

전기자동차의 충전부하특성 모델링 및 충전 시나리오에 따른 계통평가

문상근*, 김성열*, 김진오*
한양대학교*

Evaluation for Charging effects of Plug-in Electrical Vehicles in Power System considering Optimal Charging scenarios

Sang-Keun Moon*, Sung-Yul Kim*, Jin-O Kin*
Hanyang University*

Abstract - The impacts of EV charging demands on power system such as increased peak demands may be developed by means of modeling a stochastic distribution of charging and a demand dispatch calculation. Optimization processes are proposed to determine optimal demand distribution portions so that charging costs and demands can be managed optimally. There are two optimization methods which have different effects on the outcome. These focus either on the Electric vehicle customer side (cost optimization) or the System Operator side (Load-weighted optimization).

1. 서 론

전기자동차는 배터리의 충전을 위해 기존의 전력망에 연계되어 필요한 전력을 공급받는 형태를 가지게 된다. 이러한 충전시스템은 충전기(charging stand)를 비롯하여 충전소(charging station), 배터리교환시설(battery swapping/exchanging station)을 포함하는 일반화된 전기자동차 충전인프라를 형성하게 될 것으로 보인다[1,4].

충전부하의 증가는 전력부하피크 증가 등의 문제점을 수반하므로 충전부하를 제어하기 위한 방법들이 연구되고 있는데, 크게는 전력시스템의 안정도 측면(전압, 주파수, 혼잡) 등을 고려하는 방법[1]과 가격신호를 통한 충전시간의 이동을 유도하는 방법[2], 최적화 방법을 이용한 자동충전제어[3] 등이 있다. 이와 같은 방법들은 전력시스템 가격 및 제어신호를 전달할 수 있는 AMI(Advanced Metering Infrastructure)와 제어기기를 통하여 수행될 것이며, 각 전기자동차 소유자들의 부하제어참여(Demand Response)가 필요하게 된다. 이는 계통운영자(ISO: Independent System Operator) 또는 전력부하관리사업자(LA: Load aggregator)를 통해 각 전기자동차 소유자간의 계약을 통하여 제어될 것이다[4]-[6].

본 논문에서는 충전부하 제어를 위한 충전부하 최적화방법으로 전기자동차 사용자입장의 비용최적화(Cost Optimization)와 충전부하량 증가에 따른 부하변동을 반영하는 시스템운영자 측면인 부하최적화(부하가중치최적화, Load-weighted optimization)를 제시하였다. 시간에 따른 전력요금인 계시별 요금제(TOU: Time-of-Use)만을 반영하는 사용자 비용최적화에서 유도하지 못하는 충전부하에 대하여, 전체부하증가를 고려하는 새로운 지수가 적용된 부하최적화를 통해 시스템 계획에 적용될 수 있도록 하였다.

2. 본 론

2.1 전기자동차 충전부하 모델링

국내에 등록된 전체차량에서 자가용은 약 95%에 달하며 이 중 승용차가 약 72%를 차지한다[7]. 따라서 전기자동차 사용자의 경향성을 충전부하패턴으로 적용하기 위해 출퇴근시간을 비롯한 주거단지의 도착시간을 예측하는 주행패턴 데이터를 분석한다[8].

확률밀도는 확률도 분석을 통해 하루 동안의 시간구간 t ($1 \leq t \leq 24$)에서 $k = 4.715$ 의 형상모수와 $\beta = 1736$ 의 척도모수를 가지는 와이블 분포함수를 선정하고 도착시간을 나타내는 확률밀도함수로 <식 1>에 나타내었다.

$$a(t) = \frac{kt^{\beta-1} e^{-\frac{t}{\beta}^\beta}}{\beta^\beta} \quad (1)$$

도착시간을 충전시작시간으로 고려할 때, <식 2>을 통해서 전기자동차의 시간별 충전시작에 따른 충전부하량을 계산할 수 있다.

$$L_i^c = a(t) \cdot E^c \cdot \{n^v \cdot \phi^{EV}\}, \quad \forall t \in T \quad (2)$$

여기서, E^c 는 충전에 소모되는 전력량을 나타내며, n^v 는 계산 시점에서의 전체 차량수, ϕ^{EV} 는 전기자동차의 보급률을 나타낸다. 따라서, 전체 시간 T 에서 L_i^c 는 충전시작시점에서의 충전량을 의미한다.

전기자동차는 충전을 시작하면 보유하는 배터리의 용량이 최대가 될 때까지 충전을 지속한다. 따라서 각 배터리의 용량상태(SOC: State of Charge)를 고려한 연속충전을 고려한다. 연속충전시간에 따른 용량계산을 <식 3>으로 나타내었다

$$L_{i,d}^c = \begin{bmatrix} L_{1,d}^c \\ L_{2,d}^c \\ L_{3,d}^c \\ \vdots \\ L_{24,d}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1,1}^c & L_{24,2}^c & \cdots & L_{22,d-1}^c & L_{21,d}^c \\ L_{2,1}^c & L_{1,2}^c & \cdots & L_{23,d-1}^c & L_{24,d}^c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ L_{23,1}^c & L_{22,2}^c & \cdots & L_{23,d-1}^c & L_{23,d}^c \\ L_{24,1}^c & L_{23,2}^c & \cdots & L_{24,d-1}^c & L_{24,d}^c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$d = \frac{(1 - \lambda^{SOC}) \cdot C^{EV}}{E^c} \quad (4)$$

각 충전시작시간의 충전부하는 연속충전시간만큼 다음 행으로 연장된다. 여기에 새롭게 시작되는 부하가 추가되어, 시간당 총 부하는 각 행의 용량을 합하여 계산된다. 여기서, d 는 연속충전이 고려된 각 시간을 나타내며 SOC가 최대가 되는 충전시간(SOC full charging time)이다. 이는, <식 4>와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, λ^{SOC} 는 SOC의 %비율, C^{EV} 는 대상 전기자동차의 배터리 용량이다.

2.2 충전부하의 최적화 시나리오

2.2.1 비용최적화

전기자동차 충전비용은 전력요금에 적용되어 산출된다. 전기자동차의 충전 시 가장 가격이 낮은 시점에서 충전을 실시하는 방법의 충전비용 최소화를 수행하며, 계시별요금제(TOU)에 따른 가격신호를 충전시작시점을 결정하는 매개변수로 하는 충전비용 최적화를 수행한다. 이에 대한 목적함수는 다음과 같다.

$$\min_{r_i} \sum_{t=1}^T P_t \cdot L_i^c \quad (5)$$

$$s.t. \sum_{t=1}^T r_t = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T (L_i^b + L_i^c) \leq L^{lim} \quad (7)$$

$$L_i^c \leq L_i^{max} \quad (8)$$

여기서, P_t 는 계시별요금제에 따른 시간별 전력가격이며, r_t ($0 \leq r_t \leq 1$)는 <식 1>에 해당하는 충전시작 전기자동차의 비율이다. L_i^b 는 계통부하를 나타내며, L^{lim} , L_i^{max} 는 각각 계통한계용량과 시간당 충전시작용량의 한계치이다. <식 5>에서는 소비자 입장에서의 최소 비용 최적화를 수행하며, 최대 충전시작시간만을 분배하는 제약조건만을 가진다. 이는 비용최적화 측면에서 최소한도의 제약을 적용한 것으로 충전시설 및 계통의 과부하를 방지[1]하기 위해 참여자의 충전시작 시간에만 작용하는 제약이다. 이를 통해 전기자동차의 충전은 시간별 순차적으로 충전에 참여하는 것으로 고려된다. 시간별 시작 충전량이 결정되면 최대 충전까지 도달하는 시간만큼 충전을 지속하게 되며, 전기자동차 배터리 충·방전의 반복을 통한 배터리 수명감소를 발생시키지 않는 연속 충전을 적용하여 충전시간을 고려하는 총 충전부하가 계산된다.

2.2.2 부하최적화

비용최적화를 통한 계시별 요금제는 비용최소지점을 우선적으로 선택하므로 부하증가에 따른 충전부하의 유도가 어렵다. 따라서 전체 부하증가를 고려하는 가중치(Load weighting factor)를 적용한 목적함수를 제안하였다.

$$\min_{r_i} \sum_{i=1}^T \{w_i \cdot P_i\} \cdot L_i^c \quad (9)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^T r_i = 1 \quad (10)$$

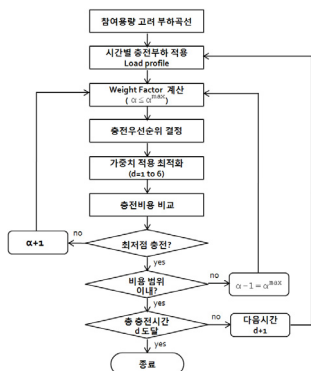
$$\sum_{i=1}^T (L_i^b + L_i^c) \leq L^{limit} \quad (11)$$

$$L_i^c \leq L_i^{limit} \quad (12)$$

적용된 부하 가중치는 다음과 같다.

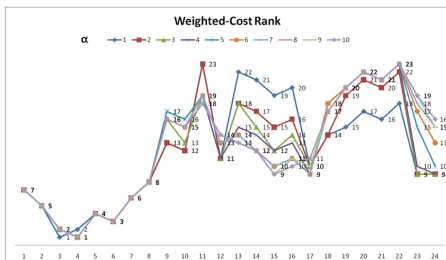
$$w_i = \frac{(L_i^b + \Delta L_i^c)^\alpha}{\sum_{i=1}^{24} L_i} \quad \text{where,} \quad \Delta L_i^c : \text{changed charging loads} \quad (13)$$

여기서, α 는 시간별 부하크기비율의 중요도를 나타내는 중요도지수이다. 가중치를 통한 중요도를 지수증가 시키는 방법으로 충전우선순위를 변경하도록 하기 위해 적용되었다. 이 방법을 통해서 다양하게 변동되는 부하패턴에 대해 충전부하에 따른 부하 정도에 따라 충전우선순위를 결정할 수 있다. 부하최적화는 전력시스템운영자 측면에서 수행되며, 따라서 충전부하의 이동을 직접 제어하는 것을 고려한다. 이에 1시간 단위 분할충전을 고려하는 시간별 반복 최적화 프로세스를 적용하였다. 충전 지속시간 d 에 따른 각 시간별 충전최적용량 산출과정을 <그림 1>에 나타내었다. 각 단계별 중요도 지수 α 는 지속시간 최적화 수행단계마다 새롭게 계산된다. α 의 변동에 따른 충전우선순위의 변동을 <그림 2>에 도식화 하였다.



<그림 1> 부하최적화 Flow chart

부하최적화(부하가중치 최적화)는 충전부하가 일정수준이상 증가하였을 때 부하가중치를 통한 비용과 부하크기와의 중요도를 계산하고 부하중요도 지수가 추가된 충전우선순위를 결정한다. 부하가중치의 중요도를 결정하는 중요도지수 α 는 부하량 및 비용적 측면과 연관되어 결정된다.

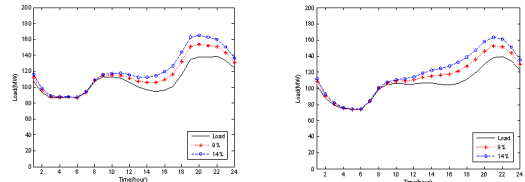


<그림 2> 부하가중치가 고려된 충전우선순위 변동

3. 사례연구

3.1 전력부하 및 충전부하

시간별로 변동하는 전력부하에 대한 사례연구계통을 주거지역으로 선정하여, 시간별 소모전력 부하통계(국가통계포털, 2006년 주택용 부하곡선)를 적용하였고, 여기에 계산된 충전부하를 적용한 부하곡선을 <그림 3>에 나타내었다.

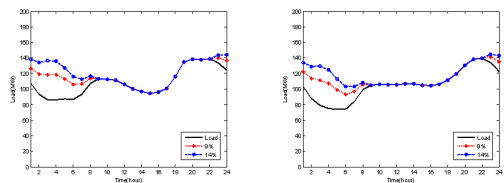


<그림 3> 충전부하가 고려된 전력부하곡선 (겨울, 여름)

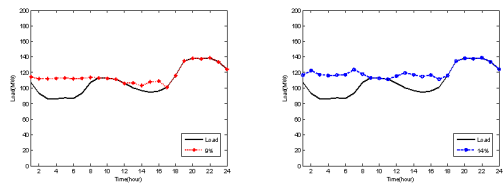
충전부하가 저녁시간에 집중됨에 따라서 전력부하피크가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 겨울부하에서 20시 165MW로 약 20%의 피크부하가 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 시나리오별 부하곡선

<그림 4>는 전기자동차 사용자입장에서의 비용최적화를 통한 결과를 나타낸다. 계시별 요금에 따라 비용이 낮은 시간대인 23시에서 9시까지의 충전부하가 증가하는 것을 볼 수 있다. 보급률이 9%에서 14%로 증가함에 따라서 새로운 피크부하(겨울 24시, 144MW)를 형성한다. 이러한 문제는 계시별요금제에 따른 시나리오가 부하변동을 정확히 반영하기 어렵다는 것을 나타낸다.



<그림 4> 비용최적화 시나리오 전력부하곡선 (겨울, 여름)



<그림 5> 부하최적화 시나리오 전력부하곡선(보급률 9%, 14%)

<그림 5>는 전체부하 증가를 고려한 운영자 측면의 부하최적 시나리오의 결과를 각각 보급률 9%와 14%에 대해 나타내었으며, 부하전력증가에 따라 부하가 낮은 구역으로 부하이동이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 충전부하가 이동될수록 전력가격이 높은 시간대의 충전이 이루어지므로 충전가격이 상승되는 결과를 가져온다. 따라서 가중치가 적용되는 시간대의 충전부하는 일반적으로 가격이 낮은 시간대의 충전부하에 비해 적은비율이 될 것이다.

4. 결론

본 논문에서 제시된 시나리오는 계시별 요금제가 적용되는 환경에서 고려되어야 할 제반사항들과 충전부하변동에 따른 전력시스템의 영향을 최소화 하기위한 방법을 포함하고 있다.

실제 전력시스템 최적 시나리오의 적용은 부하이동에 참여하는 전기자동차 소유자의 참여율 및 AMI기기와 제어장치 등의 보급에 따라 그 특성이 차이가 보이게 될 것이다. 하지만 본 논문에서는 참여율을 고려하지 않은 최적비용결정과정을 수행하여 전기자동차 사용자 입장의 비용최적화와 운영자 입장의 부하최적화를 정량적으로 평가할 수 있도록 하였다. 따라서 실제 적용에 앞서서 추가적으로 수요반응적 연구가 결합된 수요자원 연구가 진행되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Joao, M. Pedco et al. "Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System" Vol. 99, No. 1, January 2011
- [2] S. Shengnan, Z. Tianshu "Impact of TOU Rates on Distribution Load Shapes in a Smart Grid with PHEV Penetration", IEEE PES, 2010
- [3] K. Qian, C. Zhou, "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems" IEEE Trans. on power systems, 2010
- [4] M. Caramanis, "Management of Electric Vehicle Charging to Mitigate Renewable Generation Intermittency and Distribution Network Congestion" IEEE Conf. on Decision and Control, 2009
- [5] J. Taylor, et al. "Evaluation of the Impact of Plug-in Electric Vehicle Loading on Distribution System Operations" IEEE PES, 2010
- [6] L. Wang, A. Lin, "Potential Impact of Recharging Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Locational Marginal Prices" Energy 2030 conf. IEEE, 2010
- [7] Korea transport database, KTDB. <http://www.ktdb.go.kr>, 2009
- [8] National Household Travel Survey, NHTS Data Center, <http://nhts.ornl.gov/>, 2009