

Study on Operating Guidelines of Electric Vehicles considering Negawatt Market

수요자원 거래시장을 고려한 전기차 운영기준에 관한 연구

Ken-Mo Yang, DONG-MIN KIM†
양근모, 김동민†

Department of Electrical Engineering, Dongshin University, Gunjae-ro 185, Naju, Jeonnam, 520-714, Korea
† dmkim@dsu.ac.kr

Abstract

The concept known as Vehicle-to-Grid (V2G) is to provide power to help balance loads by charging at night when demand is low and sending power to the grid when demand is high. Therefore, it is important to model the cost-benefit characteristics of Electric vehicle(EV)'s operation considering the negawatt market in real time. This paper proposes a methodology to formulate the various costs and economic benefits for sending the EV's power back to the grid, including a concept of inconvenience costs caused by operating the EV as a battery. This paper also introduces the general decision-making process based on the cost-benefit analysis in order to simulate the reasonable participation of V2G service. In the case study, it is confirmed by two-case simulations that the proposed approach is useful to help EV owners' decision-making. In the future, it is expected that the proposed methodology can be used as a decision-making guideline to help prepare the EV' power transmission.

Keywords : Electric vehicle, vehicle to grid, decision-making, demand response, negawatt

I. 서론

최근 탄소배출 감축 방안에 대한 관심이 증가하고, 에너지산업의 패러다임이 변화면서 전기차(EV; Electric Vehicle)에 관한 연구 및 실증이 활발히 진행되고 있다. 이러한 전기차의 가장 큰 특징은 전력계통에 연계되는 것이다. 고 용량의 배터리를 갖는 플러그인 하이브리드 자동차(PHEV; Plug-in Hybrid Electric Vehicle)는 기존 하이브리드 자동차와 달리 충전을 위해 계통에 접속된다. 기술력이 진보하면서 PHEV는 전력만으로 구동하는 완전한 Electric Vehicle (EV)로 전환될 전망이다. 증가하는 EV는 또 하나의 전력 소비원 및 분산전원으로, 전력인프라에 큰 비중을 차지할 것으로 예상된다.

전력 소비원으로서의 EV는 충전부하의 증가로 인한 전력부하패턴의 변화 등, 여러가지 문제점을 수반하며 이러한 충전부하 제어를 위한 방법들이 다양하게 연구되고 있다 [1-6]. 이는 전력계통의 안정도를 고려하는 방법, 가격신호를 통해 충전시간의 이전을 유도하는 방법, 최적화 기법을 통한 자동충전제어 등의 형태로 분류할 수 있으며, 전력계통의 다양한 상태뿐만아니라 전력요금을 비롯한 다양한 제어신호를 전달할 수 있는 AMI (Advanced Metering Infrastructure)를 통해 수행된다.

분산전원으로서의 EV는 V2G (Vehicle To Grid)라는 이름으로 역송전을 통한 전력분배의 새로운 방안을 제시하고 있다 [7-8]. V2G란 전기차 배터리의 에너지 저장 능력을 이용하여, 가격이 비싼 피크타임에 이미 충전된 잉여 전력을 전력계통으로 재전송하여 판매하는 개념이다. 이러한 V2G 서비스의 참여는 각 EV소유자들의 수요반응(DR; Demand reponse)이 필요하며, 이는 계통운영자(ISO; Independent System Operator) 및 전력부하관리사업

자(LA; Load aggregator)와의 계약을 통해 수행될 것이다 [1][11].

V2G 서비스 참여를 위해 EV 소유자는 배터리 충전 비용을 비롯한 여러 가지 비용을 고려해야하며, 이 비용들은 EV 소유자의 역송전 의사 결정의 기준이 된다. 이에 선행연구에서는 EV 배터리의 충전비용 뿐만 아니라 충방전 반복에 따른 배터리의 수명감소를 정식화한 열화비용을 상세히 모델링하였고 [9], 이러한 배터리의 충전비용, 열화비용, 주행패턴 등을 고려하여 최적의 EV 운영 기법을 제안하였다 [10].

하지만 V2G 서비스의 취지인 전력 재분배 효과를 제고하기 위해서는 EV 소유자가 배터리의 충전량을 주행에 사용하지 않고, 모두 역송전하는 경우가 고려되어야하며, 이는 EV 정지로 인한 불편비용을 야기한다. 또한 수요자원시장에 참여하는 EV 소유자는 매 시점 계약한 DR 수행으로 발생하는 수익과 비교하여 V2G 서비스 참여 여부를 결정하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 합리적인 EV 정지 비용 산정 방법을 비롯한 다양한 V2G 서비스 참여 비용을 정식화하고, 수요자원시장 참여를 통한 수익을 함께 고려하여, EV 소유자의 역송전 의사결정과정을 고찰한다. 사례연구에서는 제안하는 비용·편익분석 방법을 2가지 Case의 가정 상황에 대해 모의하여 그 유용성을 확인한다.

II. 본론

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 V2G 서비스 참여로 인한 비용과 편익을 EV 소유자의 관점에서 구분하여, 역송전 의사결정의 기준으로 활용한다.

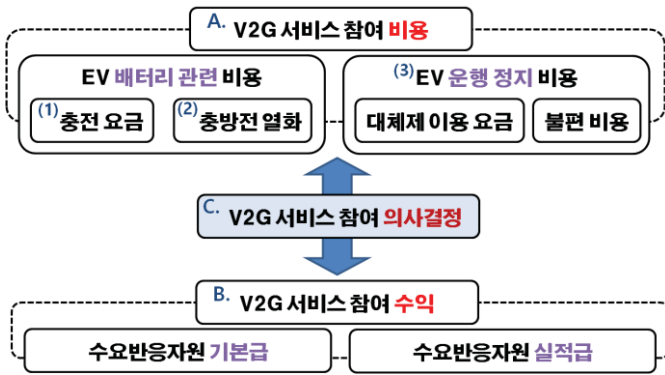


Fig. 1. Outline of Cost-benefit Analysis for V2G

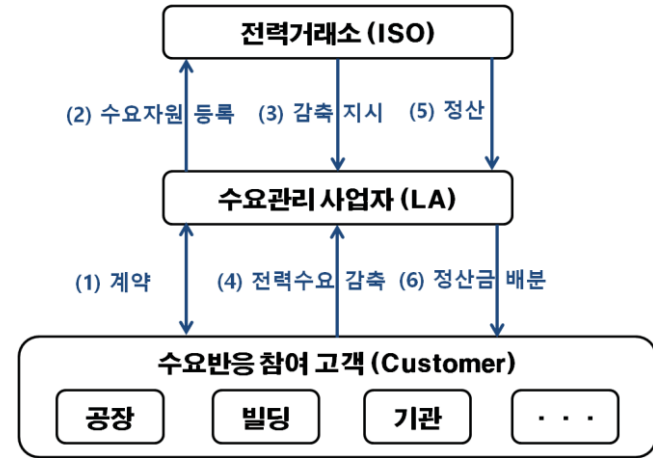


Fig. 2. Outline of the negawatt market in Korea

A. V2G 서비스 참여 비용

EV를 운영하기 위해 발생하는 비용은 초기 차량 및 배터리 구입 비용뿐만 아니라, 배터리의 충전 비용 및 열화로 인한 수명 비용, 그리고 차량 유지보수 비용 및 감가상각 등을 모두 고려해야 한다. 하지만 본 논문은 V2G 서비스 참여에 대한 의사결정을 목적으로 비용·편익 분석을 수행하며, 따라서 EV 주행 목적의 비용은 제외한 배터리의 ‘충전 비용’ 및 ‘열화 비용’만을 정식화하여 활용한다.

1) 배터리 충전요금

EV 소유자가 V2G서비스에 참여하여 방전을 통한 전력 판매를 위해서는 기본적으로 전기차 배터리의 충전이 필요하다. Table 1은 현행 국내 전기자동차 충전전력 요금표이며, 이를 이용하여, EV 배터리 충전비용 C_1 은 식 (1)과 같이 정식화할 수 있다.

$$C_1 = (C_{Demand}^{Charge} \times P_{Batt}^{Charge} / AT_1) + (C_{Energy}^{Charge} \times P_{Batt}^{Charge}) \quad (1)$$

여기서, C_{Demand}^{Charge} 는 충전용량 기본요금, C_{Energy}^{Charge} 는 시간대별 충전 전력량 요금이며, P_{Batt}^{Charge} 는 배터리의 충전 전력량을 의미하며, AT_1 는 기본요금을 시간당 요금으로 환산하기 위한 계수(1시간 완충 가정)이다.

Table 1. Electric Vehicle Charging Tariff (KEPCO)

Demand Charge [KRW/kW]	Time period	Energy charge [KRW/kWh]		
		summer	spring /Fall	winter
Low-voltage 2,390	Off-peak	57.6	58.7	80.7
	Mid-peak	145.3	70.5	128.2
	On-peak	232.5	75.4	190.8
High-voltage 2,580	Off-peak	52.5	53.5	69.9
	Mid-peak	110.7	64.3	101.0
	On-peak	163.7	68.2	138.8

Table 2. Electric Vehicle Charging Tariff (SMRT)

Distance [km]	Basic fare [KRW]	Additional fare [KRW/km]	편도 소요시간 [hour]	해당거리 [km]	지하철 이용요금 [KRW]
0 ~ 10		0	0.5	20	1,250
10 ~ 40	1,050	20	1.0	40	1,650
Over 40		10	1.5	60	1,850

2) 배터리의 충·방전 열화비용

EV 소유자가 V2G서비스에 참여하기 위해 배터리의 충·방전을 수행하면, 그에 해당하는 수명 감소가 발생한다. 이러한 배터리 열화비용 C_2 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$C_2 = \frac{P_{Batt}}{P_{Batt}^{Total}(D)} \quad (2)$$

여기서 P_{Batt} 는 EV 배터리의 가격, D 는 DOD (Depth of Discharge)를 의미하며, $P_{Batt}^{Total}(D)$ 는 배터리의 전체 수명 동안 사용할 수 있는 총 가용 전력량으로 식 (3)과 같이 D 의 함수로 표현된다 [9].

$$P_{Batt}^{Total}(D) = Cycle(D) \times 2 \times D \times \mu^2 \quad (3)$$

여기서 $Cycle(D) \times 2$ 는 해당 DOD의 완전 충·방전 사이클을 표현하며, μ^2 는 충·방전효율을 의미한다.

3) EV 운행 정지 비용

본 논문에서는 V2G서비스 참여를 위해 EV 운영을 정지하여야 하는 경우, 이로 인한 불편비용을 산정하기 위해, 이에 상응하는 대중교통 이용 방법 중 지하철을 대체재로 선정하였다 [11]. 지하철의 정시성은 일정거리마다 발생하는 구간별 추가요금을 통해 소요시간에 따라 증가하는 EV 운행정지 불편비용을 추종하기에 적합하다. Table 2는 지하철의 기본운임과 구간별 추가운임을 이용하여 소요시간별 이용요금으로 환산한 결과이다.

대체재의 이용요금을 기준으로 산정한 EV 운행 정지비용 C_3 는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$C_3 = (C_{Basic}^{Metro} + C_{Add}^{Metro}) \times 2 + \alpha \quad (4)$$

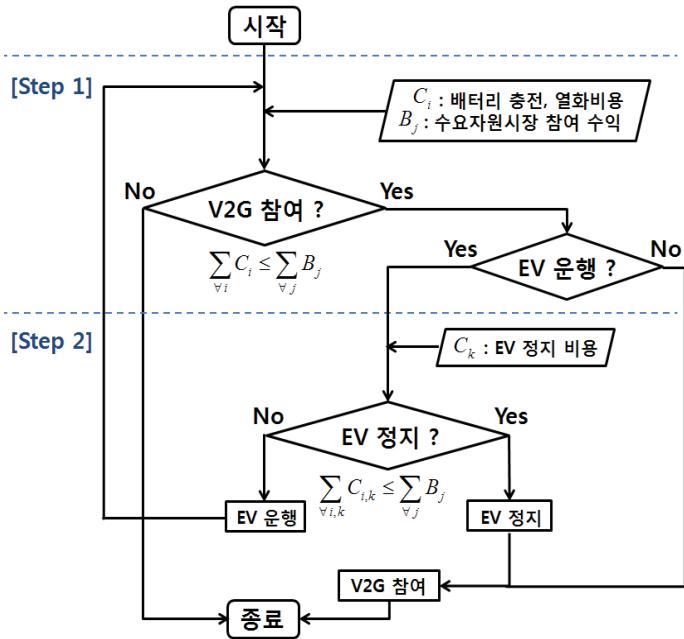


Fig. 3. Decision-making process based on the cost-benefit analysis to participate in V2G service

여기서, C_{Basic}^{Metro} 는 지하철 기본운임, C_{Add}^{Metro} 는 일정 구간 이후 차등 가산되는 지하철 추가운임을 의미하며, 2배하여 왕복 요금을 EV 운행정지 불편비용의 기준으로 산정하였다. 또한, α 는 이동의 접근성을 비롯한 계량되지 않은 ‘편의성’을 표현한 값으로 개별 EV 소유자마다 다른 값을 할당할 수 있다.

B. V2G 서비스 참여 수익

EV 소유자가 V2G 서비스에 참여하고 얻는 편익은 Fig. 2의 현행 국내 수요반응자원 시장을 고려하여 정식화할 수 있다 [12]. Fig. 2에서 LA와 계약한 고객이 EV를 소유자하고 있는 경우, V2G를 통해 전력수요 감축을 이행하고, LA에게 그에 상응하는 정산금을 배분받는다.

ISO로부터 정산받는 LA의 수요반응자원 기본급은 수요자원 감축가능시간(09~20시, 12~13시 제외) 동안 의무감축 용량에 대해 기본급단가를 지급하며, LA로부터 배분받는 EV 소유 고객의 V2G 서비스 참여를 통한 감축의 기본수익분은 식 (5)와 같이 산정할 수 있다.

$$B_1 = CP \times P_{Batt}^{DR} / AT_2 \tag{5}$$

여기서, CP 는 수요반응자원에 참여하는 용량가격 (Capacity Payment)이며, P_{Batt}^{DR} 는 수요반응 참여를 위해 방전 가능한 배터리 전력량, AT_2 는 P_{Batt}^{DR} 를 시간당 방전가능 전력량(용량)으로 환산하기 위한 계수를 의미한다.

ISO로부터 정산받는 LA의 수요반응자원 실적급은 급전지시에 따른 실적감축량(신뢰성 DR)은 감축시간대의 최고변동비로 정산하며, 하루전시장에서 낙찰 받은 실적감축량(경제성 DR)은 전력계통한계가격으로 정산한다. 따라서 LA로부터 배분받는 EV 소유 고객의 V2G 참여를 통한 감축 실적수익분은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$B_2 = (MVC \text{ or } SMP) \times P_{Batt}^{DR} \tag{6}$$

여기서, MVC는 실시간 급전지시에 따른 최고변동비 (Maximum Variable-cost)를, SMP는 발전계획에 따라 실시간으로 변하는 전력계통한계가격(System Marginal Price)을 의미한다.

C. V2G 서비스 참여 의사결정 과정

Fig. 3은 EV 소유자가 비용과 편익을 고려하여 V2G 서비스에 참여 의사결정을 수행하는 과정을 보여준다. [Step 1]에서는 식 (7)과 같이 EV 배터리의 충전 및 열화 비용과 수요자원시장 참여 수익을 비교하여 V2G 서비스 참여에 대한 의사결정을 수행한다.

$$\sum_{\forall i} C_i \leq \sum_{\forall j} B_j \tag{7}$$

여기서, 비용이 수익보다 큰 경우 V2G 서비스에 참여하지 않으며, 수익이 비용보다 크거나 같아 V2G 서비스 참여가 가능한 경우, 현시점 EV 운행의 필요 여부에 따라 [Step 2]를 진행한다.

[Step 2]에서는 EV 운행의 필요하지 않은 경우 V2G 서비스에 참여하게 된다. 또한 EV 운행이 필요한 경우, EV 소유자는 식 (8)과 같이 EV 정지로 인한 불편 비용 포함하여 수요자원시장 참여 수익과 비교하여 의사결정을 진행한다.

$$\sum_{\forall i,k} C_{i,k} \leq \sum_{\forall j} B_j \tag{8}$$

여기서, 비용이 수익보다 큰 경우 V2G 서비스에 참여하지 않고 EV를 운행 목적으로 사용하며, 반대의 경우 ‘EV 정지 후 V2G 서비스에 참여’를 결정한다.

III. 사례연구

A. 모의 조건

EV 소유자의 V2G 서비스에 참여(수요반응 의사결정) 과정을 모의하기 위해, 다음과 같은 2가지 Case의 가정 하에 사례 연구를 수행하였다.

1) Case I

- EV 배터리 : 용량=24 kW (SM3 EV), P_{Batt} =654 천원
- 충전비용 C_1 : Table 1의 저압, Mid-peak 시점, 겨울철 요금(2,390 원/kW 및 128.2 원/kWh) 적용
- 열화비용 C_2 : $D=0.8$, $Cycle(D)=1000$, $\mu=0.9$
- 정지비용 C_3 : Table 2에서 환산한 소요 시간별 지하철 요금
- DR 기본수익 B_1 : $CP=4209$ 원/kW-m (2015년 1월 기준, 해당일:21일, 해당시간:10시간)
- DR 실적수익 B_2 : $SMP=140$ 원/kWh (2015년 1월 평균)

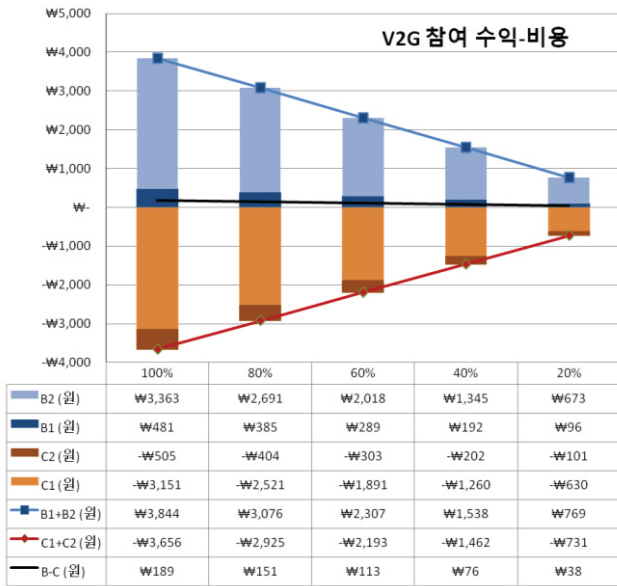


Fig. 4. Cost-benefit analysis for V2G (Case I - Step 1 in Fig. 3)

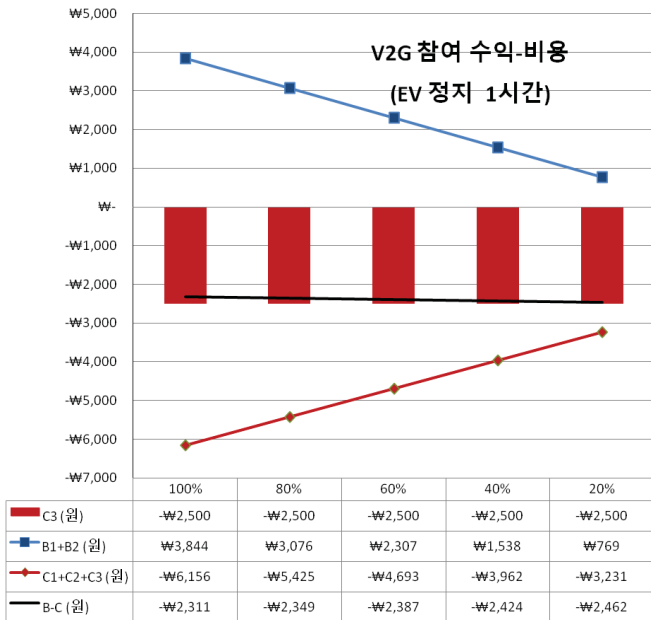


Fig. 5. Cost-benefit analysis for V2G (Case I - Step 2 in Fig. 3)

Case I의 모의 조건은 부하관리사업자(LA)와 ‘계약용량 및 실적 전력량의 비율로 DR 수익을 배분’하기로 계약한 고객, SM3 EV 소유하고 있을 때, 어느 겨울철 특정시간, 수요반응(DR)의 일환으로 V2G 서비스에 참여하는 상황을 가정한 것이다.

2) Case II

- EV 배터리 : Case I과 동일
- 충전비용 C_1 : Table 1의 저압 요금(2015년 1월 27일 기준, 시간대별 차등 요금) 적용
- 열화비용 C_2 : Case I과 동일
- 정지비용 C_3 : Case I과 동일
- DR 기본수익 B_1 : CP는 2015년 1월 27일 기준 실데이터 (시간대별 차등 금액) 적용

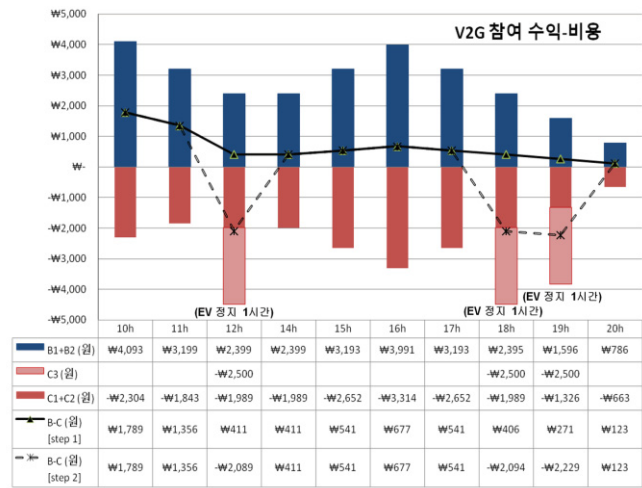


Fig. 6. Cost-benefit analysis for V2G (Case II)

○ DR 실적수익 B_2 : SMP는 2015년 1월 27일 기준 실데이터 (시간대별 차등 금액) 적용

Case II의 모의 조건은 Case I과 동일한 상황에서, 2015년 1월 27일 실 데이터를 기준으로 V2G 서비스에 참여하는 상황이며, 12, 18, 19시에 EV운행이 필요한 경우를 가정한 것이다.

B. 모의 결과 및 해석

1) Case I

Fig. 4와 5는 각각 Fig. 3의 [Step 1]과 [Step 2]에서 의사결정의 기준이 되는 ‘V2G 서비스 참여 수익-비용’을 방전 비율(100%~20%)별로 비교한 그래프이다.

Fig. 4에서 V2G 서비스 참여 수익은 DR 실적수익 B_2 가 가장 큰 비중을 차지하며, DR 기본수익 B_1 은 월간 기본급을 시간당, 참여 용량당 값으로 환산되어 상대적으로 미비함을 확인할 수 있다. 이는 LA와 계약한 DR 용량은 V2G 서비스 참여 이외의 방법으로도 수행 가능한 고객의 경우로 한정하여 산출한 결과이기 때문이다. 또한 V2G 서비스 참여 비용은 배터리의 충전비용 C_1 이 열화비용 C_2 에 비해 상대적으로 큰 비중을 차지함을 확인할 수 있으며, 비용과 수익 모두 배터리의 방전 비율에 비례하여 감소하는 결과를 얻었다. 이는 모든 시점에서 공통된 결과이며, 따라서 V2G 서비스 참여의 기준은 DR 실적수익 B_2 와 배터리의 충전비용 C_1 에 가장 큰 의존성이 있음을 알 수 있다. Fig. 4과 같이 식 (7)의 결과를 얻는 EV 소유자는 현시점 EV 운행이 필요하지 않으면 바로 역송전을 통해 수익을 얻으며, EV 운행이 필요한 경우 Fig. 5과 같이 EV 정지를 검토한다.

Fig. 5는 1시간 EV 정지 후 V2G 서비스에 참여하는 경우를 검토한 결과이다. 수익은 Fig. 4와 동일하며, 비용은 기존의 값에 EV 정지로 인한 불편비용 C_3 가 추가된다. 모의 시점의 경우 C_3 로 인해 비용이 수익을 초과하는 결과를 얻었으며, 따라서 EV 소유자는 정지를 고려하지 않고 운행의 목적으로 사용되는 것이 유리함을 알 수 있다.

2) Case II

Fig. 6은 특정일의 실 데이터를 활용하여, 특정시간에 EV운행이 필요한 경우를 가정하고, Fig. 3의 의사결정 과정을 수행한 결과이다. 모의 결과, EV 정지 미고려 시 (step 1 in Fig. 3)에는 수요자원입찰이 가능한 모든 시간대에서 V2G 서비스 참여를 통해 수익을 올리는 것이 가능하지만, EV운행이 필요한 경우(12, 18, 19시)에는 (step 2 in Fig. 2) EV 정지의 불편을 감수하면서 V2G 서비스에 참여하는 것은 손해임을 확인할 수 있다.

하지만 이는 LA와 계약한 DR 용량을 V2G 이외의 방법으로도 감축 가능한 고객의 경우로 한정하여 산출한 결과이기 때문에, 다른 방법으로 부하 감축이 어려운 경우 Fig. 6의 C_3 값은 DR 미수행 위약금과 비교하는 근거로 활용하는 것이 가능하다

IV. 결론

본 논문에서는 EV 배터리의 충전 및 열화 비용, 그리고 대체제인 지하철 운임으로 산정한 EV 정지 비용을 고려하여 EV 소유자의 V2G 역송전 의사결정 과정을 고찰하였다. V2G의 목적은 전력의 재분배에 있으며, 이는 수요자원시장의 목적과 일치한다. 따라서 V2G 서비스 참여 수익은 수요자원시장 참여의 정산 메커니즘을 고려하여 정식화하는 것이 가능하다.

제안한 의사결정 과정을 모의한 결과 V2G 서비스 참여의 기준은 배터리의 충전비용 C_1 와 DR 실적 수익 B_2 에 가장 큰 의존성이 있음을 확인하였으며, EV 정지를 고려하는 것은 대부분의 시간대에서 비경제적인 - C_3 을 감당할 수익이 발생하지 않는 - 결과를 얻었다.

향후, 제안하는 방법이 EV 소유자의 의사결정 과정을 돕는 'EV 역송전 판단의 기준'으로 활용되기 위해서는 EV 정지 비용 산정 방법의 보완과 더불어 DR 미수행 위약금을 포함한 V2G 서비스 참여 수익의 구조의 추가 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Korea Electric Power Corporation (KEPCO) through Korea Electrical Engineering & Science Research Institute. (grant number : R14XA02-37)

REFERENCES

- [1] "Technology Roadmap Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles", OECD/IEA, 2009.
- [2] M. Caramanis, "Management of Electric Vehicle Charging to Mitigate Renewable Generation Intermittency and Distribution Network Congestion" IEEE Conf. on Decision and Control, 2009.
- [3] A. Joao, M. Pedeo, S. Pilipe, et al. "Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System" Vol. 99, No. 1, January 2011.
- [4] S. Shengnan, Z. Tianshu, P. Manisa and R. Saifur, "Impact of TOU Rates on Distribution Load Shapes in a Smart Grid with PHEV Penetration", IEEE PES, 2010.
- [5] K. Qian, C. Zhou, "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems" IEEE Trans. on power systems, 2010
- [6] 김옥원, 신흥열, 김진오, 김규호, "전력 보조서비스 제공을 위한 전기자동차 충/방전 최적화", 전기학회 논문지, 63, 8, 1033-1038, 2014.
- [7] 배정효, 이현구, 하태현, 이성준, 김성철, 김대경, 손홍관, "국내외 V2G 시장 현황 및 전망", 2011 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 675- 676, 2011.
- [8] Scott B. Peterson, et al, "The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage", Journal of Power Sources, 195, 2377-2384, 2010.
- [9] Sekyung Han, Soohee Han. Hirohisa Aki, "A practical battery wear model for electric vehicle charging application", applied energy, 113, 1100-1108, 2014.
- [10] 황준하, 김도윤, 신민호, 고안열, 원일권, 원충연, "V2G 시스템에서 배터리의 DOD를 고려한 OPEX 최적화 기법", 2014 한국조명전기설비학회 춘계학술대회 논문집, 395-396, 2014.
- [11] 윤상식, "대체재의 가용여부가 WTA와 WTP에 미치는 효과", 한국심리학회지, 22, 4, 601-619, 2010.
- [12] 전력거래소, "전력시장운영규칙", 14-5차, 2014. 12.