

V2G 전기자동차의 부하관리 자원 활용을 위한 적정 지원금 산정에 관한 연구

A Study on the Decision of Appropriate Subsidy Levels Regarding Electric Vehicles for V2G as Load Management Resources

김정훈* · 황성욱†
(Jung-Hoon Kim · Sung-Wook Hwang)

Abstract - Recently, various energy efficiency optimization activities are ongoing globally by integrating conventional grids with ICT (Information and Communication Technology). In this sense, various smart grid projects, which power suppliers and consumers exchange useful informations bilaterally in real time, have been being carried out. The electric vehicle diffusion program is one of the projects and it has been spotlighted because it could resolve green gas problem, fuel economy and tightening environmental regulations. In this paper, the economics of V2G system which consists of electric vehicles and the charging infrastructure is evaluated comparing electric vehicles for V2G with common electric vehicles. Additional benefits of V2G are analyzed in the viewpoint of load leveling, frequency regulation and operation reserve. To find this benefit, electricity sales is modeled mathematically considering depth of discharge, maximum capacity reduction, etc. Benefit and cost analysis methods with the modeling are proposed to decide whether the introduction of V2G systems. Additionally, the methods will contribute to derive the future production and the unit cost of electric vehicle and battery and to get the technical and economic analysis.

Key Words : V2G (Vehicle to grid), Battery, Load leveling, Benefit cost analysis, Subsidy level, Economic analysis, California standard practice test, Avoided cost, Power system analysis

1. 서 론

세계 각국은 저탄소 녹색성장의 일환으로 기존의 전력망에 정보통신기술을 접목하여 전력 공급자와 소비자가 양방향으로 실시간 정보를 교환함으로써 에너지효율을 최적화하는 스마트그리드 사업을 추진하고 있다. 또한 이산화탄소 저감 및 연비개선과 환경규제 강화 등에 대응하기 위한 그린카 시장은 지속적으로 성장할 것으로 예상된다. 현재 우리나라의 1인당 에너지 사용량은 성공적인 수요관리를 통해 증가를 멈춘 캘리포니아나 유럽, 일본 등과 달리 미국의 패턴을 따라가고 있다. 우리나라는 1인당 에너지 사용량이 매년 증가하고 있으며, 특히 전기에너지의 사용 비율이 높아지고 있다. 전력 소비량과 최대수요의 상관관계가 높으므로 최대수요가 증가하는 경향이 있는데, 최대수요 증가는 곧 전력설비의 확충을 의미하며, 이에 따른 추가 비용이 발생하게 된다. 이러한 배경에서 피크시간대에 V2G 전기자동차의 배터리

에 충전했던 전력을 계통에 공급하는 방법은 최대수요를 낮추어 높은 단가의 발전소 건설비용과 연료비용을 회피하는 효과를 가져올 수 있다. 이에 따른 이익을 소비자에게 지원금의 형태로 일부 환원하여 소비자와 정부가 모두 이익을 얻을 수 있는 V2G 시스템의 도입이 고려되고 있다.

본 논문에서는 일반 전기자동차가 아닌 V2G 시스템의 도입 시 전력계통의 관점에서 추가로 발생하는 인프라 비용을 고려한다. 또한 기저부하 시에 전기자동차 배터리에 저장한 전력을 피크부하 시에 판매하여 얻는 편익을 분석하여 V2G 시스템의 경제성을 평가한다. 이 때, 배터리의 방전심도를 고려하여 배터리 총 방전 사이클 횟수별 판매 가능한 전력량이 변하는 특성을 반영한다. 최종적으로 V2G 시스템의 보급 확산을 위하여 캘리포니아 테스트를 활용한 적정 지원금 수준을 산정한다.

2. V2G 시스템의 비용이익 요소 분석

미래에는 전기자동차가 반드시 보급된다고 가정하고, V2G 시스템의 경제성을 평가한다. ESS와 마찬가지로 V2G 시스템 역시 부하평준화, 예비력 및 주파수 안정, 전력품질 보상 및 비상전원, 신재생에너지 출력 제어 등의 역할을 할 수 있다. 이들 기능 중에 기술적, 경제적 측면에서 볼 때 부하평준화 기능이 상대적으로

† Corresponding Author : R&D Strategy Office, KEPCO Research Institute, Daejeon, Korea

E-mail : outward@kepco.co.kr

* School of Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

Received : January 8, 2016; Accepted : January 27, 2016

로 초기에 적용될 것으로 판단되며, 이에 본 논문에서는 부하평준화만을 고려하도록 한다.

V2G 시스템 기반의 전기자동차는 일반 전기자동차와 달리 양방향 충전이 가능해야 한다. 그러므로 V2G 시스템이 있는 전기자동차는 일반 전기자동차와 달리 사용되는 인버터와 충전장치가 다르다. 또한 이러한 V2G 시스템을 사용자가 효율적으로 관리하고 조절할 수 있도록 V2G 제어장치가 추가로 설치된다. 표 1에 V2G 시스템을 도입하였을 때 발생하는 비용과 이익 요소를 정리하였다.

표 1 V2G시스템 도입에 따른 비용 및 이익 요소
Table 1 Benefit and cost factor of V2G system

| 비용 · 이익요소 | 유형 | 전기자동차 (일반) | 전기자동차 (V2G) |
|-----------|----------|------------|---------------|
| | 기기 | 인버터 | 단방향 |
| 기능 | 충전장치 | 가정용 일반 | 가정용 V2G |
| | V2G 제어장치 | X | 0 |
| 기능 | 부하 평준화 | X | 회피비용, 요금수입 감소 |

V2G 전기자동차를 통하여 경부하시간대의 요금으로 충전한 전력을 부하이동에 의해 비싼 최대부하시간대에 판매하기 때문에 요금수입 감소가 발생한다. 앞선 연구에서 주택용 ESS를 대상으로 제안한 바와 마찬가지로 [1], 피크부하시간과 최대부하시간, 중부하시간대, 경부하시간대로 나누어 경부하시간대에 충전을 하고 피크시간과 최대부하시간대에 방전을 하는 경우 부하평준화 수준을 계량화할 수 있고 부하평준화에 의해서 나타나는 요금수입 감소액을 산정할 수 있다.

피크부하가 나타나는 시간은 1시간 단위를 기준으로 하며 피크부하는 L_p , 최대부하시간대 t_m 부터 t_m 까지 부하는 L_H , 중간부하시간대 t_{M1} 부터 t_{Mn} 까지 부하는 L_M , 경부하시간대 t_{B1} 부터 t_{Bn} 까지 부하는 L_B 라고 구분한다. 경부하시간대에 충전을 하게 되면 임의의 경부하시간대에 부하전력 변화 ΔL_{Bi} 가 생긴다. 하지만 임의의 경부하시간대에 최대로 충전할 수 있는 부하전력 $V(V2G)_B$ 가 존재한다. 또한 피크부하와 최대부하가 나타나는 시간대에서도 각각 최대로 방전을 할 수 있는 부하전력 $V(V2G)_P$ 와 $V(V2G)_H$ 가 존재한다. 그리고 경부하시간대의 충전량을 E_B , 최대부하시간대의 방전량을 E_H , 피크부하시간대의 방전량을 E_P 로 나타내고 충방전 시 발생하는 전력 손실을 고려하여 충방전 효율을 η 으로 나타낸다.

$$\Delta L_{Bi} = L_B^N - L_{Bi} \quad (1)$$

$$\Delta L_{Hi} = L_H^N - L_{Hi} \quad (2)$$

$$L_P = L_P^N - L_P \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \min(\Delta L_{Bi}, V(V2G)_B) \times t_{Bi} = E_B \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^l \min(\Delta L_{Hi}, V(V2G)_H) \times t_{Hi} = E_H \quad (5)$$

$$\min(\Delta L_P, V(V2G)_P) \times t_P = E_P \quad (6)$$

$$\eta \cdot E_B = E_H + E_P \quad (7)$$

여름의 대표일 요금 수입 감소액은 ΔC_S 이고 여름은 D_S 만큼 지속된다. 봄 · 가을의 대표일 요금 수입 감소액은 ΔC_F 이고 봄 · 가을은 D_F 만큼 지속된다. 겨울의 대표일 요금 수입 감소액은 ΔC_W 이고 D_W 만큼 지속된다. 각 계절의 대표일 요금 수입 감소액은 식 (8)과 같이 구해지고 1년간 요금 수입 감소액은 식 (9)와 같이 구해진다.

$$\Delta C_L = \sum_{j \in D_S} \Delta C_{Sj} T_{Sj} + \sum_{j \in D_F} \Delta C_{Fj} T_{Fj} + \sum_{j \in D_W} \Delta C_{Wj} T_{Wj} \quad (8)$$

$$\Delta C_{Sj} = C_{PS} \min(\Delta L_{PS}, V(V2G)_{PS}) \times t_{PS} + C_{HS} \sum_{i \in D_{HS}} \min(\Delta L_{HSi}, V(V2G)_{HSi}) \times t_{HSi} - C_{BS} \sum_{i \in D_{BS}} \min(\Delta L_{BSi}, V(V2G)_{BSi}) \times t_{BSi} \quad (9)$$

한편, 전기차의 배터리는 방전심도에 따라 수명이 달라지므로 최적 방전심도까지 사용하고 다시 충전하는 방식을 취해야 하는데, 이 방식을 취하면 충전한 상태에서 사용하지 않는 용량이 발생한다. 또한 매일 일정한 주행거리를 주행용 전력으로 사용하면, 판매용 전력은 전체용량에서 사용하지 않는 용량과 주행용 용량을 뺀 나머지가 된다. 축전지의 용량은 사용함에 따라 점차 전체 용량이 감소하므로, 사용하지 않는 용량과 판매용 용량에 이에 비례하여 줄어들게 된다. 이 개념을 그림 1에 나타내었다.

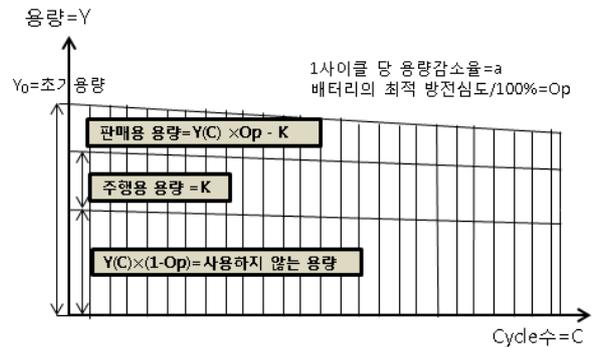


그림 1 판매 가능용량
Fig. 1 Sellable capacity of V2G

3. V2G 전기자동차의 적정 지원금 산정

3.1 지원금 산정을 위한 비용 데이터 가정

양방향 인버터의 가격은 일반적인 단방향 인버터와 비슷한 것

으로 발표되고 있다[2]. 그래서 전기자동차에 V2G시스템을 도입 하였을 경우 경제성을 평가할 때 인버터의 가격은 차이를 두지 않는다. 일반전기자동차용 충전기는 250만원으로 조사되었고, V2G용 전기자동차 충전기는 500만원, V2G Controller의 가격은 100만원으로 가정한다. 국내 전기자동차 가격은 2013년도 기준으로 약 4000만원에서 4500만원 정도이며, 전체 가격에서 가장 큰 비중을 차지하는 배터리 가격은 980만원, 1300만원, 1400만원 등으로 제조사별 용량(16.4kWh, 21.4kWh, 24kWh)에 따라 상이하다. 2013년도 기준의 가격과 성능을 바탕으로 약 30% 가격이 하락한 경우를 표 2와 같이 가정하였다.

표 2 본 논문에서 고려된 배터리 충방전 횟수 및 가격
Table 2 Considered charge & discharge frequency and price

| 구 분 | 기준 | 가격 30% 하락 |
|-------------|------|-----------|
| 배터리 가격(만원) | 1440 | 1019 |
| 배터리 용량(kWh) | 24 | 24 |
| 충방전횟수(회) | 5000 | 10000 |

3.2 캘리포니아 테스트를 활용한 적정 지원금 산정

수요관리 프로그램 평가를 위하여 미국 DOE 주도로 개발된 캘리포니아 테스트는 UC(전력회사), P(참여자), RIM(비참여자)로 나타나는 각 경제주체별로 편익/비용 분석을 실시하고 지원금에 따라서 각 주체별로 편익/비용이 어떻게 달라지는가를 보여주는 방법론이다. 캘리포니아 테스트는 다음 식 (10), (11), (12)와 같이 구성된다.

$$UC = AC - OC - I - UH \tag{10}$$

$$P = I + LR + FA - PH \tag{11}$$

$$RIM = AC - OC - I - UH - LR \tag{12}$$

V2G 전기자동차에 대한 지원금(I) 범위를 결정하기 위해서 세 가지 경제 주체의 회피비용(AC), 프로그램 비용(OC), 전력회사 기기비용(UH), 참여자 기기비용(PH)은 주어진 것으로 가정하고, 요금 수입 감소액(LR)은 위에서 언급한 바와 같이 계량화하는 수학적 모델링을 수립하여 구해야 한다. 지원금(I)은 변수로서 각 주체의 이익/비용을 변화시키며 적정 지원금의 범위를 결정한다. 특히, 본 논문에서는 통상적인 캘리포니아 테스트와 달리 기존 자동차를 전기자동차로 대체함으로써 발생하는 자동차 유류비의 회피비용(FA)을 고려하였다. 주요 이익 및 비용 요소는 다음과 같으며, 상세한 비용요소 정보는 선행 연구[1-8]를 참고하였다.

- AC = 설비회피비용 + 에너지회피비용
- OC = 0원으로 가정
- PH = 전기차 가격 + 인프라 비용 - 일반자동차 가격
- LR = 전기판매액 - (판매용전기 사용 비용 + 주행용전기 사용 비용)
- UH = 급속충전기 단가/10

2013년 전기자동차 가격에 비하여 약 30% 가격이 하락한다는 가정 하에 자동차 1대당 비용이익 분석 결과와 캘리포니아 테스트 결과를 표 3과 그림 2에 각각 보였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 각 주체가 서로 만족할 수 있는 B/C 교차점이 존재하지 않기 때문에 정책 입안자 또는 프로그램 운영자는 지원금 수준을 합리적인 범위 내에서 결정해야 하는데, 이 경우 지원금을 전혀 지급하지 않더라도 모든 주체의 B/C 수준이 1.0 이상으로 이론적으로는 지원금이 필요 없는 사례가 된다. 이는 가격의 30% 하락만으로도 전기자동차 보급을 촉진할 수 있다는 의미로 판단할 수 있으며, 따라서 V2G용 전기자동차 보급 정책은 전기자동차를 일시불로 구매하는 것이 부담되는 고객을 대상으로 한 용자 서비스와 같은 프로그램 위주로 구성함으로써 V2G 시스템을 통해 얻은 수익으로 매달 상환하도록 하는 방안을 고려해볼 수 있다.

표 3 비용-이익 분석 결과 비교
Table 3 Comparison of benefit and cost analysis results

| 비용 및 이익 요소 (1대) | 기준 | | | 가격 30% 하락 | | |
|-----------------|-------|--------|-------|-----------|---------|-------|
| | UC | P | RIM | UC | P | RIM |
| 회피비용 | 591 | - | 591 | 944 | - | 944 |
| 전력회사 기기비용 | 250 | - | - | 250 | - | - |
| 프로그램 관리비용 | - | - | - | - | - | - |
| 지원금 | I | I | I | I | I | I |
| 요금수입 감소액 | - | 401 | 401 | - | 802 | 802 |
| 유류비 회피비용 | - | 7700 | - | - | 15400 | - |
| 참여자 기기비용 | - | 3500 | - | - | 3260 | - |
| 총편익 | 591 | 8101+I | 591 | 944 | 16202+I | 944 |
| 총비용 | 250+I | 3500 | 401+I | 250+I | 3260 | 803+I |

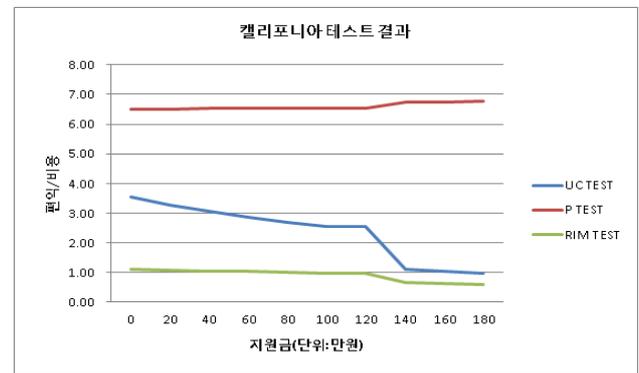


그림 2 캘리포니아 테스트 결과
Fig. 2 California test results

4. 결 론

본 논문에서는 V2G 전기자동차와 일반 전기자동차의 구매비용 차이 및 추가적인 배터리 사용으로 인한 수명감소비용 등을 고

려한 비용요소와 V2G의 부하평준화 기능을 통해 얻은 이익을 사용자 관점과 정부의 관점에서 구하여 경제성을 평가하였다. 또한 일반자동차와 V2G 전기자동차의 편익과 비용요소를 구하여 캘리포니아 테스트를 통해 지원금 수준에 따른 경제주체별 비용-이익 평가를 통해 적정 지원금의 가능 범위를 설명하였다. 상세하게 고려되지 않은 비용 이익 요소들이 많으므로 이에 대한 연구와 에너지저장장치의 생산 및 판매와 관련된 경제주체들과 관련 산업의 입장을 고려하여 보다 정밀한 경제성 분석 연구가 필요하며, 에너지저장장치의 보급 확산에 따라 변화하는 부하모델 연구와 이를 기반으로 한 전력계통 안정도 연구가 요청된다.

감사의 글

이 논문은 2012년 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며(No.2012R1A1A2008071), 한국전력공사 지원에 의하여 전력연구원의 주관으로 수행된 과제(R15DA13)의 연구 결과입니다.

기호 설명

L_p : 피크부하
 L_H : 최대부하시간대 부하
 L_M : 중간부하시간대 부하
 L_B : 경부하시간대 부하
 t_{H1} : 최대부하시간대 시작 시점
 t_{H2} : 최대부하시간대 종료 시점
 t_{M1} : 중간부하시간대 시작 시점
 t_{M2} : 중간부하시간대 종료 시점
 t_{B1} : 경부하시간대 시작 시점
 t_{B2} : 경부하시간대 종료 시점
 ΔL_{Bi} : 경부하시간대 충전 시 부하 변화
 ΔL_{Hi} : 최대부하시간대 방전 시 부하 변화
 $V(V2G)_B$: 경부하시간대 최대 충전 부하
 $V(V2G)_H$: 최대부하시간대 최대 방전 부하
 $V(V2G)_p$: 피크부하시간대 최대 방전 부하
 E_B : 경부하시간대 충전량
 E_H : 최대부하시간대 방전량
 E_p : 피크부하시간대 방전량
 η : 총방전 효율
 ΔC_S : 여름의 대표일 요금 수입 감소
 ΔC_F : 봄·가을의 대표일 요금 수입 감소
 ΔC_W : 겨울의 대표일 요금 수입 감소
 ΔC_L : 각 계절의 대표일 요금 수입 감소 합계
 ΔC_{Sj} : 1년 전체 요금 수입 감소

D_s : 여름 지속기간
 D_f : 봄·가을 지속기간
 D_w : 겨울 지속기간
 AC : 회피비용
 OC : 프로그램 비용
 UH : 전력회사 기기비용
 PH : 참여자 기기비용
 I : 지원금
 LR : 요금 수입 감소액
 FA : 기존 자동차 유튜브 회피비용

References

- [1] Jung-Hoon Kim, et. al., "A Study on the Decision of Appropriate Subsidy Levels for Energy Storage Systems Considering Load Leveling in Smart Place", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 63, No. 2, pp. 211-216, Feb. 2014.
- [2] T. Gage, "The Car, The Grid, The Future", The Seattle Electric Vehicle to Grid Forum, June 2005.
- [3] Jin-Yong Choi and Eun-Sung Park, "A Study on the V2G Application using the Battery of Electric Vehicles under Smart Grid Environment", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 63P, No. 1, pp. 40-45, 2014.
- [4] Jung-Hoon Kim, et al., "A Study on the Economic Analysis of Peak Shaving Effect by BESS and the Decision of Appropriate Subsidies Using California Standard Practice Test in Smart Grid Environment", Proceedings of KIEE Autumn Conference, pp. 82-84, October 2013.
- [5] Soon-Jeong Lee, et. al., "An Adequacy Analysis on V2G Application of Electric Vehicles", Proceedings of KIEE Autumn Conference, pp. 218-219, October 2011.
- [6] T. H. Song, et. al., "Economic Comparison of Smart Charging and V2G of EV", Proceedings of KIEE Summer Conference, pp. 1524-1524, July 2012.
- [7] Hyun-Goo Lee, et. al., "Development Status of V2G System", Proceedings of KIEE Autumn Conference, pp. 41-43, October 2011.
- [8] Jeonghyo Bae, et. al., "V2G Global/Domestic Market and its Forecasts", Proceedings of KIEE Summer Conference, pp. 675-676, July 2011.
- [9] Hyeon-Jung Park, *A Study of Electric Vehicle and Residential Load Model for Power System Interpretation in Smart Grid*, Master's Dissertation, Hongik University, 2012.
- [10] Sung-Min Cho, *Optimal BESS Sizing for Customer*

using New Model Considering Efficiency and Life Cycle, Ph.D. Dissertation, Soongsil University, 2012.

- [11] Ki-Ju Ahn, *Economic evaluation of energy efficiency program by Using the California test*, Master's Dissertation, Gachon University, 2010.
- [12] Buhm Lee and Kyoung Min Kim, "Evaluation of Power Quality Cost Based on Value-Based Methodology and Development of Unified Index", Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 60, No. 7, pp. 1293-1298, July 2011.
- [13] CEC(California Energy Commission), *California Standard Practice Manual: Economic Analysis of Demand-Side Programs and Projects*, July 2007.
- [14] Korea Smart Grid Association, *Technical Trend Report of Smart Grid ESS*, 2006.

저 자 소 개



김 정 훈 (Jung-Hoon Kim)

1955년 9월 13일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업(박사). 1981년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수.

Tel : 02-320-1621

E-mail : kimjh@hongik.ac.kr



황 성 욱 (Sung-Wook Hwang)

1974년 4월 20일생. 2012년 홍익대학교 전기정보제어공학과 졸업(박사). 2008년 한국전력공사 입사. 현재 한전 전력연구원 전략사업실 근무.

Tel : 042-865-5136

E-mail : outward@kepco.co.kr