다양한 발전원에 따른 LCOE 변화 양상 분석



북일고등학교 충청남도 천안시 동남구 단대로 69 (신부동 245)

장성민, 이동훈, 이서원, 이승민

1. 국내 여러 발전원의 실사례를 통해 분석  
한 LCOE와 그에 따른 발전 효율 탐구

ABSTRACT: 현재 국내에서 운영중인 풍력발전소, 화력발전소를 포함하여 여러 발전원의 연간 LCOE. 값을 구한다. 이를 통해 발전원의 전력 거래 시장에서 가격 경쟁력을 알아본다.

**서론 ( Introduction )**

LCOE(Levelized Cost of Electricity)란 균등화 발전 비율을 말한다. LCOE는 한 발전원의 단위 시간당 발전 비용을 단위 시간당 전력 생산량으로 나눈 값으로, 대상 발전원의 금전적 효율, 즉 가격 경쟁력을 비교하는 지표로 쓰인다. LCOE가 클수록 전력 시장에서 가격 경쟁력을 가질 수 있다. LCOE는 국가에서 정책 수립, 국가 정책의 방향을 결정하는 등 중요한 역할을 수행한다. 그렇기에 현재 국내 운행 중인 발전소와 가상의 경우를 상정하여 연간 LCOE를 구해 보았다.

재료 및 방법 ( Materials and Methods )

첫 번째로, 강원도 평창군 대관령면 횡계리 소재 강원 풍력발전단지를 실사례로써 조사하였다. 연간 LCOE는 연간 총비용/연간 전력 생산량으로 표현할 수 있다. 먼저 연간 설치 비용, 즉 CA를 구하였다. 연간 설치 비용은 2020년 기준으로 조사된 풍력발전의 설치 비용인 2,522,000KRW/kW으로 설정했다. 강원 풍력발전단지의 발전 용량은 98MWh, 즉 98,000kWh다. 할인율은 제외하고 계산했다. 즉, 연간 설치 비용은 다음과 같다.

1. 2,522,000 \* 98,000 = 247,156,000,000[KRW]

연료 구입 비용은 풍력발전 특성상 고려하지 않았다. 다음으로는 연간 유지 보수 비용을 구하였다. 그러기 위해 발전소의 시간당 발전량과 생산된 전력당 유지 보수 비용을 구하였다. 유지 보수 비용은 평균적으로 생산된 kWh당 1-2유로센트(=14.78-29.57원. 2024년 5월 22일 오전 6:08 UTC 기준) 에 달할 수 있다. 평균값인 22.175원으로 계산했다. 시간당 발전량과 생산된 전력당 유지보수비를 통해 연간 유지 보수 비용을 구할 수 있다.

1. 98,000[kWh] \* 22.175[KRW] \* 24 \* 365 = 19,036,794,000[KRW]

결론적으로 CA와 연간 유지 보수 비용을 더해주면 연간 총비용을 구할 수 있다.

1. 247,156,000,000[KRW] + 19,036,794,000[KRW] = 266,192,794,000[KRW]

연간 전력 생산량은 시간당 발전량을 이용해 구할 수 있다.

1. 98,000[kWh] \* 24 \* 365 = 858,480,000[kWh]

최종적으로, 강원 풍력발전단지의 LCOE는 다음과 같다.

1. 266,192,794,000÷858,480,000=310.074[KRW/kWh]

두 번째로, 가상의 화력발전소를 설정하여 연간 LCOE를 구했다. 화력발전소의 경우에는 풍력발전소와 달리 연간 설치 비용, 연간 유지 보수 비용에 연료 구입 비용을 더하여 연간 총비용을 구할 수 있다. 본 화력발전소는 오직 무연탄만을 연료로 쓴다고 가정하였다. 무연탄의 열량은 4,500kcal/kg, 즉 0.00522GWh/ton이다. 본 화력발전소의 시간당 발전 용량은 1GWh로 설정했다. 본 화력 발전소가 실질적으로 발전하는 시간의 비율을 나타내는 값인 운영 비율은 49.1%로 설정했다. 즉 연간 전력 생산량은 1 \* 365 \* 24 \* 0.491 = 4,301.16GWh다. 본 화력발전소의 발전 효율은 38%로 가정했다. 이를 통해 연간 전력 생산량인 4,301.16GWh를 발전하기 위한 필요 투입 에너지량을 구할 수 있다.

1. 4,301.16 \* = 11,318.842[GWh]

필요 투입 에너지량을 연료인 무연탄의 열량으로 나누어주면 필요 투입 연료량을 구할 수 있다.

1. 11,318.842 [GWh] ÷ 0.00522[GWh/ton] = 2,168,360.536 [ton]

무연탄의 가격은 186,540[KRW/ton]으로 설정했다. 즉 연료 구입 비용은 다음과 같다.

1. 186,540\* 2,168,360.536 = 404,485,974,385[KRW]

연간 설치 비용은 5,000$/kW로 설정했다. 1달러는 환율을 적용(2024년 6월 7일 오후 11:58 UTC 기준)하여 1,380.04원으로 설정했다. 즉, 본 화력발전소의 연간 설치 비용은 다음과 같다.

1. 5,000 \* 1,380.04 \* 1,000,000 = 6,900,200,000,000[KRW]

유지 보수 비용은 발전소의 발전 용량에 비례한다고 가정하여, 60,000KRW/kW로 설정했다. 즉, 본 화력발전소의 연간 유지 보수 비용은 다음과 같다.

1. 60,000 \* 1,000,000 = 60,000,000,000[KRW]

연료 구입 비용, 연간 설치 비용, 연간 유지 보수 비용을 모두 더하면 연간 총비용을 구할 수 있다. 이는 다음과 같다.

1. 404,485,974,385 + 6,900,200,000,000 + 60,000,000,000 = 7,364,685,974,385[KRW]

결론적으로 본 화력발전소의 LCOE는 다음과 같다.

1. 7,364,685,974,385 ÷ 4,301.16 = 1,712.255[KRW/kWh]

결과 ( Results )

강원 풍력발전단지와 가상의 화력발전소의 LCOE와 그것에 영향을 준 값들은 다음과 같다.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 강원 풍력발전단지 | 가상의 화력발전소 |
| 연료 구입 비용[KRW] |  | 404,485,974,385 |
| 연간 설치 비용[KRW] | 247,156,000,000 | 6,900,200,000,000 |
| 연간 유지 보수 비용[KRW] | 19,036,794,000 | 60,000,000,000 |
| 연간 총비용[KRW] | 266,192,794,000 | 7,364,685,974,385 |
| 연간 전력 생산량[kWh] | 858,480,000 | 4,301,160,000 |
| LCOE[KRW/kWh] | 310.074 | 1,712.255 |

토의(Discussion), 결론(Conclusion)

이번 탐구를 통해 강원 풍력발전단지와 가상의 화력발전소의 LCOE를 구하였다. LCOE는 특성상 더 작은 값을 가질수록 같은 비용으로 더 많은 전력을 생산할 수 있다. 즉, 강원 풍력발전단지는 가상의 화력발전소보다 에너지 시장에서 경쟁력을 가진다. 이는 물론 가상의 발전원과 비교한 것이기 때문에 실존하는 다른 발전원과의 가격 경쟁력을 비교하지 못한 것이 이번 탐구의 한계라고 할 수 있다.

REFERENCES

이근대, 김기환. *재생에너지 공급확대를 위한 중장기 발전단가(LCOE) 전망 시스템 구축 및 운영.* 에너지 경제 연구원, 2020.

Brooks, David B. et al. *Wind Energy - The Facts: A Guide to the Technology, Economics and Future of Wind Power*. Earthscan, 2009



2. 국내 여러 발전원의 LCOE 변화 양상 및  
전망분석

ABSTRACT: 국내의 화력발전, 원자력발전의 LCOE의 변화 양상을 알아본다. 이를 통해 발전원의 전망을 알아본다.

서론 ( Introduction )

LCOE(Levelized Cost of Electricity)란 균등화 발전 비율을 말한다. LCOE는 한 발전원의 단위 시간당 발전 비용을 단위 시간당 전력 생산량으로 나눈 값으로, 대상 발전원의 금전적 효율, 즉 가격 경쟁력을 비교하는 지표로 쓰인다. 국내의 화력발전, 원자력발전의 향후 LCOE 변화가 어떻게 나타날지 탐구했다.

재료 및 방법 ( Materials and Methods )

첫 번째로, 화력발전의 경우에 대해 알아보았다. 화력발전의 LCOE는 연료 가격에 가장 영향을 많이 받는다. 국제 석탄가격은 2008년에 기록적인 상승을 경험한 후에 크게 하락했다가, 이후2009년 초부터 2011년 중반까지 상승세를 보였지만 최근 들어 다시 하락하는 모습을 보였다. 국제 석탄가격은 지난 몇 년 동안 생산, 소비, 교역 부문에서 작은 변화에도 크게 변동하는 모습을 보여 왔으며, 이러한 형태는 향후에도 지속될 것으로 전망되고 있다.

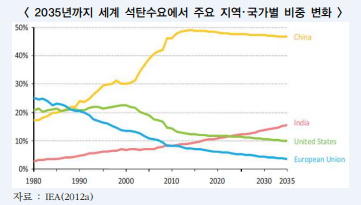


Figure 1중국의 높은 비중, 인도의 비중 변화가 눈에 띈다.

OECD 지역의 경우에는 석탄의 수요가 줄 것으로 전망되지만, 비OECD 지역은 현재와 같은 증가세를 유지하다가 이후부터 정체 내지는 완만하게 증가할 것으로 전망된다. 즉 근시일 내에는 석탄의 세계적인 수요는 소폭 감소할 것으로 보인다. 즉, 석탄의 가격은 점차 감소할 것으로 추정된다. 또한 화력발전의 효율을 높여주는 기술들 또한 개선될 것이다. 이러한 이유들로 인하여 화력발전의 LCOE는 감소할 것이다.

두 번째로, 원자력발전의 경우에 대해 알아보았다. 원자력발전도 마찬가지로 기술의 발전에 의해 LCOE가 감소할 전망이다. 미국, 일본, 유럽 연합, 영국 등 세계 여러 국가들에서 원자력발전소의 신규 건설과 소형 모듈 원전(SMR) 개발 및 건설에 착수하고 있다. 우리는 소형 모듈 원전에 집중하여 탐구하였다.



Figure 2저비용, 소형, 안정성이 대비된다.

SMR은 기존 대형 원전보다 작은 크기, 적은 비용과 시간, 안전성 측면에서 뛰어나다. SMR, 또는 이와 같은 기술들이 주목받고 지속적으로 개선되면 원자력발전의 LCOE는 감소할 것으로 보인다.

**결과 ( Results )**

화력발전은 연료인 석탄의 값이 점점 하락할 것이며, 이에 따라 LCOE가 감소할 것이다. 원자력발전은 SMR과 같은 기술의 발전으로 더욱 효율적인 전력 생산이 가능하게 되어 LCOE가 감소할 것이다.

토의(Discussion), 결론(Conclusion)

화력발전은 연료인 석탄의 값이 점점 하락할 것이며, 이에 따라 LCOE가 감소할 것이다. 원자력발전은 SMR과 같은 기술의 발전으로 더욱 효율적인 전력 생산이 가능하게 되어 LCOE가 감소할 것이다.

REFERENCES

이성규. 세계에너지시장인사이트, 애너지경제연구원, 2013



3. 신재생 에너지원의 핵심 기술 및 최신 연구  
동향에 따른 LCOE변화 양상

ABSTRACT: 신재생 에너지원은 무공해성 덕분에 지속적으로 큰 주목을 받는 발전원이다. 그만큼 발전 시장에서 주도권을 잡기 위해 효율적인 발전이 가능해야 한다. 신재생 에너지원을 개선시키는 연구 동향을 알아보며 LCOE 변화 양상을 알아본다.

서론 ( Introduction )

LCOE(Levelized Cost of Electricity)란 균등화 발전 비율을 말한다. LCOE는 한 발전원의 단위 시간당 발전 비용을 단위 시간당 전력 생산량으로 나눈 값으로, 대상 발전원의 금전적 효율, 즉 가격 경쟁력을 비교하는 지표로 쓰인다. 현재로서는 신재생 에너지원이 화석연료를 사용하는 재래식 발전원을 대체하지 못하고 있다. 풍력발전의 핵심 기술 및 최신 연구 동향을 분석하여 LCOE 변화 양상을 도출하였다.

재료 및 방법 ( Materials and Methods )

첫 번째로, 풍력발전의 핵심 기술은 터빈, 즉 이를 이루는 타워, 날개라고 할 수 있다. 최근에는 더 큰 날개와 타워를 가진 초대형 터빈이 개발되고 있다. GE사의 Haliade-X는 12-14MW의 출력을 낼 수 있으며, 날개 길이는 107m, 허브 높이는 260m이다. 단일 터빈으로 연간 약 67GWh의 전력을 생산할 수 있다.  


Figure 1 Haliade-X의 제원

대형 터빈은 단위당 설치 및 유지 보수 비용을 줄일 수 있다. 터빈의 허브 높이를 높여 더 강력하고 안정적인 바람을 잡을 수 있게 할 수 있다. 이는 발전 효율을 높여 LCOE를 낮출 수 있다. 이러한 단일 터빈 뿐만 아니라 발전소의 영역을 넓히는 기술 또한 존재한다. 부유식 풍력발전 기술이 조명받고 있다. 이는 기존 지상에서만 설치하던 풍력발전소의 설치 범위를 넓혀준다. 수심이 깊은 해상에도 설치할 수 있어 이는 더욱 극대화된다. Hywind Scotland와 같은 프로젝트가 대표적이다. 세계 최초의 부유식 해상 풍력발전소로, 30 MW의 용량을 갖추고 있다. 부유식 플랫폼의 안정성을 높이고, 설치 및 유지 보수 비용을 줄이기 위한 연구가 진행 중이다.



Figure 2세계 최초 부유식 풍력발전소인 Hywind Scotland

풍력발전과 에너지 저장 시스템(ESS)을 결합하는 방안도 연구중에 있다. ESS 는 초과된 잉여 에너지를 저장해두었다가 필요할 때 사용하는 전력 저장 기술이라고 할 수 있다.



Figure 3 ESS의 기초적 구성

ESS와 풍력발전을 융합하는 데에는 여러 방안이 존재한다. 첫 번째로, 리튬이온 배터리를 사용할 수 있다. 가장 일반적으로 사용되는 ESS로, 빠른 반응 시간과 높은 에너지 밀도를 제공한다. 풍력발전의 단기적 인 발전량의 변동성을 완화하는 데 효과적이다. 플로우 배터리는 대규모 에너지 저장에 적합하며, 긴 수명과 높은 안전성을 제공한다. 예를 들어, 바나듐 레독스 플로우 배터리는 대용량 저장에 유리하다. 두 번째로, 압축 공기 저장 (CAES)은 풍력으로 생산된 전력을 사용하여 공기를 압축하고, 필요할 때 이를 해제하여 터빈을 구동해 전력을 생산하는 방식이 다. 대규모 저장 용량을 제공할 수 있다. 세 번째로, 펌프 수력 저장 (PHS)은 잉여 전력을 사용하여 물을 높은 위치의 저장소로 펌핑하고, 필요할 때 물을 방류하여 수력 터빈을 구동해 전력을 생산 하는 방식이다. 높은 효율성과 대규모 저장 용량을 갖추고 있다. 네 번째로, 열 에너지 저장은 풍력으로 생산된 전력을 열 에너지로 변환하여 저장하고, 필요할 때 이를 전력으로 다시 변환하는 방식이다. 다양한 형태의 열 저장 매체(예: 용융염)를 사용할 수 있다.

결론적으로 현재 주목받고 활발히 연구되고 있는 기술들이 기존의 풍력발전에 적용된다면 LCOE가 낮아질 것이다. 단위당 설치 비용이 낮고, 유지보수비용이 낮은 대형터빈, 높은 허브 높이로 강력하고 안정적인 바람의 수급, 부유식 풍력발전소의 탄생으로 더 많은 풍력발전소의 설립, ESS의 의한 풍력발전의 효율적 운행은 모두 LCOE를 낮추는 요인이 될 것이다.

결과 ( Results )

대형 터빈: 높은 허브. 큰 날개에 의한 고효율 발전 가능  
부유식 풍력발전: 바다까지 발전 영역을 넓힘으로써 대량 전력 생산 가능.

ESS: 낭비되었던 에너지를 발전에 역으로 이용하여 발전 효율 상승 가능

토의(Discussion), 결론(Conclusion)

이러한 풍력발전의 핵심 기술 연구를 비롯해 시스템적인 요소를 개선시키는 연구가 진행될수록 LCOE는 낮아질 것이다.

REFERENCES

GE Vernova. “Haliade-X offshore wind turbine”. GE Vernova, https://www.gevernova.com/wind-power/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine. 2024년 6월 8일 접속.

equinor. “World’s first floating wind farm has started production”. equinor, https://www.equinor.com/news/archive/worlds-first-floating-wind-farm-started-production. 2024년 6월 8일 접속.

삼성SDI. “Energy Storage System”. 삼성SDI, https://www.samsungsdi.co.kr/ess/index.html. 2024년 6월 8일 접속.



4. 대한민국의 신재생 에너지 발전 방향성 설립

**ABSTRACT:** 신재생 에너지원은 무공해성 덕분에 지속적으로 큰 주목을 받는 발전원이다. 그만큼 최근 가격 경쟁력이 중요해지고 있다. 대한민국 신재생 에너지를 중요히 여겨야 한다. 신재생 에너지의 발전 방향성을 정책, 기업의 측면에서 알아본다.

**서론 ( Introduction )**

현재 세계는 신재생 에너지에 집중을 기울이고 있다. 대한민국 또한 이 흐름에 탑승하여 신재생 에너지의 이점을 적극 활용할 수 있어야 할 것이다. 그런 의미에서 신재생 에너지의 발전 방향성을 정책, 기업의 측면에서 알아보았다.

**재료 및 방법 ( Materials and Methods )**

정책 측면에서는 정부의 역할이 필요하다. 재생에너지 프로젝트에 대한 세금 혜택, 저금리 대출 등을 제공하는 것 등을 추진할 수 있다. 이로써 기업이 우선적으로 재생에너지 프로젝트에 참여하게 되는 기회를 제공할 수 있다. 기업이 재생에너지 산업에 뛰어든다면 개인들은 기업에 투자 할 것이고, 국내의 재생에너지 산업은 크게 성장 할 것이다. 또한 정부에서 ‘매년 화석연료를 대신하여 재생에너지의 비율을 몇 퍼센트씩 늘리겠다‘ 같은 구체적 목표를 설정한다면 국가적 차원에서 명확한 목표를 생성되게 됨으로써 신재생에너지의 발전에 도움을 줄 것이다. 다음은 대한민국이 실제로 추진하고 있는 정책이다. 제5차 신재생에너지 기본계획 (2020~2034)에 따르면, 2034년까지 신재생에너지 발전비중을 25.8%로 확대하고 주력 에너지원으로 설정할 계획이다. 또한, 계통수요수소 등을 대폭 강화하고 2050년 탄소 중립을 위한 도전과제도 제시했다. 이러한 방향성은 친환경 에너지에 대한 수요증가와 정부의 지원을 통해 세계경제의 성장동력으로 발전할 가능성이 있다. 대한민국은 시장기반 조성 및 국제표준화에 적극 대응하여 신재생에너지산업을 새로운 성장동력으로 육성하고 지속가능한 경제 성장을 도모하고 있다고 할 수 있다. 또한 2030년 까지 태양광은 생산비용이 50% 하락할 것으로 예측되어 시장은 갈수록 커질 것으로 보인다. 기업 또한 발전에 큰 영향을 줄 수 있다. 기술 개발 및 투자를 통해 연구를 진행함으로써 태양광, 풍력, 수소 에너지 등 다양한 신재생에너지 기술의 효율성을 높이고 비용을 절감할 수 있다.

**결과 ( Results )**

국가적 차원에서는 머리의 역할을 하여 기업을 포함한 개인에게 여러 기회를 제공하는 등, 큰 흐름을 만들어야 한다. 기업 차원에서는 적극적으로 신재생 에너지 시장에 참여해야하고, 관련 기술을 개발하여야 한다. 동시에 국가는 이들을 지원해줘야 한다.

**토의(Discussion), 결론(Conclusion)**

신재생 에너지는 무공해성이 가장 큰 장점이다. 하지만 아직은 화력발전과 같은 기존의 주류 발전방식을 대체하기 위해선 많은 개선이 필요하다. 또는 신재생 에너지처럼 무공해 발전원을 쓸 수도 있다. 다양한 시선으로 집중하는 것이 바람직 할 것이다.

**REFERENCES**

**산업통상자원부. *제5차 신재생에너지 기본계획(2020~2034),* 2020.**