

Load Aggregator 사업자를 위한 PEV 최적 충전 제어 방식에 관한 연구

김준호*, 곽형근*, 김진오*
한양대학교*

A study on the optimaml charging control of PEV for load aggregator

Joon-ho Kim*, Hyung-geun Kwag*, Jin-O Kim*
Hanyang University*

Abstract - 스마트그리드 환경하에서 플러그인 전기 자동차(PEV)는 새로운 도전이자 과제이다. 전 세계적으로 전기 자동차에 대한 관심이 높아지면서 PEV가 전력망에 미치는 영향에 관한 연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 LA사업자(Load Aggregator)는 소비자들의 부하를 통합적으로 관리하여 에너지 비용을 최소화하며 인센티브 지급을 통한 V2G 서비스를 사용하여 피크 삭감을 유도한다. PEV 운영 비용 최소화 및 부하 평탄화를 목적으로 하는 LA사업자에 의한 PEV 충전 부하 관리의 잠재적인 이점들을 평가하며, 최적 충전 제어 방식을 위하여 하루 전 시장에서 충전 부하와 V2G 가능 용량을 예측하고 PEV 배터리를 분석하여 모델링하는 방법을 제시하였다. 사례연구에서는 다음의 세 가지 PEV 충전 시나리오 즉, 제어되지 않는 시나리오(퇴근 후 충전), TOU 요금제를 적용한 시나리오와 최적 충전 제어 시나리오에 대해 에너지 비용과 피크 수요 감축 측면에서 비교 평가하였다. 이는 향후 증가하는 PEV로 인한 계통의 경제성 평가 및 신뢰도 평가로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

1. 서 론

하이브리드 전기자동차를 양산·보급하기 위해 현재 전 세계적으로 플러그인 하이브리드(PHEV: Plug-in Electric Vehicle) 및 BEV(Battery Electric Vehicle)에 대한 시장이 적극 개척되고 있다. 최근에는 전기자동차의 배터리 기술이 향상되어 PEV 및 BEV 차량이 상용화되고 있다. 이에 따라, 충전 시 전력 소비로 인해 부하 패턴에 큰 변화가 생길 것이다. 이러한 패러다임의 큰 변화는 자동차 및 전력 산업에 걸쳐 상당한 변화를 예고하며 국가의 수요 관리 측면에서도 종합적으로 검토되어야 하며 이에 대비하여 전력망에 미치는 영향에 관한 연구가 필요하다.

전기자동차를 효율적으로 충·방전하기 위해 EV 배터리와 엔진을 최적화하는데 많은 연구가 이루어지고 있으며 EV가 계통에 연계되는 시간과 장소에 따라서 계통에 제약이 발생할 수 있다[1]. 충전 인프라 구축과 관련하여 다양한 충전 방안이 논의되고 있으며, 충전 부하를 관리하기 위한 방법들로 비용 최소화, 전압·주파수 안정도, CO2 배출, 시간별 차등 요금제등을 고려하여 활발히 연구되고 있다[2]. 이를 더욱 효과적으로 수행하기 위해서 해외의 각국에서 LA사업자들이 등장하면서 계통 운영자와 소비자를 연계시켜주며 충전과 V2G 제어 및 관리를 하고 있다[3].

본 논문에서는 운영비용 최소화 및 부하 평탄화를 고려하여 PEV 충전 부하 제어를 위한 최적 충전 알고리즘을 제시하였다. LA사업자들이 시장에 참여하여 소비자들의 부하를 관리 운영하는 상황에서 배터리의 S.O.C(State Of Charge) 모델링을 통해 충전 및 V2G 용량을 산정한다. 사례연구에서는 여러 가지 시나리오에 대한 부하 곡선 및 운영비용을 비교하였으며, 일일전 시장(day-ahead market)에서의 시장 가격에 반응하여 부하 이동을 하며 이를 통한 최적 충전 시나리오를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 계통의 구조 및 특징

LA사업자는 배전 계통 내에서 가입한 모든 소비자들에게 전력을 공급한다. PEV의 충·방전이 가능하도록 집, 직장 및 공용 주차장에 계통과 연계할 수 있는 플러그인 인프라 및 급속충전 인프라가 구축되어 있다고 가정한다. 그리고 LA사업자는 이 장비를 통해 같은 계통에 연계된 PEV의 배터리의 용량과 S.O.C 정보를 취합하여 충·방전을 관리한다.

본 논문에서 전력 시장은 일일전 시장(day-ahead market)으로 이는 매일 개설되며 모든 수요자원은 시장에 참여한다고 가정한다.

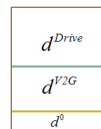
다. 일일전 시장에서, LA사업자는 다음 날 각 시간에 필요한 수요를 맞추기 위해 매매 제의를 한다. 시장이 마감하면 계통 운영자는 입찰을 받아들일지 여부를 결정하고 각 시간에 대한 시장 가격(market clearing price)을 결정한다. LA사업자는 부하와 시장 가격의 예측된 값을 바탕으로 최적의 계획을 수립하기 위해 계통에서 공급하는 에너지의 양을 결정한다.

2.2 PEV 배터리 모델링

배터리 모델링에서 가장 중요한 것은 배터리의 S.O.C이다. 이것은 배터리 총 용량에서 현재 가지고 있는 배터리의 비율이다. S.O.C는 배터리가 완전히 방전됐을 경우의 0으로부터 완전 충전됐을 경우 1로 하며 0%에서 100%로 나타내기도 한다. 배터리의 S.O.C는 충전될 경우 점차 증가하며, 방전되면서 점차 감소한다. 배터리는 수요 자원과 공급 자원으로 나뉠 수 있다[14]. 배터리의 S.O.C가 55%인 경우를 기준으로 하여 수요와 공급으로 나누었다. S.O.C가 55% 이상인 경우는 공급 자원으로써 사용되고, 그 이하인 경우는 수요 자원으로써 수요 자원으로 사용된다. 통근을 목적으로 하고 남은 용량을 계통 연계 시 공급 자원으로 볼 수 있다.

본 논문에서는, 그림 1과 같이 배터리의 S.O.C를 3구간으로 나누었다. d^{Drive} , d^{V2G} 와 d^0 . d^{Drive} 는 PEV가 운행할 때 사용하는 용량, d^{V2G} 는 V2G로 사용되는 용량이고, d^0 는 완전 방전을 방지하여 배터리의 안정도를 위해 사용하지 않는 용량으로 구분하여 모델링하였다.

S.O.C(%)



〈그림 1〉 배터리 S.O.C의 구간 분류

2.3 충전 및 V2G 용량 산출

2.3.1 충전 용량 산출

LA사업자가 PHEV의 충전을 관리하기 위해서 필요한 충전 용량을 구하는 방법을 다음과 같이 정의한다.

$$d_{total}^{Charge} = \Re^{Charge} \cdot \sum_{n=1}^n d_n^{Charge} \quad [kWh] \quad (1)$$

여기서, d_n^{Charge} : PEV 소비자의 충전 용량

\Re^{Charge} : 충전 참여율

d_{total}^{Charge} : 총 충전 용량

2.3.2 V2G 용량 산출

피크 시간대에 급격한 수요 증가 시, 예비력 확보 및 계통의 신뢰도와 안정을 위해 V2G는 중요한 역할을 할 수 있다. V2G 용량을 확보하는 것은 소비자의 자발적인 참여가 필요하다. 이를 도모할 수 있는 것이 LA사업자 프로그램이다. 본 논문에서는 V2G 참여율을 높이기 위해서 인센티브 지급한다. 그러나 참여하지 않은 경우의 페널티는 없다. V2G 용량을 산출하는 방법은 다음과 같다.

$$d_{total}^{V2G} = \Re^{V2G} \cdot \sum_{n=1}^n d_n^{V2G} \quad [kWh] \quad (2)$$

여기서, d_n^{V2G} : PEV 소비자의 V2G 용량

\Re^{V2G} : V2G 참여율

d_{total}^{V2G} : 총 V2G 용량

2.3 목적 함수

이번 절에서는 최적화 기법을 통한 충전 시나리오를 제시한다. 소비자들은 스스로 가격 신호에 맞춰 반응하기가 힘들다. 이러한 이유 때문에 해외에서는 DR 프로그램이 등장하였으며 LA사업자가 활발히 활동 중이다. 프로그램의 참여율을 높이기 위해서는 PEV의 운영비용을 최적화 해주며 V2G를 통한 인센티브를 지급하여야 할 것이다. LA사업자의 PEV 운영비용 최적화를 위한 목적 함수는

$$\min \sum_{t=1}^{24} \{u(v^{drive}) \cdot \rho(t) \cdot v^{drive} + (u(v^{V2G}) \cdot A(t) + \rho(t)) \cdot v^{V2G}\} \quad (3)$$

으로 표현할 수 있고, 각 제약 조건은 다음과 같다.

여기서, $\rho(t)$: 시간 t에서의 전기 가격

$A(t)$: 시간 t에서의 V2G에 대한 인센티브

$$v^{drive} = \frac{\partial d^{Drive}(t)}{\partial t} \quad (4)$$

$$u(v^{drive}) = 0, \text{ if } v^{drive} < 0 \quad (5)$$

$$u(v^{drive}) = 1, \text{ if } v^{drive} \geq 0 \quad (6)$$

$$v^{V2G} = \frac{\partial d^{V2G}(t)}{\partial t} \quad (7)$$

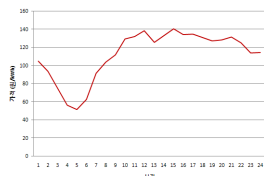
$$u(v^{V2G}) = 1, \text{ if } v^{V2G} < 0 \quad (8)$$

$$u(v^{V2G}) = 0, \text{ if } v^{V2G} \geq 0 \quad (9)$$

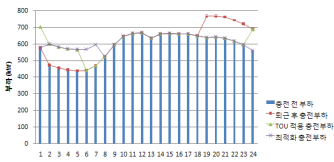
식 (4)는 S.O.C 구간 중 운행 구간의 그래프이고, 식 (7)은 V2G 구간의 그래프를 나타낸 것이다. 식 (5)와 (6)은 목적 함수의 첫째 항에서 배터리 방전이 아닌 충전 용량만을 구하기 위해 주어진 단위 함수이다. 그리고 식 (8)과 (9)는 목적 함수의 둘째 항에서 V2G를 한 구간만을 계산하여 인센티브를 주기 위한 단위 함수이다.

3. 사례연구

운영비용 최소화를 목적으로 하는 시나리오는 LA사업자가 직접 소비자들의 충전 패턴을 최적화한다. 다른 시나리오와의 차이점은 시장 가격에 반응하여 가격이 낮은 시간대에 충전을 하고 높은 시간대에는 충전을 하지 않는 것으며 총 충전 시간인 6시간을 연속적으로 하지 않고 불연속적으로 한 시간 단위로 충전을 한다고 가정한다. 본 사례연구에서는 향후 우리나라의 PHEV 보급률을 약 12%로 가정하여 8월 여름철 부하와 그림 2의 SMP를 적용하여 최적 충전 제어를 실행하였다.



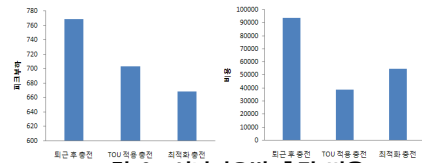
〈그림 2〉 7,8월 평균 SMP



〈그림 3〉 각 충전 시나리오에 의한 부하곡선

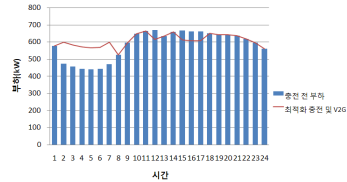
그림 3은 각 충전 시나리오에 의한 부하곡선의 변화를 보여주고 있다. 최적 충전 제어에 의해 충전을 하였을 경우 본래 피크 부하 시간대의 부하가 시장 가격에 반응하여 경부하 시간대로 시간을 미뤄서 충전을 함으로써 피크부하에 부담을 주지 않는 것을 볼 수 있다. 또한, 부하 이동을 통해서 부하 평탄화를 하였다. 이로 인한 효과는 단기적으로는 경부하 시간대의 부하 증가로 인해 가격의 상승이 이루어지나 장기적 관점에서는 이러한 장기적 증분 비용이 평균 가격보다 낮으므로 이득이 생기는 장점이 있다. 각 시나리오의 피크 부하와 충전 비용의 비교는 그림 3에 표현되어있다. TOU 요금제를 적용한 시나리오가 가장 낮은 비용이지만 전일 요금제와의 요금 기준이 맞지 않아서 절대적인 평가는 어렵다. 하지만 퇴근 후 충전과 최적화 충전 시나리오를

비교해 보았을 때, 최적화 충전을 한 경우 상당한 비용이 감소된 것을 볼 수 있다. 그리고 퇴근 후 충전과 TOU 충전은 피크부하를 증가시키며 계통에 상당한 영향을 끼칠 것으로 판단되나, 최적화 충전은 피크 부하를 증가시키지 않았다.



〈그림 3〉 시나리오별 충전 비용

가격이 낮은 경우 한 시간 단위로 충전을 시행하며 가격이 높으면 잠시 멈췄다 다시 충전을 시작한다. 그리고 비상 이벤트 발생 시, LA사업자로부터의 통보를 받은 소비자들은 반응하여 V2G를 실행한다. 이로써 급격한 피크부하가 증가하더라도 예비력을 확보할 수 있으며 이에 대처할 수 있다. 이러한 과정에 대한 부하곡선의 변화는 그림 4에서 볼 수 있다.



〈그림 4〉 최적화 충전 및 V2G

〈표 1〉 각 충전 시나리오에 의한 결과 비교

충전 시나리오	피크 부하 증가율(%)	충전 비용(원)
퇴근 후 충전	15	93951.5
TOU 적용 충전	5	38860.8
최적화 충전	0	54712.5

표 1은 각 충전 시나리오에 의한 비용, 피크 부하 증가율과 부하 평탄화 지수에 대한 비교 값이다. 표에서 보는 바와 같이 결과 값들을 비교하여 보았을 때, 이 논문에서 제안한 최적화 충전 시나리오가 가장 효율적이며 안정적인 충전 제어 방법이 될 것이다.

4. 결 론

본 연구는 PEV 도입 및 상용화가 전력 계통에 미치는 영향을 DR(Demand Response) 프로그램을 고려하여 비교 평가 및 분석하였고, LA사업자에게 에너지 비용 최소화화 및 계통 안정도를 고려한 최적의 충전 제어 방식을 제안하였다. 이 방법을 통해서 LA사업자는 충전 부하를 예측하여 관리할 수 있으며 전일 시장 가격에 반응하여 최적의 제어 전략을 수립하는데 도움이 될 것이다. 또한, 계통 운영자에게도 전기자동차 보급률의 증가로 인한 부하이동 및 증가에 대한 정보를 제공함으로써 이에 맞는 계통 계획을 수립하는데 유용할 것이다. 이러한 부하 예측에서 가장 중요한 것은 소비자들의 참여도이다. 본 논문에서는 소비자의 참여율을 고려하여 계통에 미치는 영향을 분석하였다. 참여율을 높일수록 예측 정확도가 높아지고 부하 증가에 대비하여 계통의 예비력을 미리 확보하는데도 도움이 된다. 그렇기 때문에 효율적인 충전기 및 충전소를 통한 인프라 구축 및 참여율을 높이기 위한 방법들이 더욱 연구되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] Kejun Qian, Chengke Zhou, Malcolm Allan. "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems", Power Systems, IEEE Transactions, vol. 26, May 2010.
 [2] Ramteen Sioshansi, Riccardo Fagiani, Vincenzo Marano. "Cost and emissions impacts of plug-in hybrid vehicles on the Ohio power system", Energy Policy, vol. 38, Nov. 2010.
 [3] Eric Sortomme, Mohamed A. El-Sharkawi, "Optimal Charging Strategies for Unidirectional Vehicle-to-Grid", Smart Grid, IEEE Transactions, vol. 2, Mar. 2011.