

국내 가상발전소 도입을 위한 비용 추정 모델

박혜연*, 박상윤**, 손성용***

Cost Estimation Model for Introduction to Virtual Power Plants in Korea

Hye-Yeon Park*, Sang-Yoon Park**, Sung-Yong Son***

요약 탄소중립 달성의 핵심인 분산형 재생에너지의 확산에 따라 발생하는 계통수용성 문제의 해결을 위해 가상발전소의 도입이 활발히 논의되고 있다. 하지만 가상발전소와 같은 신사업은 일반적으로 보상 메커니즘이 존재하지 않아 도입 초기의 경제성 확보가 어렵다. 이에 초기 활성화를 위해서는 보조금을 포함한 적절한 지원이 필요하다. 지원 수준의 결정을 위해서는 비용모델이 필요하나 신사업의 경우 충분한 데이터가 부족한 문제가 있다. 본 연구에서는 국내 전문가를 대상으로 가상발전소 도입에 필요한 요건, 적정 규모와 비용에 대한 설문문을 통하여 비용 추정 모델을 도출하였다. 우선 가상발전소의 자원구성 형태가 비용에 미치는 영향을 고려하여 설문조사에 따라 자원구성 시나리오를 설계하였다. 각자의 자원구성 시나리오에 대한 비용추계를 기반으로 로지스틱회귀분석을 통하여 시나리오에 따른 비용 추정 모델을 도출하였다. 가상발전소 규모와 자원구성 시나리오에 따른 사례분석으로 적절한 초기 보상 규모를 비교 분석하였다. 20MW~500MW 규모의 가상발전소에서 중대형 위주와 소형 자원을 포함한 자원구성 시나리오를 적용하였을 때, 중대형 위주의 구성 시 비용이 29~51% 낮게 나타났다.

Abstract The introduction of virtual power plants is actively being discussed to solve the problem of grid acceptability caused by the spread of distributed renewable energy, which is the key to achieving carbon neutrality. However, a new business such as virtual power plants is difficult to secure economic feasibility at the initial stage of introduction because it is common that there is no compensation mechanism. Therefore, appropriate support including subsidy is required at the early stage. But, it is generally difficult to obtain the cost model to determine the subsidy level because of the lack of enough data for the new business model. In this study, a survey of domestic experts on the requirements, appropriate scale, and cost required for the introduction of virtual power plants is conducted. First, resource composition scenarios are designed from the survey results to consider the impact of the resource composition on the cost. Then, the cost estimation model is obtained using the individual cost estimation data for their resource compositions using logistic regression analysis. In the case study, appropriate initial subsidy levels are analyzed and compared for the virtual power plants on the scale of 20-500MW. The results show that mid-to-large resource composition cases show 29-51% lower cost than small-to-large resource composition cases.

Key Words : Construction Cost, Distributed Energy Resources, Logistic regression model, Survey, Virtual Power Plant

This work was supported by Korea Energy Agency and the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20194310100060)

*Department of Next Generation Smart Energy System, Gachon University(phystar@gachon.ac.kr)

**Department of Electronic Engineering, Gachon University(sypark1110@samchully.co.kr)

***Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Gachon University(xtra@gachon.ac.kr)

Received April 13, 2022

Revised April 25, 2022

Accepted April 28, 2022

1. 서론

매년 증가하는 분산형 재생에너지의 확산에 따른 계통수용성 문제를 해결하기 위한 방안의 하나로 가상발전소의 개념이 제안되었다[1]. 가상발전소는 정보통신 기술을 기반으로 분산형 재생에너지의 변동성 완화와 급전 자원화를 지원하여 재생에너지 계통 수용성 확대를 지원함으로써 탄소중립 달성에 기여할 수 있는 핵심 수단으로 기대되고 있다.

국내에서 가상발전소 연구는 해외 가상발전소 운영 현황 및 국내도입에 대한 시사점에 대한 연구[2], 국내 전력시장에 가상발전소 활성화를 위한 해외 가상발전소 사례 조사 연구[3], 가상발전소(Virtual Power Plant, VPP)의 개념 및 분산자원 전력거래 활성화를 위한 시사점 연구[4], 분산에너지원의 참여도를 고려한 가상발전소 최적 운영 방안 연구[5]와 같이 국내 가상발전소 도입을 위한 해외 사례 분석 및 시사점 그리고 가상발전소의 최적 운영방안에 대한 사례연구를 중점적으로 진행되었다. 분산에너지 활성화 추진전략에 따라 가상발전소 제도가 국내 도입될 예정[6]이지만 국내 도입을 위한 실질적인 비용과 관련된 조사와 연구는 부족하다. 해외의 경우 가상발전소 실증에 대한 프로젝트와 차세대 가상발전소에 필요 요건 및 새로운 기술에 대하여 논의되고 있다[7,8]. 더 나아가 가상발전소 개념을 통한 새로운 비즈니스 모델을 제시하고 있다[9].

국내 가상발전소 도입은 아직 초기단계에 있는 실정으로 전력 시장제도의 비활성화로 적절한 보상 메커니즘이 존재하지 않아 사업자의 경제성 확보를 위한 적절한 지원제도가 필요하다. 그러나 가상발전소 구축과 운영에 소요되는 비용에 대해 충분한 데이터가 부족하여 적정 수준의 지원제도의 설계에 한계가 있다. 또한, 분산자원을 통합하여 구성되는 가상발전소 특성상 구성모형에 따라 비용 편차가 크게 나타나므로 적절한 지원이 이루어질 수 있도록 맞춤형 설계가 필요하다.

본 연구에서는 가상발전소 운영에 대한 적절한 지원 산정을 위해 전문가를 대상으로 국내 가상발전소 도입을 위한 요건과 가상발전소 구성에 소요되는 비용 추계 조사를 실시하였으며, 도출한 데이터를 바탕으로 회

귀분석을 통해 가상발전소 플랫폼과 사이트 구축 및 운영 비용추정모델을 도출하였다. 이를 기반으로 가상발전소의 구성형태에 따른 시나리오를 기반으로 비용을 도출하고 비교 분석함으로써 향후 적절한 가상발전소 지원체계를 설계할 수 있는 기반을 마련하였다.

2. 가상발전소 국내 도입 요건 조사

2.1 설문조사 개요

가상발전소 구축비용모델 도출을 위하여 가상발전 사업을 수행하고 있거나 향후 참여하고자 하는 사업자를 대상으로 설문조사를 시행하였다. 설문조사는 2021년 10~11월에 걸쳐 총 19개 기관에서 추천받은 36명의 전문가를 대상으로 실시하였으며, 회수율은 100%였다. 설문 내용은 가상발전소 규모, IT 기반 플랫폼 초기 구축 및 연간 운영비용, 가상발전소 분산형 재생에너지 자원 연계를 위해 각 사이트별 투자되는 초기 구축 및 연간 운영비용, 그리고 가상발전소 구성 자원규모 비율에 관한 내용을 포함하였다. 표 1은 설문조사 문항을 나타낸 것이다.

표 1. 설문조사 문항
Table 1. Survey question

설문 문항	
1.	귀하의 소속 기관과 업무는 어떻게 되는지요? 가상발전사업자가 에너지산업으로 자리잡기 위해서 최소 규모는 어느 정도 되어야 한다고 생각하십니까?
2.	가상발전 사업자 규모에 상한을 둘 필요가 있다고 생각하십니까?
3.	가상발전 사업자 규모에 상한을 둘 필요가 있다고 생각하십니까?
4-1.	만약 "예"를 선택하셨다면, 적정 상한 규모는 얼마라고 생각하십니까?
5.	가상발전소 구성 시 모집 가능한 분산형 재생 에너지 자원의 용량은 대체적으로 어떻게 분포될 것으로 추정하시는지요? (개소 기준이 아닙니다. 전체가 100%가 되도록 작성하여 주시기 바랍니다.)
6.	가상발전소 구성을 위하여 개별 분산형 재생 에너지 자원의 연계를 위하여 각 개소당 투자되는 초기 설비 및 설치 비용과 연간 운영비용은 어느 정도로 생각하시는지요?
7.	가상발전소를 위한 IT 기반 플랫폼 (서버, 모니터링, 제어 및 입찰 시스템 제반) 구축 및 운영에 들어가는 비용은 어느 정도로 예상하시는지요?
8.	가상발전소 플랫폼의 구축 및 운영에 있어서, 재생에너지 O&M 혹은 Aggregator 사업자로서 기존 혹은 신규로 구축해야 하는 비용을 제외하고 추가로 소요되는 비용은 몇 % 정도라고 생각하십니까? (완전 신규인 경우 100%, 기존 시스템 활용으로 충분한 경우 0%)

2.1.1 설문조사 참여자 분류

사업자 유형에 따른 특성을 파악하기 위해 설문 참여자를 발전사, 솔루션사업자, 신사업자, 공공기관 그룹으로 분류하였다. 참여자는 표 2와 같이 각각 발전사 그룹 20명(56%), 솔루션사업자 그룹 8명(22%), 신사업자 그룹 3명(8%), 공공기관 그룹 5명(14%)으로 구성되었다. 발전사의 참여자는 총 참여자의 56%로 다른 가상발전소 사업 종사자들과 대비하여 설문 응답에서 더 높은 비율을 차지하고 있다. 설문 참여자들을 참여 기관 기준으로 분류하면 발전사 7개(37%), 솔루션사업자 7개(37%), 신사업자 2개(11%), 공공기관 3개(16%) 기관으로 분류되었다.

표 2. 참여자 구성
Table 2. Composition of participants

분류	발전사	솔루션사업자	신사업자	공공기관	합계
응답자 수(명)	20	8	3	5	36
응답자 비율(%)	56	22	8	14	100

2.1.2 설문 참여자 직급 및 업무

설문 참여자들의 직급은 전체의 33%(12명)이 부장이상이거나 임원급이었고 67%(24명)이 3직급 이하였다. 발전사의 경우 대부분 실무 차장급인 3직급 이하로 구성되었으며 솔루션사업자, 신사업자 그리고 공공기관의 경우 대부분이 부장 이상이거나 임원급의 직급으로 구성되었다. 설문 참여자들의 가상발전소 관련 담당 업무는 사업개발 및 기획이 전체 참여자의 78%를 차지하였고 기술개발은 22%를 차지하였다.

2.2 가상발전소의 적정규모

가상발전소의 적정규모를 파악하기 위해 가상발전소 규모의 상한 여부와 하한의 범위에 대한 설문을 진행하였다. 가상발전소의 규모에 상한이 필요한가에 대한 질문에 대하여 75%가 상한을 둘 필요가 없다고 응답하였다. 반면에 25%는 가상발전소 규모에 상한이 필요하다고 응답하였다. 이는 가상발전소의 사업 확장성을 염두에 둔 것으로 해석할 수 있다. 가상발전소의 적정 최소규모에 대한 설문에서 평균 구성은 '20 MW 미만', '20 MW ~ 100 MW 미만', '100 MW ~ 1 GW 미만', '1 GW이상'에 대하여 각각 21%, 36%, 30%, 12%로 나타났다. 이는 설문시점에서 운영되는 재생에너지 발전량 예측제도의 영향이 일부 작용한 것으로 판단된다. 그림 1은 국내 가상발전소의 적정규모에 대한 응답을 나타낸 것이다.

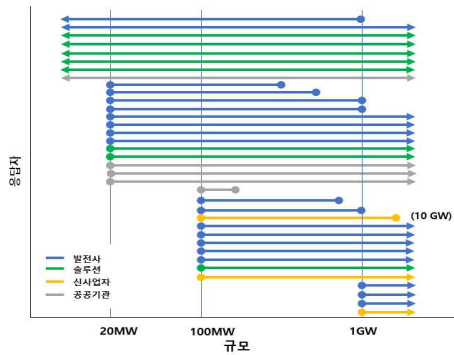


그림 1. 국내 가상발전소 적정규모 조사
Fig. 1. The appropriate size of the virtual power plant in Korea

그림1에서 가상발전소의 적정규모에 대하여 78%는 20 MW 이상으로 응답하였으며 75%는 상한에 제한이 필요 없다고 응답하였다. 그 외에도 규모의 하한과 상한 모두 필요 없다고 응답한 응답자도 6명이 있었는데, 이들 중 5명은 솔루션사업자로 가상발전소 사업자의 참여 수가 많을수록 매출에 유리하기 때문으로 해석된다.

설문에서 국내 가상발전소 적정규모는 하한이 존재하고 상한은 제한이 없는 형태를 선호하는 것을 알 수 있다. 발전사의 경우 가상발전소의 최소규모에 대해 다양한 의견을 보이고 있다. 반면에 솔루션사업자의 경우 63%가 최소 하한 범위가 20 MW 미만이어야 한다고 응답하였다. 신사업자의 경우 규모의 최소 하한이 100 MW 이상으로 높게 나타났으며 상한에 대해서는 제한이 필요 없다고 응답하였다. 이는 설문에 응답한 신사업자의 상당 부분이 참여자원을 일정 이상 확보하고 있는 점과, 사업의 성장성 측면을 고려한 응답으로 해석된다.

2.3 자원 용량 구성

가상발전사업 시 분산형 재생에너지 자원의 용량 구성을 추정하기 위하여 참여 자원을 규모에 따라 6단계로 분류하고 전체 비율의 합이 100%가 되도록 조사를 시행하였다. 그림 2는 사업자 유형별로 자원 용량 구성에 대한 결과를 보여준다. 분산형 재생에너지 자원의

용량 비중은 사업자 구분 없이 '300 kW ~ 10 MW 미만'을 중심으로 구성될 것으로 예상하였다.

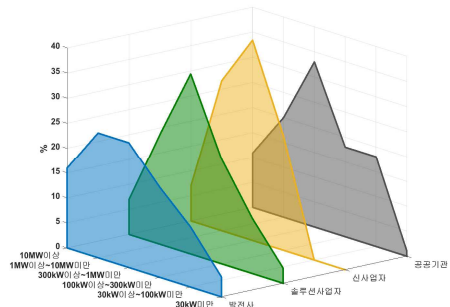


그림 2. 가상발전소 사업자 그룹별 자원 규모 구성 예상
Fig. 2. Estimated resource size composition of the virtual power plant operators in Korea

발전사, 솔루션사업자 그리고 공공기관 그룹은 각 자원규모 구성에 대해 비슷한 형태의 분포를 보이는 반면 신사업자는 소용량인 100 kW 미만 구간의 자원 구성을 선호하지 않는 것으로 나타났다. 이는 신사업자가 가상발전소 시장에서 경쟁력을 높이기 위한 전략으로 판단된다.

3. 가상발전소 구축비용 조사

가상발전소 구축을 위한 비용은 가상발전소 통합운영을 위한 플랫폼의 구축과 운영을 위한 비용과 참여 자원의 사이트별 구축 및 운영비용으로 분류하였다. 총 설문 참여자 중 비용 부분에 참여한 23명이며 각 항목에 대하여 유효한 응답을 기준으로 비용모델을 도출하였다.

3.1 가상발전소 플랫폼 구축 및 운영비용

가상발전소 플랫폼 구축비용은 사업자 유형별로 그림 3과 같이 나타났다. 가상발전소를 위한 IT기반 플랫폼 구축비용은 최소 10원에서 최대 5,000백만 원으로 응답되었다. 비용에 대한 응답 중 이상치 처리를 위하여 Z-score를 기준으로 +3 이상이거나 -3 이하인

응답은 제외하였다. 발전사 그룹의 경우 플랫폼 구축비용은 최소 0원에서 최대 2,000백만 원이 소요될 것으로 응답하였다. 솔루션사업자 그룹의 경우 최소 40백만 원에서 최대 비용이 2,000백만 원이 소요될 것으로 응답하였으며 전반적으로 최대비용을 다른 유형의 사업자들 보다 높게 추정하였다. 신사업자의 경우 최소 200백만 원에서 최대 4,000백만 원이 소요될 것으로 응답하였다. 신사업자 그룹의 평균비용 추산은 1,900백만 원으로 전체 평균 비용인 881백만 원보다 높게 나타났다. 공공기관 그룹은 최소 200백만 원에서 최대 2,000백만 원이 소요될 것으로 응답하였다.

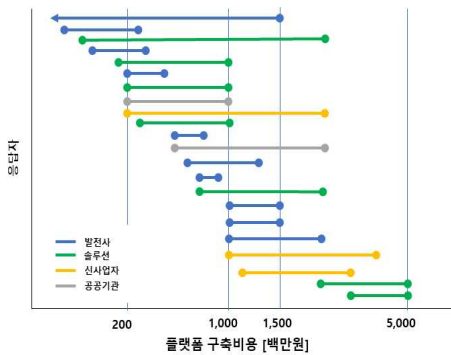


그림 3. 국내 가상발전소 플랫폼 구축비용
Fig. 3. Cost of building the virtual power plant platform in Korea

그림 4는 가상발전소 플랫폼 연간 운영비용을 사업자 유형별로 나타낸 것이다. 이는 플랫폼 구축비용에 응답한 그래프와 유사한 형태임을 확인할 수 있다. 플랫폼 구축비용과 동일한 기준으로 Z-score를 사용한 이상치 제거결과 플랫폼 연간 운영비용은 평균 158백만 원이며 최소 0원에서 최대 800백만 원으로 응답하였다. 발전사 그룹의 경우 최소 0원에서 최대 200백만 원이 소요될 것으로 응답하였다. 솔루션사업자 그룹의 경우 최소 10백만 원에서 최대 500백만 원으로 응답하였다. 신사업자 그룹의 경우에는 최소 20백만 원에서 최대 800백만 원의 비용으로 비용범위의 폭이 넓게 분포하였다. 공공기관 그룹의 경우 최소 50백만 원에서 최대 500백만 원이 소요될 것으로 응답하였다. 신사업자와 공공기관의 플랫폼 운영 평균비용은 각각

370백만 원, 213백만 원으로 전체 평균비용보다 높게 나타났다. 공공기관은 전체 평균비용보다 구축비용이 낮았던 점을 고려하면 운영비용을 높게 산정하는 경향을 보였다.

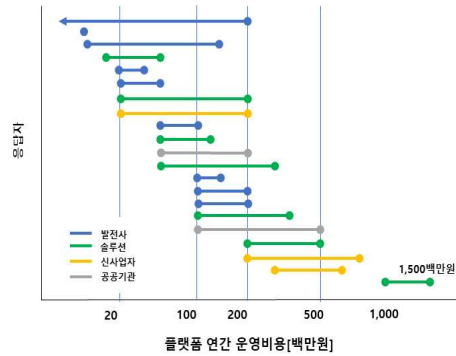


그림 4. 국내 가상발전소 플랫폼 운영비용
Fig. 4. Cost of operating the virtual power plant platform in Korea

표 3은 사업자 그룹별로 가상발전소 플랫폼 구축 및 운영비용 평균값을 보여준다. 플랫폼 구축 및 운영비용은 사업자 그룹별로 유사한 경향을 보였다. 플랫폼 구축비용은 신사업자 그룹이 전반적으로 높게 산정하였는데, 이는 가상발전소에 대한 최종 형상에 대한 이해의 차이로 추정된다.

표 3. 가상발전소 플랫폼 구축 및 운영비용 평균
Table 3. Average cost of building and operating a virtual power plant platform

(단위 : 백만 원)

분류	발전사	솔루션 사업자	신 사업자	공공 기관	평균
플랫폼 구축비용	769	592	1,900	925	881
플랫폼 운영비용	91	139	370	213	158

3.2 사이트별 설비 구축 및 운영비용

그림 5는 가상발전소 사이트별 설비 구축비용의 분포를 사업자 유형별로 나타낸 것이다. 가상발전소 사이

트별 설비 구축비용은 최소 0원에서 최대 60,000백만원이 소요될 것으로 응답하였다. 질문 내용을 잘못 이해한 것으로 판단되는 현저히 과도한 응답(사이트 당 60,000백만원)을 제외하고 이상치 제거를 위하여 동일한 Z-score 기준을 적용하였다. 발전사는 그룹은 사이트별 최소 0원에서 최대 15백만원이 소요될 것이라 응답하였으며 사이트별 구축비용의 평균은 6,059천 원으로 전체의 평균비용인 5,278천 원보다 높게 나타났다. 최소 0원의 추정값이 나온 것인 기 구축된 사이트가 가상발전소 통합을 위한 기능을 갖추고 있는 경우를 고려한 것으로 판단된다. 솔루션사업자 그룹은 최소 0원에서 최대 15백만원이 소요될 것으로 응답하였다. 신사업자 그룹의 경우 설비 구축비용은 최소 1백만원에서 최대 10백만원으로 전체 응답의 중앙값 근방에 분포하였다. 공공기관은 구축비용이 최소 0.2백만원에서 최대 10백만원이 소요될 것으로 응답하였다.

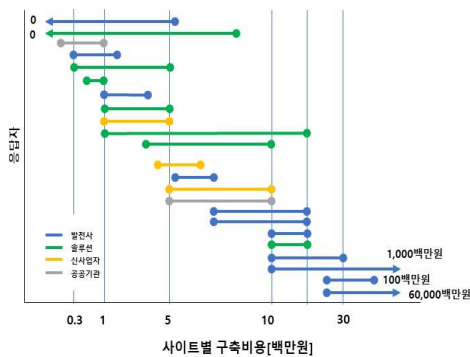


그림 5. 국내 가상발전소 사이트별 설비 구축비용
Fig. 5. Cost of building the virtual power plant in Korea

그림 6은 가상발전소 사이트별 운영비용의 분포를 사업자 그룹별로 나타낸 것이다. 가상발전소 연간 운영비용은 설비 구축비용과 비슷한 형태를 보여준다. 사이트별 운영비용 범위는 최소 0원에서 최대 90,000백만원이 소요될 것으로 응답하였다. 이중 최대비용이 7,000백만원과 9,000백만원의 비용은 앞서 사이트 구축비용에서 설문을 잘못 이해한 응답자로 운영비용 또한 잘못 응답하였을 것으로 판단된다. 이를 제외한

응답에 동일한 Z-score 기준을 적용하여 이상치를 제거하였다.

발전사 그룹의 경우 사이트별 운영비용 범위는 최소 0원에서 2백만원으로 응답하였다. 솔루션사업자 그룹은 최소 0원에서 최대 7백만원으로, 신사업자는 최소 0.5백만원에서 최대 5백만원으로 응답하였다.

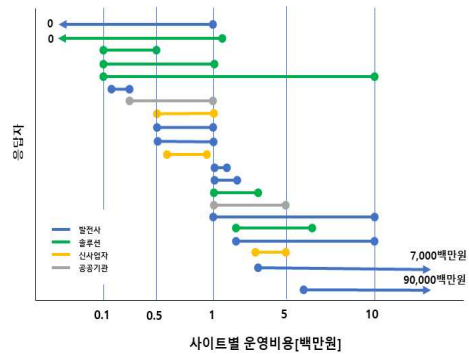


그림 6. 국내 가상발전소 운영비용
Fig. 6. Cost of operating the virtual power plant in Korea

표 4는 사업자 그룹별 평균 사이트 구축 및 운영비용을 나타낸 것이다. 발전사는 구축비용을 높게 산정한 반면 운영비용은 낮게 추정하였다. 반면 신사업자나 공공기관 그룹의 경우 운영비용을 높게 추정하는 경향을 보였다.

표 4. 가상발전소 사이트별 구축 및 운영비용 평균
Table 4. Average cost of building and operating a virtual power plant

분류	(단위 : 천 원)				전체
	발전사	솔루션 사업자	신사업자	공공 기관	
가상 발전소 구축비용	6,059	4,379	5,333	4,050	5,278
가상 발전소 운영비용	491	1,325	1,833	1,800	1,046

3.3 가상발전소 수익성 확대를 위한 환경

부가적으로 가상발전소의 수익성을 확대를 위해 중요하다고 생각되는 요소에 대하여 조사하였다. 관련 문항은 ‘전력시장 개선’, ‘보조서비스시장 신설’, ‘적정한 보조금 설계’, ‘사업자의 부가서비스 개발’, ‘발전예측 등 기술적 진보’, ‘경제적 active 자원 확보’, ‘가상발전 솔루션 및 플랫폼의 경제적 구축’으로 총 7개로 구성되었으며 우선순위 3가지를 선택하도록 하고 선택된 항목에 1점씩을 부여하였다. 설문 결과 그림 7과 같이 ‘전력시장 개선’, ‘적정한 보조금 설계’, ‘보조서비스시장 신설’이 각각 30, 26, 25점 순으로 중요도가 높은 것으로 나타났다.

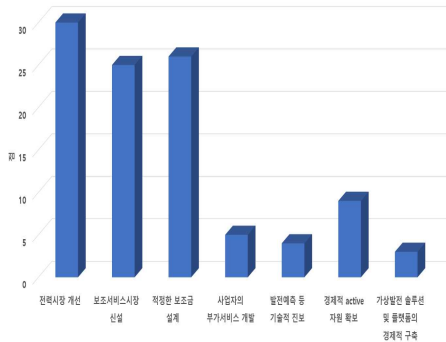


그림 7. 국내 가상발전소 수익성 확대의 중요성
Fig. 7. The importance of expanding profitability of virtual power plants in Korea

3.4 가상발전소 신규구축 기여분

가상발전소의 구축에 소요되는 비용은 사업자가 재생에너지 관리나 판매대행을 위해 어차피 투자하여야 하는 비용과 구분이 모호한 측면이 있다. 본 연구에서는 이를 도출하기 위하여 앞 절에서 조사된 투자 및 운영비용 중 순수하게 가상발전소를 위해서 추가로 투입되는 비용의 비중에 대하여 조사하였다. 그림 8은 가상발전소 플랫폼 운영에 있어서 신규 및 기존 구축비용을 제외하고 추가로 소요되는 비용에 대한 응답의 분포로 비용 기여분에 대한 응답자의 평균은 55%로 나타났다.

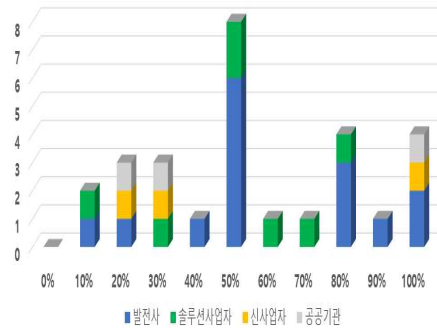


그림 8. 국내 가상발전소 신규구축 기여분 분포
Fig. 8. Distribution of contributions to the establishment of new virtual power plants in Korea

4. 가상발전소 비용추정 모델

4.1 가상발전소 비용추정 모델

비용 데이터 유효 응답자는 가상발전소의 최소/최대 규모와 자원 용량 구성에 모두 응답한 18명이었다. 이상치의 제거를 위하여 앞 절의 Z-score 기준을 사용하였으며, 비용모델의 도출을 위해 최종적으로 총 16명의 비용 데이터가 활용되었다. 유효 응답자가 제시한 가상발전소 최소/최대 규모와 추정비용의 최소/최대를 각각 매핑하여 규모에 따른 비용효과를 반영하였다. 가상발전소 플랫폼 운영비용과 사이트별 운영비용은 유지보수 비용을 추산하는 일반적인 방식을 고려하여 제시된 구축비용에 대한 운영비용 비율의 평균값을 적용하였다.

가상발전소 플랫폼과 사이트별 구축비용 모델은 로지스틱 회귀모델을 사용하여 도출하였다. 로지스틱 회귀모델은 사용하는 데이터가 어떤 범주에 속할 확률을 0에서 1사이의 값으로 예측하고 이벤트가 발생할 확률을 결정하기 위해 사용되는 통계 모델이다. 식 (1)은 로지스틱 회귀분석을 통해 나타난 가상발전소 플랫폼 및 사이트별 설비 구축비용 모델을 나타낸 것이다. 식 (1)의 x는 가상발전소의 용량이고 cap은 0~1값으로 도출된 결과 값을 실험데이터로 변환하기 위한 상수이며 b1, b2는 로지스틱 분석을 통해 얻은 회귀계수를 의미한다.

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(b_1 + b_2 x)}} cap \quad (1)$$

가상발전소 플랫폼 구축비용은 비용추정모델을 통해 도출하였다. 가상발전소 전체 사이트 구축비용을 구하기 위해서 추가적으로 용량구간 별 사이트 개수를 구하였다. 우선 용량구간의 평균값을 대푯값으로 설정하여 사이트 개수를 구하였다. 다음으로 비용추정모델을 통해 도출한 사이트별 구축비용과 사이트별 개수로 부터 사이트별 전체 구축비용을 산정하였다. 식 (2)는 가상발전소 전체 사이트 구축비용을 보여준다.

$$VPP\text{전체 사이트구축비용} = \sum_{Site \in \text{TypicalSite}} (CAPEX_{Site}^{System} \times n_{Site}) \quad (2)$$

가상발전소 플랫폼과 사이트별 운영비용은 앞서 구한 가상발전소 플랫폼과 사이트별 구축비용에 대한 운영비용 비율로부터 도출하였다. 가상발전소 규모에 따라 소요되는 비용은 플랫폼 구축비용과 운영비용, 전체 사이트 구축비용과 운영비용의 합으로 식 (3)과 같다.

$$Expense^{Total} = \sum_{Site \in \text{TypicalSite}} (CAPEX_{Site}^{System} \times n_{Site} + OPEX_{Site}^{System}) + (CAPEX^{Platform} + OPEX^{Platform}) \quad (3)$$

4.3 비용추정 모델 산정 결과

그림 9와 같이 비용추정모델의 산정 결과 P 값은 0.05이하로 유의미함을 확인하였다.

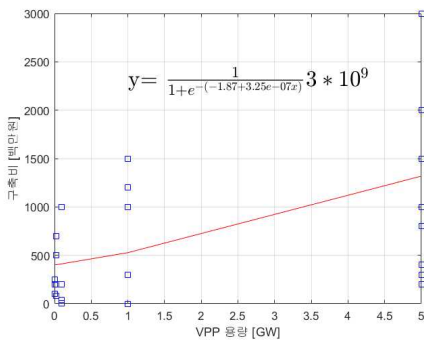


그림 9. 가상발전소 플랫폼 구축비용
Fig. 9. Cost of building a virtual power plant platform

표 5는 가상발전소 플랫폼 구축비용과 사이트별 구축비용에 대한 비용모델의 계수를 보여준다.

표 5. 비용모델 계수
Table 5. Cost model coefficient

	b1	b2	cap
플랫폼 구축비용 모델	-1.87	0.000000325	3,000,000,000
사이트별 구축비용 모델	-1.99	0.00011	30,000,000

구축비용에 대한 운영비용의 비율 평균은 가상발전소 플랫폼과 사이트별 운영비용을 도출하기 위해 적용되었으며 표 6과 같다.

표 6. 응답자들의 구축비용에 대한 운영비용의 비율 평균
Table 6. The average ratio of operating costs to construction costs of respondents

	운영비용/구축비용의 평균비율(%)
플랫폼 운영 비용모델	17
사이트별 운영 비용모델	18

그림 10은 사이트별 가상발전소 구축비용 모델을 도출한 것이다.

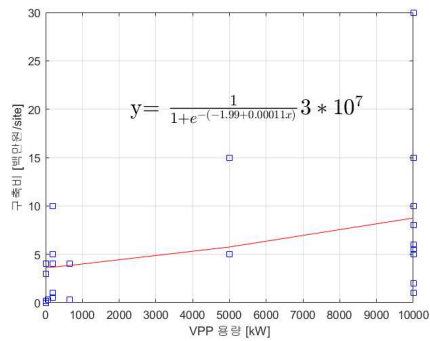


그림 10. 사이트별 가상발전소 구축비용
Fig. 10. cost of building the virtual power plant by site

4.4 가상발전소 비용추정 사례연구

가상발전소 비용모델을 이용하여 가상발전소 규모에 따른 사례연구를 진행하였다. 가상발전소 규모 20MW, 40MW, 100MW, 500MW에 대하여 사례연구를 진행하였고 가상발전소 참여자원의 규모에 따른 분포 시나리오 2가지에 대하여 비용을 도출하였다. 시나리오1은 설문조사에 따른 참여자원 규모별 분포를 기반으로 하였다. 이때 100 kW 미만 자원이 전체 용량의 15%를 차지하며, 100 kW ~ 1 MW 구간의 자원이 전체 용량의 75%를 차지한다. 시나리오2는 100 kW 미만의 자원을 포함하지 않는 중대형 위주의 분포로 구성되었다. 표 7은 시나리오 1과 2의 자원 구성을 보여준다.

표 7. 시나리오 1과 시나리오 2의 자원 구성
Table 7. Resource Configuration for Scenarios 1 and Scenarios 2

시나리오 구분	가상발전소 규모	참여자원 수	평균 자원 용량 합(kW)
시나리오 1	20MW	103	28,080
	40MW	204	45,510
	100MW	508	108,435
	500MW	2,534	511,980
시나리오 2	20MW	40	33,250
	40MW	76	50,650
	100MW	186	103,700
	500MW	926	507,000

그림 11은 시나리오에 따른 가상발전소 용량 분포를 보여준다.

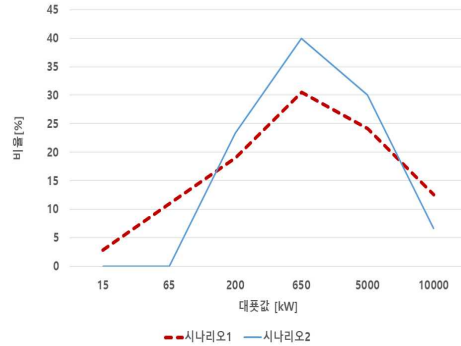


그림 11. 가상발전소 용량 분포 시나리오
Fig. 11. virtual power plant capacity distribution scenario

표 8은 가상발전소 규모별 비용을 보여준다. 사례연구 결과 동일한 규모일 때 용량 조합이 고르게 분포된 시나리오1 보다 중대형 위주로 구성된 시나리오 2에서 최소 29%에서 최대 59% 까지 비용이 낮게 나타났다. 이는 가상발전소 규모가 동일할 때 플랫폼 구축비용과 운영비용은 동일하지만 사이트별 구축비용과 운영비용에 차이가 있는 것에 기인한다.

표 8. 시나리오별 가상발전소 총 비용
Table 8. Total cost of virtual power plants by scenario

(단위 : 백만 원)

가상발전소 규모	시나리오1 (소규모포함)	시나리오2 (중대형위주)	비교
20MW	924	658	▽29%
40MW	1,365	822	▽40%
100MW	2,698	1,324	▽51%
500MW	11,570	4,718	▽59%

5. 결론

본 연구에서는 국내 전문가를 대상으로 진행한 설문 조사를 통해 가상발전소의 규모와 비용데이터를 수집하여 가상발전소 비용추정모델을 개발하였다. 사례연구로 가상발전소의 규모와 구성자원의 용량분포에 따른 2가지의 시나리오에 대한 비용 분석을 수행하였다. 사례연구에서 전체 규모를 20~500MW로 구성하였을 때, 참여자원이 중대형위주(용량 200 kW 이상)로 구

성된 가상발전소 소요 비용은 924~11,560 백만 원, 소규모가 포함된 구성에서는 658~4,718 백만 원으로 계산되었다. 가상발전소의 중대형위주 구성은 소규모를 포함한 구성 대비 29~51% 낮게 나타났다. 이는 참여자원을 연결하고 관리하기 위한 시스템의 구축 및 유지관리 비용이 큰 영향을 미치는 것을 의미한다. 즉, 지원제도의 설계 시에 가상발전소의 용량 뿐 만이 아니라 참여자원의 특성에 대한 고려가 필요하다. 본 연구의 결과는 가상발전소의 구축에 소요되는 비용을 산정함으로써, 가상발전소의 활성화를 위한 적정 지원의 규모를 도출할 수 있는 기초자료로 활용이 가능할 것으로 기대된다. 본 연구에서는 참여 전문가가 고려하고 있는 가상발전소의 모델을 표준화하지 않고, 각자의 모델과 비용 추산을 기반으로 비용 추정 모델을 도출하였다. 추후 연구에서는 표준화된 가상발전소에 대한 설계를 우선 수행하고, 이를 기반으로 비용조사를 수행하는 경우 개선된 비용모델의 도출이 가능할 것이다.

REFERENCES

[1] Ministry of trade, industry and energy, "The 3rd Basic Energy Plan", Ministry of trade, industry and energy, pp. 73, 2019.

[2] Kyeong-Hwan Kim, Keun-Ho Kim, Bong-Seok Kang, Jong-Min Lee, Hyeong-Jung Kim, "Status of overseas virtual power plant operation and implications for domestic introduction", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 563-564, 2020.

[3] Jeseok Ryu, Jinho Kim, "Case Study of Overseas Virtual Power Plant Operation to activate VPP in Korea Electricity Market", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 133-135, 2021.

[4] Koo-Hyung Chung, "The concept of virtual power plant (VPP) and implications for revitalizing power transactions with distributed resources", Korean Institute Of Industrial Engineers, pp. 4029-4050, 2019.

[5] Wonpoong Lee, Jihoan Lee, Jinho Lee, Dongjun Won, "Optimal Operation of Virtual Power Plants Considering the Participation of

Distributed Energy Sources", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 391-393, 2020.

[6] Ministry of trade, industry and energy, "Strategy to promote distributed energy", Ministry of trade, industry and energy, pp. 20, 2021.

[7] Erphan A. BhuiyanMd. Zahid HossainS.M. MuyeenShahriar Rahman FahimSubrata K. SarkerSajal K. Das, "Towards next generation virtual power plant: Technology review and frameworks", Renewable and Sustainable Energy Reviews, PP. 111358, 2021.

[8] R. Khan et al., "Energy Sustainability-Survey on Technology and Control of Microgrid, Smart Grid and Virtual Power Plant," in IEEE Access, vol. 9, pp. 104663-104694, 2021.

[9] L. Lind, C. Valor, R. Cossent, V. Labajo and C. Escudero, "New business models at distribution grids: a stakeholder consultation," CIRED 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, pp. 3140-3144, 2021.

저자약력

박혜연(Hye-Yeon Park)

[일반회원]



- 2021년 2월 : 가천대학교 전기 공학과(학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 차세대스마트에너지시스템융합학과 차세대스마트에너지시스템융합 전공 (석사과정)

<관심분야> 스마트그리드, VPP, ESS

박 상 윤(Sang-Yoon Park)

[일반회원]



- 2019년 2월 : 가천대학교 전기 공학과(학사)
- 2021년 8월 : 가천대학교 나노과학기술융합학과 전기공학 (석사)

〈관심분야〉 스마트그리드, VPP 최적운영, 경제성 분석

손 성 용(Sung-Yong Son)

[중신회원]



- 1990년 KAIST 학사
- 1992년 KAIST 석사
- 2000년 Univ. of Michigan, ANN Arbor 박사
- 2006년 ~ 현재 : 가천대학교 전기공학과 교수

〈관심분야〉 스마트그리드, 스마트홈, 스마트시티