

전기요금 절감을 위한 마이크로그리드 및 전기차 V2G 스케줄링 기법

강희수*, 트린피하이*, 정일엽*
국민대학교*

Optimal Scheduling of Microgrid and EV V2G Operation for Electricity Cost Reduction

Hee Su Kang*, Phi-Hai Trinh*, Il-Yop Chung*
Kookmin University*

Abstract - 본 논문은 태양광 발전기(Photovoltaics, PV)와 전기 자동차 충전설비(Electric Vehicle Supply Equipment, EVSE)를 보유한 마이크로그리드에서 전기 자동차(Electric Vehicle, EV) 충전 가격을 조정하여 마이크로그리드 운영자의 수익을 높이기 위한 최적화를 수행한다. 최적화 기법은 혼합 선형 정수 프로그래밍(MILP)을 사용하며, EV 충전 가격은 RNN-LSTM 모델을 통해 예측한 PV 발전량 및 소비 부하량을 기반으로 하여 다음 날의 충전 가격을 동적요금제(Dynamic Pricing) 기법으로 산정한다. 이때 에너지 시장의 요금제를 다양하게 고려하여 동적요금제를 설계하고 각 요금제가 마이크로그리드의 운영에 미치는 효과를 분석한다.

1. 서 론

탄소 중립을 달성하고 EV의 증가하는 충전 수요를 충족하기 위해 신재생 에너지 전원과 전기차 충전소를 통합한 마이크로그리드가 잠재적 솔루션 중 하나로 간주된다. 마이크로그리드는 신재생 에너지 전원 등 다양한 분산 에너지자원, 전력 부하 및 에너지 저장 시스템(Energy Storage System, ESS)을 포함하며 전력계통의 신뢰성과 유연성을 향상시킬 수 있다.[1]

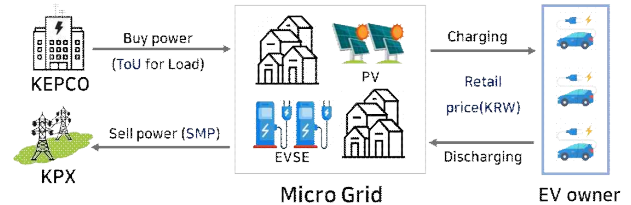
마이크로그리드 내에서 전력 시스템 균형을 달성하기 위해 시간대별 전기요금(time of use, TOU)과 계통한계가격(system marginal price, SMP) 정보를 바탕으로 전기차 충전소의 전기요금을 시간대별로 변경하는 동적요금제(Dynamic Pricing) 모델을 설계할 수 있다. 동적 가격 할당으로 정해진 EV의 충전과 방전 가격은 마이크로그리드 운영자와 EV 사용자 모두에게 EV를 통해 어떠한 행동을 취할 것인지 결정하는 중요한 요소 중 하나이다.[2]

본 논문에서는 EV 충/방전 가격을 다양한 동적요금제를 설계하여 마이크로그리드의 잉여전력 발생 시간대에 EV의 충전을 유도한다. 설계된 동적 가격으로 EV 사용자의 총 소비 금액을 최소화하고, EV의 충전과 방전 동작을 조정하여 마이크로그리드의 운영 비용을 최소화하는 최적 스케줄링 기법을 제시한다.

2. 마이크로그리드 모델 및 운영 알고리즘 설계

2.1 마이크로그리드 모델

본 논문에서 EV의 최적 충/방전 스케줄링을 적용하는 마이크로그리드의 모델은 그림1과 같이 PV 발전 시스템을 포함하고 EVSE를 직접 운영한다. 시간별 마이크로그리드의 전력 부하량과 PV 발전량 데이터는 전일(day-ahead) 예측을 통해 마이크로그리드 운영자에게 전달된다. 예측값을 통해 다음날에 마이크로그리드에서 잉여전력이 생산되는 시간대를 미리 알 수 있으며, 해당 시간에 마이크로그리드 운영자는 동적요금제로 설계된 EV 충전 가격을 제시하여 EV 사용자들이 더 많은 충전을 할 수 있도록 유도한다. 본 논문에서 부하와 발전량 예측에는 시계열 예측에서 정확도 측면의 강점을 보이는 RNN-LSTM 모델을 사용했다.



〈그림 1〉 마이크로그리드의 전력 교환 및 비용의 흐름

마이크로그리드 운영자가 EVSE를 운영하며 제시하는 동적요금제는 그림1과 같이 에너지 시장에서 전력 교환 및 비용의 흐름을 고려한다. 마이크로그리드 운영자는 KEPCO에서 제공하는 ToU 기반의 전기 이용요금, ToU 기반의 EV 충전요금, 전력시장의 SMP 요금과 같은 시간대별 전기요금에 따라 EV의 동적 충전요금을 결정한다. 이때 EV 사용자는 충전 기간과 목표 SoC 값을 설정하며 충전 기간 동안 EV의 충/방전 권한을 마이크로그리드 운영자에게 위임한다. 마이크로그리드 운영자는 EV 사용자의 목표 SoC를 만족시키는 제약조건 하에 전체 마이크로그리드와 EV의 전기요금을 줄이는 것을 목적으로 EV의 충전과 방전을 제어한다.

2.2 마이크로그리드 최적 제어 기법

마이크로그리드 내에서 소비되는 총 전력 비용을 최소화하기 위한 목적함수 식(1)은 선행연구 [2]를 참고하여 정의하였다. 식(1)은 EV의 충/방전 동작을 통해 EV의 정산 요금을 결정하는 식(2)와 전력 구매 및 판매를 통해 마이크로그리드가 전력회사에 지급하는 비용을 결정하는 식(3)으로 구성된다.

$$\text{Min } J^k = J_{EV}^k + J_{grid}^k \quad (1)$$

$$J_{EV}^k = \sum_{n=1}^N (S_n^{c,k} P_n^{c,\max} \rho_{EV}^{c,k} + S_n^{d,k} P_n^{d,\max} \rho_{EV}^{d,k}) \quad (2)$$

$$J_{grid}^k = \rho_{grid}^{buy,k} P_{grid}^{buy,k} - \rho_{grid}^{sell,k} P_{grid}^{sell,k} \quad (3)$$

위 식에서 충전 및 방전을 수행하는 EV의 총 대수는 N 으로 표현하고, EV의 번호는 n 으로 정의한다. EV가 낼 수 있는 최대 충/방전 전력은 P_n^{\max} , 시간 k 에서 EV의 충/방전시 금액은 $\rho_{EV}^{c,k}, \rho_{EV}^{d,k}$, 전력회사로부터 구매/판매하는 금액은 $\rho_{grid}^{sell,k}, \rho_{grid}^{buy,k}$ 이다. 목적함수를 통해 최적화하는 변수는 충/방전 비율 $S_n^{c,k}, S_n^{d,k}$ 과 전력회사로부터 구매/판매하는 전력인 $P_{grid}^{buy,k}, P_{grid}^{sell,k}$ 이다.

마이크로그리드의 소비되는 총 전력비용 최소화를 위한 최적화의 제약조건은 EVSE의 최적 충전 및 방전 스케줄을 위한 제약조건은 다음과 같다.

- 전력수급 균형 조건: 전력의 수요와 공급의 균형 유지
- EV 충/방전 전력 제한: 충전과 방전의 동시 수행 금지, 최대 전력 이상 충/방전 금지

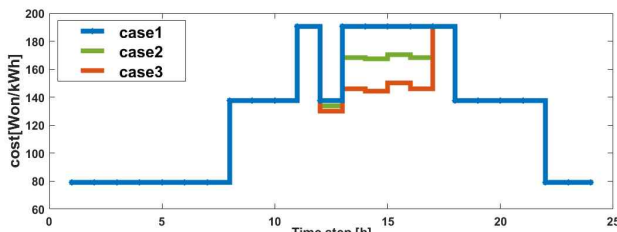
- EV SOC 제한: 최대 및 최소 SoC 범위 내에서 EV 충/방전 동작 수행
- 전력 구매 및 판매 제한: 한계 용량 내에서 전력의 구매와 판매 진행

2.3 EV 충/방전 동적요금제 모델 설계

본 논문에서는 3가지 EV의 충/방전 동적요금을 정의하고 사례 연구를 통한 동적요금의 효과를 분석한다. 3가지 요금제의 case는 다음과 같다.

- Case 1: 한전의 EV ToU 요금제 적용
- Case 2: 마이크로그리드 내에 신재생 분산전원의 발전으로 인한 잉여전력 발생 시, SMP와 EV ToU의 평균값으로 EV 충/방전 요금 설정, $(SMP+ToU)/2$
- Case 3: 분산전원의 발전으로 인한 잉여전력 발생 시, SMP로 EV 충전요금 설정

Case 2와 3에서 SMP 요금이 ToU 요금보다 높으면 EV 충/방전 요금을 Case 1과 같이 ToU 요금을 적용한다.



〈그림 2〉 case에 따라 설계된 Dynamic Pricing

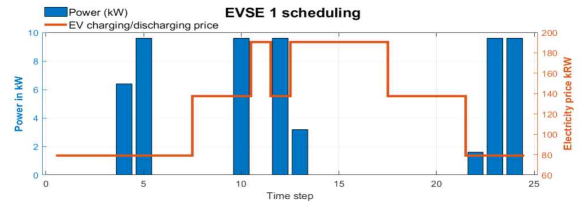
3. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 제안한 최적 제어 기법에 따른 스케줄링과, 설계한 EV 충/방전 동적요금에 마이크로그리드 총 운영 비용에 미치는 영향을 분석하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 마이크로그리드에는 4대의 EVSE가 있으며 총 9대의 EV가 방문하는 상황을 모의하였다. EV의 최대 충/방전 전력은 19.6kW, 최대 및 최소 SoC는 각각 90%와 10%로 설정하였다. 전기요금은 2023년 5월 16일자로 변경된 KEPCO의 일반용(을)-고압A을 사용하였고, 전력거래시 요금은 KPX의 2023년 5월 16일의 SMP 요금을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용한 EV의 충/방전 시나리오는 표1과 같다.

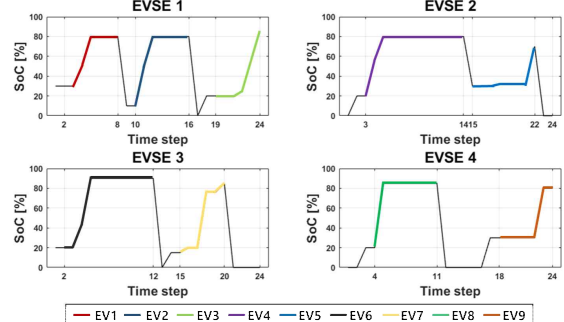
〈표 1〉 EV의 충/방전 시나리오

EVSE 번호	1			2		3		4	
EV 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9
충전소 도착시간[h]	2	10	19	3	15	2	15	4	18
충/방전 종료시간[h]	8	16	24	14	22	12	20	11	24
초기SoC[%]	30	10	20	20	30	20	15	20	30
목표SoC[%]	80	80	85	80	70	90	85	85	80

그림 3, 4, 5는 마이크로그리드의 운영 비용 최적화를 통한 EV 충/방전 스케줄링 결과로 모든 시간에서 표1의 제약조건에 맞게 최적화가 된 것을 확인할 수 있다. 그림3은 EVSE1에 연결된 EV 3대의 최적 충/방전 전력과 SoC 변화를 나타내며, 전기요금이 낮은 구간에서 EV가 충전되고, 전기요금이 높은 구간에서 EV가 방전하도록 스케줄링 된 것을 볼 수 있다. 그림 4는 4개 충전소에 연결된 EV의 SoC를 나타낸다. 이때 모든 EV는 사용자가 원하는 목표 SoC 충전 조건을 만족하였다.

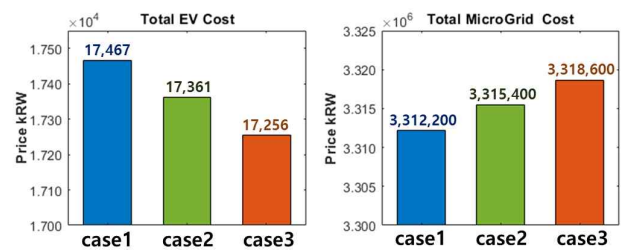


〈그림 3〉 EV의 최적 충/방전 전력과 SoC 변화



〈그림 4〉EVSE 1,2,3,4에 연결된 EV의 SoC 변화

그림 5는 3가지 EV 충/방전 동적요금을 적용하여 계산된 EV 및 마이크로그리드의 총 비용을 나타낸다. 이때 각 case는 제안한 최적 제어 기법에 따라 스케줄링 된 결과이다. case1 보다 case3 요금을 적용했을 때 EV 사용자의 총 가격이 저렴하지만, 마이크로그리드 입장에서는 case3의 가격으로 EV 충전에 아닌 잉여전력을 판매할 수도 있기 때문에 case1의 요금이 더 이익이다. 따라서 설계한 case2의 요금제를 적용하면 마이크로그리드는 case3보다 비싼 값으로 잉여전력을 EV 충전에 사용하고, EV 사용자 입장에서는 case1보다 더 저렴한 가격으로 EV를 충전할 수 있다.



〈그림 5〉 case에 따른 EV 및 마이크로그리드의 총 비용

4. 결 론

본 논문에서는 PV와 EV가 연계된 마이크로그리드에서 운영 비용 최소화에 대한 최적화 기법을 제안하였고 결과를 통해 제약조건을 만족시키는 EV의 최적 충/방전 스케줄을 도출할 수 있었다. 또한 EV 충/방전시 요금을 Dynamic Pricing으로 적절하게 설계하여 마이크로그리드의 잉여전력 발생시간에 EV 사용자의 충전을 유도하였다. 이러한 동적가격 책정은 V2G EV 사용자의 충/방전 패턴에 직접적인 영향을 미치므로, 마이크로그리드의 전력 수급 안정화에 유연성을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No.2019R1A2C1003880)을 받아 수행된 연구임

〔참 고 문 헌〕

- [1] 박성원, 백승환, 박대현, “DSO와 전기차 충전소의 협조 운영 환경에서 스마트 충전 기반 배전계통 전압 관리 방법”, KIEE, vol. 72P, no.1, pp.19~25, 2023
- [2] 김준기, 트립피하이, 김상혁, 유철희, 정일엽 “직류 나노그리드의 경제적 운영을 위한 전기자동차의 최적 충방전 스케줄링 알고리즘”, 대한전기학회 하계학술대회 논문, 2020