

# 분산 전기차 충전 알고리즘

김보경, 백민철, 김유미, 고한얼

고려대학교

{pink9120,fall123123,yumikim1201,heko}@korea.ac.kr

## Distributed Electric Vehicle Charging Algorithm

Bokyeong Kim, Minchol Paik, Yumi Kim, and Haneul Ko

Korea Univ.

### 요약

많은 수의 전기 자동차(EV)가 동시에 충전될 때 전력 시스템에 과부하를 초래할 수 있다. 본 논문에서는 각 EV가 전기 가격, 다른 EV의 충전 패턴, 현재 배터리 레벨 및 예상 출발 시간과 같은 정보를 활용하여 충전 여부를 결정하는 분산형 EV 충전 알고리즘(D-EVCA)을 제안한다. EV가 충전하기 위해 소요되는 전기 가격은 최소화하고, EV가 목적지에 도달하기에 부족한 배터리 레벨로 출발할 확률은 특정 수준 이하로 하기 위한 linear programming (LP) 문제를 정의하였다. 또한, 다른 EV의 충전 패턴을 함께 고려하기 위해 Best response dynamics 기반 알고리즘을 개발하였다.

### I. 서론

최근 산업 및 학술 분야에서 전기 자동차(EV)에 대한 관심이 증가하고 있다 [1]. EV는 세계적인 에너지 위기를 완화하고 온실 가스를 줄일 수 있다. 또한, EV 운전자는 연료를 구입하는데 있어서 많은 비용을 절약할 수 있다. 예를 들어 대표적인 상용 EV 중 하나인 TESLA 모델S는 100,000 마일을 주행할 때 3,492 달러의 운영비가 필요한 반면, 기존 (가솔린 기반) 차량은 17,727 달러의 운영비가 필요하다 [2]. 이러한 이점 때문에, 한 유명 연구 기관은 2030년과 2050년까지 교통 시스템의 EV 보급률이 각각 51%와 62%에 이를 수 있다고 추정한다 [3].

그러나 이러한 EV의 확산은 전력 시스템에 몇 가지 문제를 일으킬 수 있다 [4]. 특히, 많은 수의 EV가 동시에 충전될 때, 전원 시스템의 과부하를 초래할 수 있다. 전력 시스템의 과부하를 막기 위해, 전력 시스템의 운영자는 전기 단가를 조정할 수 있으며, 이는 EV 드라이버가 높은 EV 충전 비용을 지불할 수 있음을 의미한다. 높은 충전 비용을 피하기 위해서는 어떤 EV가 언제 충전되는지 결정하는 적절한 스케줄링 방법이 필요하다. 글로벌 뷰를 가진 중앙 집중식 접근 방식이 적절한 충전 스케줄을 결정하는 데 도움이 될 수 있지만, 중앙 집중식 접근 방식은 높은 신호 오버헤드와 단일 병목 및 고장을 초래할 수 있다.

본 논문에서는 분산 EV 충전 알고리즘(D-EVCA)을 제안한다. D-EVCA에서 각 EV는 전기 가격, 다른 EV의 충전 패턴, 현재 배터리 레벨 및 예상 출발 시간을 고려하여 각 의사 결정 시점에서 배터리 충전 여부를 결정한다. 그 후, EV가 배터리 레벨이 부족한 상태로 주차장에서 출발하는 상황을 방지하면서 EV의 평균 충전 비용을 최소화할 수 있는 다중 정책 제약 내쉬 평형을 얻기 위해 Best response dynamics 기반 알고리즘을 도입한다.

본 논문의 나머지 구성은 다음과 같다. 2장 본문에서 분산 전기차 충전 알고리즘에 대해 서술한다. 3장 결론에서는 본 연구의 의의를 정리하고 향후 연구 방향을 제시하며 논문을 마친다.

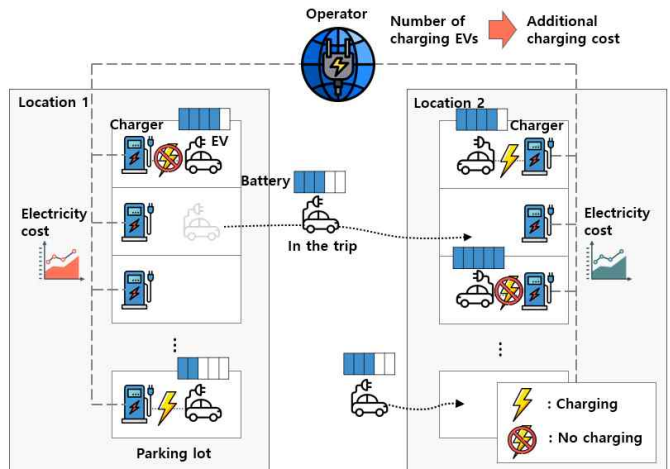


그림 1. 시스템 모델

### II. 본문

그림 1은 본 논문의 전체 시스템 모델을 보여준다. EV는 주차장에 있을 때(즉, 충전기에 연결된 상태)만 충전 가능한 용량만큼 배터리를 충전할 수 있다. 시간이 지나면 EV는 충전된 배터리 레벨로 주차장에서 출발할 수 있다. 이때 EV는 충분한 배터리 레벨(즉, 목적지에 도달하기 위해 필요한 양의 배터리)을 가져야 한다.

한편, 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 동적 전기 비용을 고려한다. 전기 비용은 EV의 위치에 따라 다르며 해당 위치의 전기 수요에 따라 동적으로 변경된다. 전기 가격은 시간에 따라 동적으로 변화하므로, EV는 충전 비용을 줄이기 위해 이 변화를 고려해야 한다. 예를 들어, 현재의 전기 가격은 비싼데 앞으로는 더 저렴해질 것으로 예상될 때, EV는 충전을 늦출 수 있다. 그러나 EV가 충전 작동을 과도하게 지연시킬 경우에는 충분한 배터리가 없는 상태로 주차장에서 출발하게 된다. 이 문제를 완화하기 위해 EV는 현재 배터리 레벨과 예상 출발 시간을 고려해야 한다.

많은 수의 EV가 동시에 충전을 함으로써 발생하는 전력 시스템의 과부하를 막기 위해, 전력 시스템의 운영자는 충전 중인 EV 수에 비례하여 추가 충전 비용을 부과한다고 가정한다. 따라서 EV는 다른 EV의 충전 패턴을 고려하여 배터리를 충전해야 한다. 예를 들어, 각 EV는 충전 중인 EV가 거의 없는 특정 시간 동안 적극적으로 배터리를 충전할 것이다.

D-EVCA는 전기 가격의 변화, 현재 배터리 레벨 및 예상 출발 시간을 고려하여 배터리를 충전한다. 특히, EV가 충전하기 위해 소요되는 전기 가격은 최소화하고, EV가 목적지에 도달하기에 부족한 배터리 레벨로 출발할 확률은 특정 수준 이하로 유지하기 위한 linear programming (LP) 문제를 정의하였다.<sup>1)</sup> 또한, 다른 EV의 충전 패턴을 함께 고려하기 위해 Best response dynamics 기반 알고리즘을 개발하였다.

---

**Algorithm 1** Best response dynamics-based algorithm.

---

- 1: Initialize the policies  $\pi_i$  for  $\forall i$ .
  - 2: **repeat**
  - 3: **for** All EVs  $i$  **do**
  - 4: Transmit the charging probability  $P_i^C$  to other EVs
  - 5: Calculate the additional charging cost  $\sum_{i'} P_{i'}^C$
  - 6: Solve the LP problem to get the stationary best response policy  $\pi_i^*$
  - 7: **end for**
  - 8: **until** Stationary policies of all EVs converge
- 

알고리즘 1. Best response dynamics 기반 알고리즘

알고리즘1은 Best response dynamics 기반 알고리즘의 전체 실행 과정을 보여준다. 알고리즘의 실행 과정은 다음과 같다. 우선 시스템 내의 모든 EV들에 대해 각각의 고정 정책을 초기화한다. 각각의 EV들은 자신의 충전 확률  $P_i^C$ 를 다른 EV들에게 전송하고, 다른 EV들로부터 받은 충전 확률들로 추가적인 비용을 계산한다. 이후 LP 문제를 풀어 최상의 대응 정책  $\pi_i^*$ 를 결정한다. 위의 과정을 모든 EV의 고정 정책이 수렴할 때까지 반복한다. 최상의 응답 역학은 알고리즘 1에 표시된 것처럼 EV의 정책을 업데이트하기 위해 적용될 수 있다. 제안된 알고리즘에서 EV는 충전 확률  $P_i^C$ 를 통해 상호 작용한다.

알고리즘의 복잡성은 LP 문제를 해결하는 알고리즘의 복잡성에 따라 달라진다. 구체적으로, LP 문제를 해결하는 대표적인 알고리즘인 Vaidya 알고리즘의 복잡성은  $O(|S||A|)$  [6] (즉, 다항식 시간)이며, 여기서  $|S|$ 와  $|A|$ 는 각각 EV  $i$ 의 상태와 동작 수를 나타낸다.

### III. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 EV의 확산에 따라 증가하는 EV 충전으로 인해 발생하는 전력 부하, 충전 비용 증가 등의 문제를 해결하기 위해 각 EV가 전기 가격, 다른 EV의 충전 패턴, 현재 배터리 레벨 및 예상 출발 시간과 같은 정보를 사용하는 분산형 EV 충전 알고리즘(D-EVCA)을 제안하였다. 향후 연구로 제안한 알고리즘을 구현하여 다른 알고리즘과의 성능 비교를 진행할 예정이다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2019년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 2019R1C1C1004352)

### 참 고 문 헌

- [1] H. Ko, S. Pack, and V. Leung, "An Optimal Battery Charging Algorithm in Electric Vehicle-Assisted Battery Swapping Environments," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (T-ITS), to appear.
- [2] TESLA Motors, [Online]. Available: <https://www.tesla.com/models#savings>
- [3] Electric Power Research Institute, [Online]. Available: <https://www.epri.com>
- [4] J. A. P. Lopes, F. J. Soares, and P. M. R. Almeida, "Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System," Proceeding of the IEEE, vol.99, no. 1, pp. 168 - 183, Jan. 2011.
- [5] E. Altman, K. Avrachenkov, N. Bonneau, M. Debbah, R. El-Azouzi, and D. S. Menasche, "Constrained Cost-Coupled Stochastic Games with Independent State Processes," Operations Research Letters, vol. 36, no.2, pp. 160 - 164, Mar. 2008.
- [6] Wikipedia, Linear Programming, Accessed: Dec. 13, 2020. [Online] Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_programming](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_programming)

---

1) LP 문제의 구체적인 정의는 논문의 페이지 제한으로 인하여 생략하였다.