

V2G 충방전 시나리오별 편익/비용비(Benefit cost ratio) 및 민감도 분석 기반 경제성 비교

이미영*, 한동호*, 조상우*, 김재영*, 김종훈*

충남대학교 에너지저장변환연구실*

Economic Comparison based on Benefit/Cost ratio and Sensitivity Analysis by V2G Charging and Discharging Scenario

Miyoung Lee, Dongho Han*, Sangwoo Cho*, Jaeyoung Kim*, Jonghoon Kim*

Energy Storage Conversion Lab., Chungnam National University*

ABSTRACT

전기차 (Electric vehicle; EV) 시장의 급격한 성장과 함께 EV 배터리를 활용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 본 연구는 EV 배터리 활용에 대한 사용자 인식을 제고하고자 EV 배터리를 하나의 에너지원으로 사용하여 계통으로 부하를 전달할 수 있는 전력망-EV 배터리 연동 기술 (Vehicle to grid; V2G)의 경제성 분석을 수행하였다. V2G 참여를 가정하였을 때 V2G의 빈도에 따른 편익/비용비 (Benefit cost ratio ; BC ratio) 기반 경제성 분석을 수행하였다. 비용으로는 시나리오별 배터리 열화 비용을 선정하였고 편익으로는 시나리오별 요금제 차등에 따른 이익, 환경적 이익을 선정하였다. 총 비용과 편익에 대한 비율을 고려하여 경제적으로 얼마나 이익이 되는가를 분석하였으며, 각 파라미터의 민감도 분석을 통해 V2G 시나리오별 경제성에 영향을 미치는 인자를 선정하였다. 그 결과 V2G 방전을 자주 진행할수록 더 높은 경제적 이익을 얻을 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

전기차 (Electric vehicle; EV) 시장이 매년 성장함에 따라 EV 배터리의 활용 방안에 대한 연구가 지속되고 있다. 특히 재사용 배터리 (Re-used battery)와 같은 이차 활용 방안에 대한 연구가 진행되고 있으나, EV를 사용하고 있는 동안에는 활용이 불가하다는 점에서 한계가 있다. 본 연구는 EV를 실제 운행하고 있는 동안 활용이 가능한 방안에 관해 연구하고자 하였으며, 이에 대한 기술로 EV 배터리-전력망 연동 기술 (Vehicle-to-grid; V2G)이 있다. V2G는 전력이 풍부할 때 EV 배터리를 충전하고 전력 수요가 높을 때 부하 안정화를 위해 EV 배터리에 저장된 전력을 계통으로 방전하는 기술이다. EV는 운행 중 외에는 모두 잠재 에너지 저장 장치로 사용될 수 있어 V2G 방전 빈도에 따라서는 계통 측면 및 사용자 측면 모두에 경제적으로 작용할 수 있다. 본 연구는 V2G 방전 빈도에 따라 경제성 분석을 수행하여 사용자에게 V2G 선택적 활용에 대한 방안을 제공한다. 수행한 경제성 분석 기법은 편익/비용비 (Benefit/cost ratio; BC ratio) 분석 기법으로 V2G 방전 빈도를 시나리오화하여 시나리오별 편익 파라미터와 비용 파라미터 산출 및 이의 비율로 경제성을 판단하는 기법이다^[1]. 편익 파라미터로 EV 충방전 요금제 차등에 따른 이익, V2G 방전 수행에 따른 발전 제한으로 인한 환경적 요인을 설정하였고,

비용 파라미터로 V2G 시나리오별 배터리 잔여 유효 용량 (Remaining-useful- life; RUL)을 설정하였다. EV 충방전 요금제의 경우, 충전 요금은 한국전력공사 (Korea electric power corporation; KEPCO) 요금제를 참고하였고, 방전 요금은 기존 논문에서 계산한 방전 요금을 사용하였다^[2]. 환경적 요인에 대한 이익으로는 다른 발전 전력을 사용하지 않았을 때의 소요 비용으로 산정하였다. 비용 파라미터인 배터리 RUL의 경우 장단기 기억 (Long short-term memory; LSTM) 신경망 기법을 사용해 장기 기억에 대한 의존도를 높여 기존 시계열 예측 기법의 한계를 보완하여 산정하였다. 편익 파라미터와 비용 파라미터를 기반으로 경제성 분석을 수행한 결과 V2G 시나리오에 더 자주 참여한 EV의 경제성이 더 높음을 확인하였다. 또한 파라미터 별 경제적 영향성을 파악하기 위해 민감도 분석을 수행하였고 그 결과 요금제 차익에 대한 차등별 이익이 가장 영향력 있음을 확인하였다.

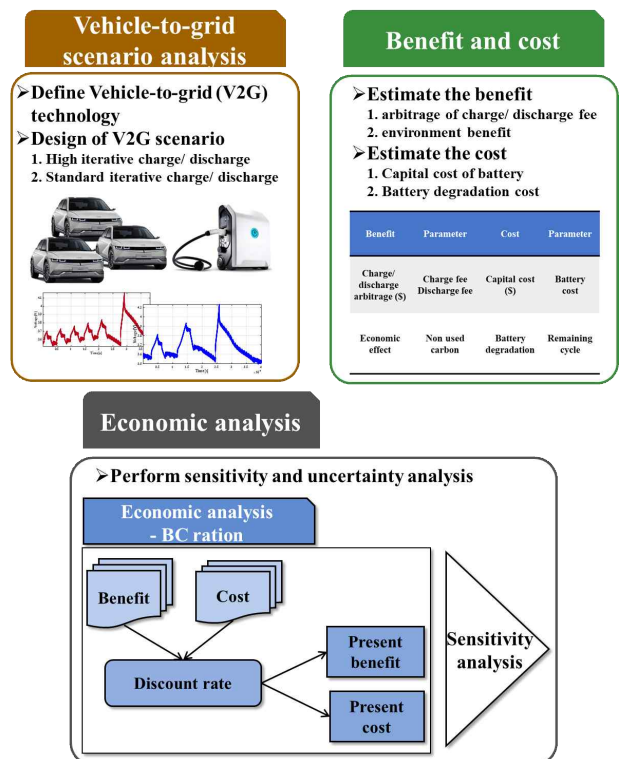


그림 1 V2G 시나리오별 경제성 분석 모식도

Fig. 1 Economic analysis schematic diagram by V2G scenario

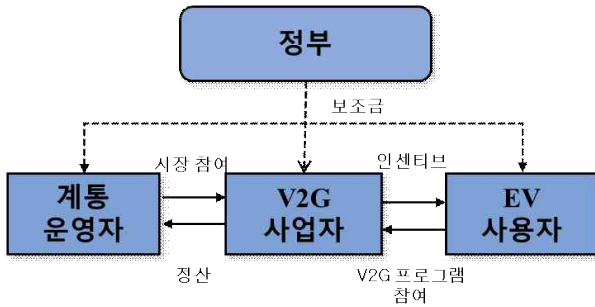


그림 2 본 연구에 사용된 V2G 비즈니스 모델
Fig. 2 Business model of V2G used in this research

2. 경제성 분석 기법 선정

경제성 분석은 현재의 편익(Benefit) 및 비용(Cost)을 미래의 가치로 환산하여 사업의 경제적 타당성을 분석하는 기법이다. 본 연구는 V2G 시나리오별 편익 및 비용의 비율을 계산하여 어떤 시나리오가 경제적으로 타당성이 높은지에 대한 정보를 소비자에게 제공하고자 한다. V2G의 비즈니스 모델은 그림 2와 같으며 비즈니스 모델에 따라 비용 및 편익 파라미터를 산정하여 경제성 분석 기법의 인자로 활용한다. 본 연구에서는 BC ratio 분석 기법 기반 V2G 시나리오별 경제성 분석을 수행하였다.

2.1 편익/비용비 (Benefit/Cost ratio)

BC ratio는 일정한 할인율을 적용하여 현재 가치화한 비용과 편익을 산출한 후 비용에 대한 편익의 비율을 적용하여 사업의 경제적인 타당성을 판단하는 방법이다^[3].

$$B/C\ ratio = \frac{\sum_{n_0}^k B_k / (1+r)^k}{\sum_{n_0}^k C_k / (1+r)^k} \quad (1)$$

여기서 n_0 는 사업의 개시 시점, r 은 할인율, B_k , C_k 는 각각 k 년도의 편익과 비용을 의미한다. 일반적으로 어떤 사업에 대한 B/C ratio를 계산한 결과 1보다 크면 그 사업은 경제적 타당성이 있음을 판단할 수 있다. 본 연구는 V2G 시나리오별 B/C ratio를 계산하였으며, 현재 시점부터 EV 운행에 대한 시점을 총 10년으로 하여 어떤 시나리오가 경제적으로 우세한지에 대해 비교하였다.

표 1 경제성 분석을 위한 이익/비용 파라미터

Table 1 Benefit and cost parameter for economic analysis

Benefit	Parameter	Cost	Parameter
Charge/discharge arbitrage (\$)	Charge fee Discharge fee	Battery degradation (\$)	Battery cost * remaining year
Economic effect	Non used carbon		

3. B/C ratio 기반 V2G 시나리오별 경제성 평가

본 연구에서는 V2G 방전의 빈도를 다르게 하여 시나리오를 2개 설계하였다. 동일한 부하 조건 하에서 V2G 방전 빈도에 따른 배터리 열화를 비용 파라미터로 산정하였다. 또한 방전 빈도에 따라 사용자가 받게 되는 인센티브 및 환경적 효과는 편익 파라미터로 산정하여 경제성 분석을 수행하였다.

3.1 V2G 시나리오별 사용자 이익

3.1.1 V2G 시나리오별 요금제 차등에 따른 이익

전기차 배터리 충전 시 한국전력공사에서 설정한 시간대별 충전 비용이 산정되어 있다. 아직 V2G 방전 시 요금제에 대한 기준이 명확하게 나와있지 않지만, 기존 논문에서 산정한 방전 요금제 가격을 설정하여 V2G 방전 시간대별 요금을 산정하였다. 이를 표 2에 나타내었다.

표 2 전기차 충전요금 및 V2G 방전 시 인센티브

Table 2 Charge fee of EV and incentive of V2G discharge

전력량 요금(원/kWh)			
시간대	여름철	봄가을철	겨울철
경부하 시간대	52.6	53.7	75.7
중간부하 시간대	140.3	65.5	123.2
최대부하 시간대	227.5	70.4	185.8

V2G 인센티브(원/kWh)			
시간대	여름철	봄가을철	겨울철
최소 인센티브 시간대	242.72	244.08	271.24
중간 인센티브 시간대	350.99	258.64	329.88
최대 인센티브 시간대	458.64	264.69	407.16

3.1.2 V2G 시나리오별 환경적 이익

계통 부하가 불안정하게 될 경우 기존 발전소에서 전력 생산을 위해 환경적 문제가 발생한다. 이에 대해 V2G 방전 전력을 활용함으로써 다른 발전 전력을 사용하지 않고도 부하 안정화가 가능하다. 1kWh 전기 생산에 원전 500원, 풍력 4,059원, 태양광 3,422원이 소요된다^[3].

3.2 V2G 시나리오별 사업 참여에 따른 비용

3.2.1 V2G 시나리오에 따른 배터리 열화 비용

배터리는 부하 조건에 따라 열화 경향이 다르게 나타난다. 따라서 V2G 시나리오 조건에 따라 상이한 열화 경향이 발생한다. 이를 반영하기 위해 본 연구에서는 LSTM 기반 RUL을 예측하여 시나리오별 비용으로 산정하였다. 배터리 RUL 예측을 위해 V2G 시나리오별 부하 조건 하에서 배터리 열화 실험을 진행하였으며 이를 그림 3에 나타내었다. 부하 프로파일은 EV 주행 패턴을 모사하였으며, 충전 및 V2G 방전 프로파일을 상이한 빈도수로 설계하여 실험을 진행하였다. EV 운행시 배터리 잔여 용량을 산정하기 위해 기보유한 니켈-망간 계열의 33J 배터리로 RUL 예측을 진행한 후 전이학습을 기반으로 주행 패턴 모사 배터리에 적용하여 RUL을 산정하였다. 다만, 본 연구를 진행함에 있어 수명 종료 시점의 V2G 시나리오 패턴 열화 데이터가 부재하였기 때문에 2년 정도 운행한 배터리 RUL을 기준으로 예측하였다. RUL의 비용은 배터리 가격(\$)/보증 기한(year)을 하여 연간 주행 시 소요되는 비용을 산정하였으며, 다음과 같다.

$$C_{B, RUL} = \frac{C_{B, BOL}}{\text{Expired date}} \quad (1)$$

$C_{B, RUL}$ 은 RUL의 배터리 비용이며 $C_{B, BOL}$ 은 배터리 신품일때의 가격, Expired date는 배터리 제조업체에서 보증하는 기간, RUL은 LSTM과 전이학습으로 구한 예측 시기이다. 전이학습 기반 배터리 RUL 예측 과정 및 결과를 그림 4, 5에 나타내었다.

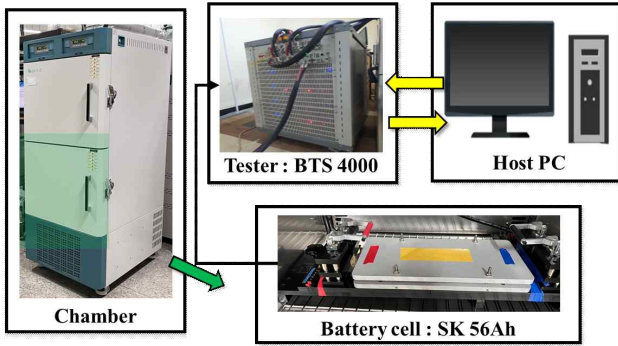


그림 3 V2G 시나리오별 패턴 열화 실험 셋업
Fig. 3 Schematic of RUL prediction based on transfer learning and Long-short term memory

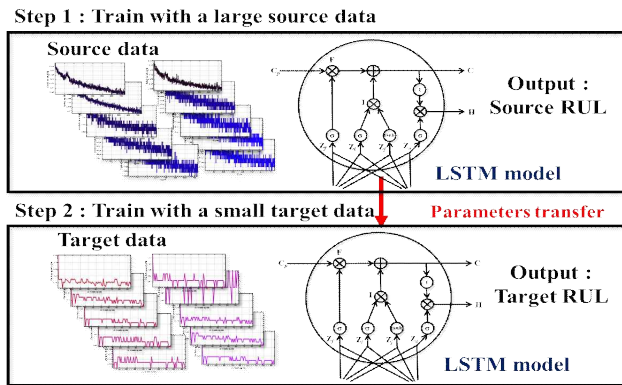


그림 4 장단기 기억 신경망 및 전이학습 기반 RUL 예측 모식도
Fig. 4 Schematic of RUL prediction based on transfer learning and Long short-term memory

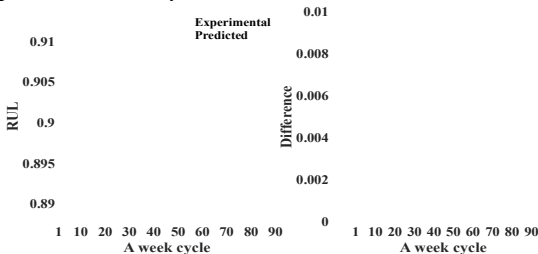


그림 5 장단기 기억 신경망 및 전이학습 기반 RUL 예측 결과
Fig. 5 Result of RUL prediction based on transfer learning and Long-short term memory

3.3 V2G 시나리오별 경제성 분석 결과

본 연구에서는 V2G 방전의 빈도를 다르게 시나리오를 설계 후 경제적 이익을 비교하였다. 충전의 경우 태양광 충전으로 인해 부하 수요를 보충할 수 있다고 판단하여 낮 시간대에 진행한다고 가정하고 방전의 경우 태양광이 없는 밤 시간대에 진행한다고 가정하였다. 사용된 배터리의 경우 아이오닉 5에 탑재되는 SK on 파워치 배터리를 사용하였으며 이에 대한 사양을 표 3에 나타내었다.

표 3 현대차 아이오닉 5 탑재 배터리 셀 사양
Table 3 Specification of Hyundai IONIQ5 EV battery

Battery	Capacity	Cycle	Price	합계 (20년 주행)
Sk 56Ah	56Ah/77.6kWh	3,000회	50\$/2,000\$	100\$/년

1회 충전 진행 시 25%를 진행한다고 가정하였을 때 약 20kWh를 충전하게 되며 4,550원이 소요된다. 방전의 경우에도

25%를 계통으로 방전 진행 시 7,020원의 이익을 얻게된다. V2G 방전 시 2,500원의 이득을 얻을 수 있으며, 그 결과 방전 빈도수가 2배 높다고 가정하였을 때 V2G 빈번 시나리오에서 평균 2배 이상의 이익을 얻을 수 있다. 또한 환경적 이익을 고려하였을 때도 방전 빈도수가 2배 높은 시나리오의 경우 V2G 표준 시나리오 대비 2배 이상의 이익을 얻을 수 있다. 반면 V2G 방전 빈도가 빈번한 시나리오의 경우, RUL 예측 결과가 동일한 것을 확인할 수 있다. 따라서 V2G 방전 빈도수가 빈번한 시나리오에서 경제적으로 이득이 됨을 확인할 수 있다.

표 4 V2G 시나리오별 B/C ratio 결과
Table 4 Result of B/C ratio according to V2G Scenario

Scenario	Benefit(20kWh 기준)	Cost	합계
V2G 빈번 (n>m)	요금제 차익	2,500*n	200\$*year
	환경적 이익	3,422*20*n	
V2G 표준 (n>m)	요금제 차익	2,500*m	200\$*year
	환경적 이익	3,422*20*m	

3.4 V2G 시나리오에 따른 민감도 분석

V2G 시나리오별 비용과 이익 파라미터의 변화가 경제적으로 미치는 영향을 분석하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석은 사업의 경제적 타당성에 영향을 미치는 요소 중 수익성에 가장 영향을 미치는 인자를 분석하는 방법이다^[4]. 이를 위해 배터리 열화, V2G 요금제, 환경적 요금과 같은 주요 경제성 인자들에 다른 수치를 적용하여 경제성에 대한 변화를 비교 및 분석하였다. 그 결과 V2G 방전 빈도수에 따른 영향을 미치는 인자는 요금제 차익에 의한 것으로 결론지었다.

4. 결론

본 연구는 V2G 사업의 활성화를 위해 EV 사용자의 V2G 방전 참여 빈도에 따른 경제성 분석을 수행하여 소비자들에게 경제적 이익에 대한 정보를 제공한 연구이다. 민감도 분석 수행 결과 V2G 방전 빈도에 의해 경제적으로 영향을 미치는 인자는 충전 및 방전 인센티브에 의한 차익임을 확인할 수 있다. 따라서, V2G 방전 빈도수가 높을수록 경제적으로 이득이 됨을 확인할 수 있었다.

본 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2022-1711152629, 대규모 분산 에너지 저장장치 인프라의 안전한 자율운영 및 성능 평가를 위한 지능형 SW 프레임워크 개발) 및 한국 전력연구원(KEPRI)의 2021년 선정 기초 연구개발 과제 연구비 지원을 받아 수행한 연구과제(R21X002-09, V1G 및 V2G 충방전 패턴 개발 및 배터리 수명 영향 평가)에 의해 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 백건, 정환민, and 김진호. "데이터 기반의 Vehicle-to-Grid 경제성 분석방안." 대한전기학회 학술대회 논문집 (2021): 736-737.
- [2] 여정훈, and 정영진. "분산전원을 이용한 중소형건물의 유연수요반응 (Flexible DR) 최적화 연구." 조명·전기설비 35.1 (2021): 48-56.
- [3] 산업부 발전비용 분석, 1KWh 전기생산에 원전 500원 들지만 풍력 4,059원(8.1배), 태양광 3,422원(6.8배)
- [4] 백민규, et al. "태양광 연계형 배터리 에너지 저장장치의 최적 용량 산정." 전기학회논문지 67.1 (2018): 38-45.