자로를 다시 건설하고 있다. 최근 대한민국에서도 탈원전 정책을 철폐했다.

따라서 원자력 발전의 개발은 지속될 것으로 보이며, 이에 따라 발전 효율은 더욱 증가할 것이다. 원자력 발전의 개발이 지속되면서 이에 따른 지원도 확대되면, 기술이 발전하여 LCOE는 감소할 것이다.

3-3. 태양광 발전

LCOE가 감소할 것으로 보인다. 태양 전지를 만드는 과정에서 자원을 사용하는 부분은 피할 수 없는 부분이며, 이외의 발전 방식도 마찬가지로이다.

화력 발전, 원자력 발전 등의 지속적으로 발전 연료를 사용해야 하는 다른 발전 방식과는 달리 태양광 발전의 경우 설치한 태양광 발전기 외에 따로 추가적인 설비를 설치할 필요가 없다.

또한 사용하는 발전 연료를 필요로 하지 않기 때문에 다른 발전 방식과 비교하여 자원 고갈에 대한 문제가 감소할 수 있을 것이라 생각한다.

이 때문에 태양광 발전과 같이 초기 작업 이후 추가적인 자원을 사용하지 않고 안전한 풍력 발전, 수력발전, 조력발전 등의 친환경 발전 방식에 대한 관심이 높아짐으로써 관련 기술이 발전하여 LCOE의 감소를 이루어낼 수 있을 것으로 예상된다.

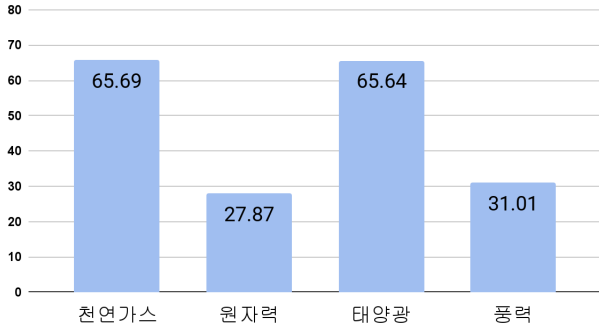
3-4. 풍력 발전

LCOE가 감소할 것으로 보인다. 2022년 국내 풍력 발전의 설비 용량은 약 1,934 MW로 최근 10년 동안 평균 약 13.5%의 성장세를 이룰만큼 개발이 활발하다. 현재 이러한 양상과 사회 이슈인 친환경에 대한 관심이 활발하다. 또한 신재생 에너지에 대한 투자 및 설치, 생산량을 늘리는 추세이다. 그렇기에 LCOE가 감소할 것으로 예상된다.

결과 (Results)

다음은 네 가지 발전 방식의 LCOE를 계산한 결과이다.

그래프1. 발전 방식별 LCOE(균등화 발전 비용)



[단위: KRW/kWh]

결과에 따르면 각 발전원별 LCOE는 원자력, 풍력, 태양광, 천연 가스 순으로 값이 작았으며, 이는 원자력 발전과 풍력 발전의 시장가치가 다른 발전에 비해 상대적으로 높음을 보여주고 있고, 화력 발전을 대체할 에너지원으로 그 두 가지의 발전 방식이 유효한 선택지임을 의미하기도 한다.

결론(Conclusion)

발전소별 LCOE 값을 비교한 결과, 원자력 발전의 LCOE가 가장 낮았으며, 그 뒤를 풍력, 태양광, 천연 가스

발전이 따랐다. LCOE 값이 낮을수록 발전소의 효율성이 높다고 판단할 수 있으므로, 발전소 개발의 방향성은 LCOE 값이 작은 것에서 큰 것으로 이동할 것으로 예상된다.

이러한 결론은 IFA에서 발표한 <국가별 원별 LCOE 순위 및 추정비용(2018, 2024)> 자료를 바탕으로, 각국의 발전별 LCOE를 분석한 결과이다. 이 자료를 통해 원자력, 풍력, 태양광, 천연가스의 순서로 발전소 개발이 이루어질 가능성이 높다는 결론을 도출할 수 있었다.

출처 (Source)

안지석. (2023.10.13). 한국전력통계로 알아보는 2022년 대한민국 발전량. 한국에너지기술연구원 기술정책플랫폼.

https://www.kier.re.kr/tpp/tppBoard/view/25?menuId=ME_NU00962

한국수력원자력. 열린 원전 운영 정보 운영-정비. 한국수력원자력.

https://npp.khnp.co.kr/index_khnp?menuCd=DOM_000000_102002002000&y=2933