

# V2G에서 비용 최소화를 위한 최적 에너지 저장 장치 결정 전략

차 채연\*, 김 경 주\*, 박 형 곤<sup>o</sup>

## Optimal Decision of Energy Storage System for Cost Minimization in V2G

Chaeyeon Cha\*, Kyoungjoo Kim\*, Hyunggon Park<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문은 전기차를 움직이는 전력원으로 사용하는 에너지 그리드인 V2G(Vehicle-to-Grid) 기술에서 전기차 구동에 필요한 전력 구입 비용을 최소화하는 에너지 교환 의사 결정 전략을 제안한다. V2G에서 에너지 생산 및 소비, 전기차의 유입량과 에너지 구매/판매량에 대한 수학적 모델을 통하여 에너지 가격에 따른 전기차의 에너지 교환 최적 시점, 에너지 저장 장치 선택과 에너지의 최적 구매/판매량을 결정할 수 있는 최적화 해법을 제안한다. 실험을 통해 제안한 최적화 해법이 전기차 구동을 위한 에너지 구입 비용을 최소화할 수 있으며 V2G의 에너지 분포를 안정화할 수 있음을 보였다.

**키워드** : 전기차, V2G(Vehicle-to-Grid), 의사 결정, 최적화 문제, 선형 계획법

**Key Words** : Electric vehicle, V2G(Vehicle-to-Grid), Decision making, Optimization problem, Linear programming

### ABSTRACT

In this paper, we propose a decision making strategy for energy exchange that can minimize the cost of energy purchase required for electric vehicles in V2G where electric vehicles play a role of mobile power sources in energy grid. By mathematically modeling the energy generation and consumption, inflow of electric vehicles and energy exchange between energy storage systems and electric vehicles, we find the optimal time for energy exchange of electric vehicles, optimal selection of energy storage systems, and optimal amount of energy based on the energy price. Experiment results show that the optimal solutions can minimize the cost of energy purchase and stabilize the energy distribution in V2G.

※ 본 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00739)을 받아 수행되었습니다.

• First Author : Ewha Womans University Department of Electronic and Electrical Engineering, Graduate Program in Smart Factory, chaeyeon.cha@ewhain.net, 학생회원

o Corresponding Author : Ewha Womans University Department of Electronic and Electrical Engineering, Graduate Program in Smart Factory, hyunggon.park@ewha.ac.kr, 종신회원

\* Hyundai Motor Company, eP Advanced Engineering Team 2, KJooKim@hyundai.com

논문번호 : 202302-016-C-RN, Received January 30, 2023; Revised March 15, 2023; Accepted March 21, 2023

## I. 서론

기존 자동차의 내연기관 사용으로 인한 배기가스 배출 문제를 해결하기 위해 전기차 산업의 중요성이 대두되었으며<sup>[1]</sup>, 전기차를 사용하면 내연기관의 원료인 화석연료보다 전기 이용료가 저렴하다는 장점으로 인하여 2021년 전세계 자동차 시장 중 전기차가 차지하는 비율이 약 9%까지 급속도로 성장하였다<sup>[2,3]</sup>. 이에 따라 에너지 그리드(energy grid)에서 전기 에너지의 효율을 키우기 위해 시간 및 공간의 영향을 받는 발전소와 친환경 재생 에너지원이 온라인으로 연결되어 에너지 그리드를 안정화할 필요가 있다<sup>[4]</sup>.

하지만 에너지 그리드의 에너지 공급원인 발전소가 고정된 위치에 존재하기 때문에 발전소에서 에너지 저장 장치(ESS, Energy Storage System)로 에너지를 전달해야 하는 문제점이 있으며, 친환경 에너지 발전소의 경우 공간적 제약뿐만 아니라 시간에 따라 발전량이 달라지는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 전기차를 움직이는 전력원으로 사용하여 양방향 에너지 교환을 할 수 있는 V2G(Vehicle-to-Grid) 기술이 제안되었다. V2G는 배전계통 운영자, 중개자, 양방향 충전 장치, 전기차로 구성된 시스템으로 각 구성 요소들은 실시간으로 계통상태, 충전 및 방전을 요구하는 전기차의 수 및 전기차의 배터리 충전 상태 등의 정보를 공유한다. V2G 기술과 관련하여 진행 중인 연구로는 충전 및 방전 스케줄링을 통해 최대 부하를 최소화하는 방법과 전기차 사용자에게 금전적 이익을 제공하는 방법이 있다<sup>[5]</sup>. 또한, V2G 실증에 있어 국내외에선 V2G 테스트베드를 설치하여 시범 운행을 하거나 전기차에 탑재 가능한 탑재형 양방향 충전기를 개발하여 전기차 충전 옵션 시험, 통신 시스템을 포함한 스마트 충전, 전기차 계통 통합, 전기차와 신재생에너지의 통합, 양방향 충전 시험 및 실증이 활발히 진행되고 있다<sup>[6-8]</sup>.

특히, V2G 시스템에서 전기차 사용자의 이익을 최대화하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 전기차의 배터리 상태, 그리드 상태 및 충전 수요를 고려하는 혼합 정수 선형 계획법(MILP, Mixed-Integer Linear Programming)으로 최적화 문제를 설정하여 전기차의 충전 및 방전과 이동 경로를 관리하는 알고리즘이 제안되었으며<sup>[9]</sup>, V2G 시스템에서 에너지 가격의 변화를 기반으로 심층 강화 학습(DRL, Deep Reinforcement Learning) 및 이더리움 블록체인 기술(EBT, Ethereum Blockchain Technology)을 이용하여 시스템에서 전기차의 에너지 교환 의사 결정을 최적화하

표 1. 전기차의 에너지 교환 의사 결정 전략 요약  
Table 1. Summary of decision-making strategies for energy exchange in electric vehicles

Algorithm	Optimization Method	Complexity	Stability of Energy Grid
[9]	MILP	Low	X
[10]	DRL + EBT	High	X
Proposed Strategy	LP	Low	O

며 시스템의 보안까지 고려하는 알고리즘이 제안되었다<sup>[10]</sup>. 제안된 방법들은 모두 전기차 사용자의 이익을 최대화하지만, 에너지 그리드의 안정성을 고려하지 않는다는 한계점이 있다. 따라서 본 논문은 V2G에서 전기차 구동에 필요한 비용을 최소화하며 에너지 그리드를 안정화하는 최적 의사 결정 전략을 제안한다. 제안하는 전략은 V2G의 다양한 변수를 고려하여 전기차의 에너지 교환 최적 시점 및 에너지 저장 장치와 최적의 구매 혹은 판매 전력을 결정할 수 있으며 이를 통해 V2G의 에너지 불균등 분포를 안정화할 수 있다. 표 1은 기존에 제안된 전기차의 에너지 교환 의사 결정 전략과 제안하는 에너지 교환 의사 결정에 대한 요약이다.

## II. V2G 시스템

### 2.1 V2G 시스템 모델링

본 논문에서는 에너지 그리드에 다수의 전기차가 존재하는 V2G 시스템을 고려한다. 에너지 그리드에서 에너지 저장 장치는 발전소를 통해 생산되는 에너지를 전달받으며 유입되는 다수의 전기차로부터 에너지를 구매하거나 판매할 수 있다. 그림 1은 본 논문에서 고려하는 V2G 시스템을 나타낸다. 본 시스템은 에너지 저장 장치가 발전소에서 생산된 에너지를 전달받으며 주행하는 전기차의 에너지 구매/판매 의사에 기반하여 전기차와 에너지를 교환한다. 에너지 저장

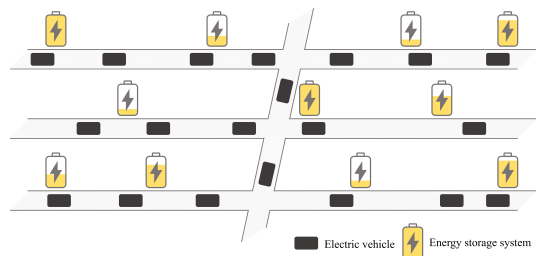


그림 1. V2G 시스템  
Fig. 1. V2G system

장치가 전기차와 교환하는 에너지량은 유입되는 전기차의 분포와 전기차의 에너지 구매/판매 의사에 따라 달라진다. 따라서 본 논문은 전기차의 주행 경로를 기반으로 에너지 저장 장치에 저장된 에너지량과 전기차의 유입량 및 에너지 구매/판매 의사를 모델링 한다.

2.1.1 에너지 저장 장치의 에너지량 모델링

전기차의 주행 경로에 총  $n$ 개의 에너지 저장 장치가 위치하며 각 에너지 저장 장치는 하루 동안 균등한 시간 간격으로 총  $T$ 번의 시간 간격에서의 저장 에너지량 데이터를 공유한다. 에너지 저장 장치에 저장된 에너지는 발전소를 통해 생성된 에너지와 전기차와의 양방향 에너지 교환으로 인한 구매 혹은 판매되는 에너지로 구분할 수 있다.  $t(t = 1, \dots, T)$  번째 시간 간격에서  $i(i = 1, \dots, n)$  번째 에너지 저장 장치에 저장된 에너지량을  $E_i^t(t)$  라하고, 발전소를 통해  $t$  번째 시간 간격에서  $i$  번째 에너지 저장 장치에 전달한 생산 에너지는  $E_i^g(t)$  라 하자.  $i$  번째 에너지 저장 장치가  $t$  번째 시간 간격에서 전기차로부터 구매한 에너지량은  $E_i^b(t)$ , 전기차에 판매한 에너지량은  $E_i^s(t)$  라 했을 때,  $t$  시간에서  $i$  번째 에너지 저장 장치에 저장된 에너지인  $E_i(t)$  는 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_i(t) = E_i^g(t) + E_i^b(t) - E_i^s(t) \quad (1)$$

2.1.2 전기차의 유입량과 에너지 구매/판매 의사 모델링

하나의 에너지 저장 장치에  $t$  시간 동안 접근하는 전기차의 수를  $N(t)$  라 하면,  $N(t)$  는 포아송(Poisson) 확률 변수로 볼 수 있고<sup>[11]</sup>, 기댓값  $\lambda$  에 대하여  $N(t) = n$  인 확률 질량 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[12]</sup>.

$$P_{N(t)}(n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (2)$$

본 논문에서 전기차는 주행 경로에 위치한 에너지 저장 장치의 에너지량에 대한 정보를 실시간으로 수집 가능하며 실시간 예측이 가능하다고 가정한다. 전기차의 에너지 의사 결정을 위해 V2G에서 수집 가능한 주요 전기차 데이터 특성은 표 2과 같으며, 본 논문에서는 주요 특성 중 전기차의 SOC(State of Charge)와 목표 SOC(Target SOC)에서 전기차에 저장된 배터리 양을 기반으로 전기차가 에너지 교환 의

표 2. 수집 가능한 주요 전기차 데이터 특성  
Table 2. Key features of electric vehicle data

Feature	Unit
High Voltage Battery Voltage	V
High Voltage Battery Current	A
SOC	%
Target SOC	%
Charger Connection Time	Date Time
Charger Release Time	Date Time
Charger Completion Time	Date Time
Battery Capacity	kWh
Vehicle Speed	Km/h

사 결정을 한다고 가정한다.

$j(j = 1, \dots, p)$  번째 전기차가 설정한 충전 완료 SOC인 목표 SOC, 충전을 결정하는 SOC인 최소 SOC와  $t$  시간의 SOC에서 전기차에 저장되어있는 배터리 양을 각각  $\theta_j^T, \theta_j^M, \theta_j(t)$  라 정의하자. 일반적인 전기차의 에너지 구매 또는 판매 의사 결정은  $\theta_j^M$  보다  $\theta_j(t)$  가 작을 때 에너지 저장 장치에서 에너지를 구매하여 전기차의 배터리를 충전하며,  $\theta_j(t)$  가  $\theta_j^T$  보다 큰 경우 에너지 저장 장치에 에너지를 판매할 수 있다.  $t$  시간에서  $j$  번째 전기차의 의사 결정인  $\alpha_j(t)$  가 일반적인 전기차의 에너지 구매 및 판매 의사 결정 전략을 따를 때,  $\alpha_j(t)$  를 다음과 같이 표현하자.

$$\alpha_j(t) = \begin{cases} 0, & \theta_j(t) \leq \theta_j^M \\ 1, & \theta_j(t) > \theta_j^T \end{cases} \quad (3)$$

이때,  $t$  시간 동안  $i$  번째 에너지 저장 장치에 접근한 다수의 전기차가 판매한 에너지 총량과 구매한 에너지 총량은 각각 식 (1)에서의  $E_i^g(t)$ ,  $E_i^s(t)$  와 같다.

2.2 V2G의 에너지 분포 실험 및 문제 정의

II장 1절에서 모델링 한 V2G 시스템의 시간에 따라 변화하는 에너지 저장 장치의 저장 에너지량을 보이기 위해 실제 에너지 생산량 데이터와 전기차의 유입량 및 구매/판매 에너지량 모델링을 통한 실험을 진행한다.

본 실험에서는 전기차의 주행 경로에 3개의 에너지 저장 장치( $n = 3$ )가 위치한다고 가정한다. 3개의 에너지 저장 장치는 하루를 24 ( $T = 24$ ) 개의 간격으로

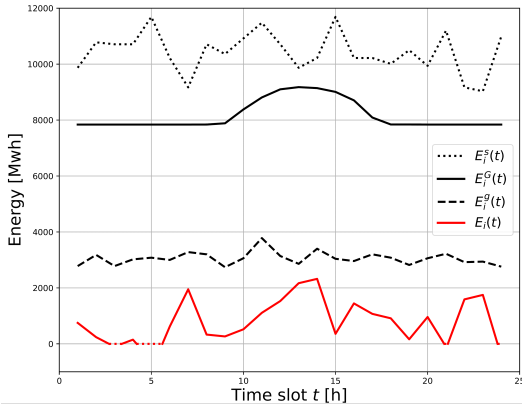


그림 2. 시간에 따른 에너지 저장 장치의 저장 에너지량 변화 예시  
 Fig. 2. Example of change in the amount of energy stored in an energy storage system over time

나누어 저장 에너지량을 공유하며, 생산 에너지량으로 원자력 발전소에서 생성된 에너지와 태양광 발전소에서 생성된 에너지를 사용한다<sup>13,14</sup>. 식 (2)에서  $\lambda = \{200, 250, 300\}$ 로 설정하고 전기차의 일반적인 에너지 구매/판매 여부는 이산균등분포를 따른다고 가정하며, 전기차가 주행 경로에 있는 에너지 저장 장치의 저장 에너지량을 예측하기 위해 다수 병렬 기중 모델을 사용한다고 가정한다<sup>15</sup>.

그림 2는 전기차의 주행 경로에 위치한 하나의 에너지 저장 장치에서 시간에 따라 변하는 에너지량을 나타낸다. 즉, 그림 2는  $i$ 번째 에너지 저장 장치에서 시간에 따라 변화하는 에너지량을 나타내기 위해  $\Pi$  장 1절에서 정의한  $E_i^g(t), E_i^f(t), E_i^s(t), E_i(t)$ 가 시간  $t$ 에 따라 변화하는 것을 나타낸다. 그림 2에서  $E_i(t)$ 의 빨간색 점선 구간을 통해 에너지 저장 장치에 저장된 에너지량이 0이 되는 구간이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 저장된 에너지량이 0이 되면 에너지 저장 장치에서는 전기차에게 판매할 에너지가 없지만, 이 경우에도 계속해서 전기차의 에너지 판매 요청이 들어오는 것을  $E_i^s(t)$ 를 통해 확인할 수 있다. 즉, 전기차의 일반적인 에너지 구매/판매 의사 결정을 따르면 에너지 저장 장치가 방전되는 현상이 나타날 수 있음을 확인할 수 있으며, 이는 불안정한 형태의 에너지 그리드로 존재할 수 있음을 의미한다.

### III. 전기차의 에너지 교환 최적 의사 결정

본 논문에서 에너지 저장 장치의 에너지 판매 가격

은 현재 저장 에너지량에 반비례하여 설정된다고 가정한다<sup>16</sup>. 전기차의 에너지 교환 의사 결정은 어느 시점에 어느 위치의 에너지 저장 장치에서 구매 또는 판매할 에너지량을 결정하는 것으로 주행 경로에 위치한 에너지 저장 장치의 에너지량을 고려하여 전기차가 가장 낮은 비용을 사용하는 것을 목적으로 한다.

$i$ 번째 에너지 저장 장치의 단위별 가격을  $k_i$ 라 할 때,  $t$ 시간에서  $i$ 번째 에너지 저장 장치의 에너지 가격은  $k_i/E_i(t)$ 이다. 전기차  $j$ 는  $t$ 시간에  $i$ 번째 에너지 저장 장치에서 에너지를 구매 혹은 판매하며 구매 혹은 판매하는 에너지량을  $E_{v_{i,j}}(t)$ 라 하자. 전기차의 구동을 위한 에너지 총 구입 비용을  $C_{v_j}$ 라 하면  $C_{v_j}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$C_{v_j} = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{E_i(t)} \cdot (-1)^{\alpha_j(t)} E_{v_{i,j}}(t) \quad (4)$$

전기차의 에너지 구입 상황에서 전기차  $j$ 가  $i$ 번째 에너지 저장 장치에서 충전한 에너지량인  $E_{v_{i,j}}(t)$ 의 총합이  $\theta_j^T$ 보다 크거나 같아야 하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n E_{v_{i,j}}(t) \geq \theta_j^T - \theta_j(t) \quad (5)$$

전기차가 에너지를 판매하는 경우 전기차  $j$ 가  $i$ 번째 에너지 저장 장치에 에너지를 판매한 이후 남아있는 에너지량이 전기차가 설정한 목적 SOC에서의 에너지량을 초과할 수 없으므로 다음과 같이 표현된다.

$$-\sum_{i=1}^n E_{v_{i,j}}(t) \leq \theta_j^T - \theta_j(t) \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)은 식 (3)을 기반으로 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^n (-1)^{\alpha_j(t)} E_{v_{i,j}}(t) \geq \theta_j^T - \theta_j(t) \quad (7)$$

목적함수와 제한조건이 모두 선형이기 때문에 전기차의 비용을 최소화하는 에너지 교환 의사 결정을 위한 최적화 문제의 해법으로 선형 계획법(LP, Linear Programming)을 사용한다. 선형 계획법은 계산복잡

도가 낮다는 장점이 있어 시간에 민감한 차량 네트워크의 요구를 충족할 수 있다<sup>17)</sup>. 선형 계획법을 기반으로 한 최적화 문제는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } C_{v_j} \\ & \text{subject to } \sum_{i=1}^n (-1)^{\alpha_j(t)} E_{v_{i,j}}(t) \geq \theta_j^T - \theta_j(t) \end{aligned} \quad (8)$$

이 문제를 해결함으로써 전기차 구동에 필요한 비용인  $C_{v_j}$ 를 최소화할 수 있으며, 식 (4)를 기반으로 전기차  $j$ 의 최적 에너지 구매 위치인  $i$ 와 에너지 구매량  $E_{v_{i,j}}(t)$ , 최적 에너지 구매 시점  $t$ 를 찾아낼 수 있다.

#### IV. 실험 및 성능 검증

III장에서 논의한 것과 같이, 제안한 전기차의 에너지 교환 의사 결정 전략을 사용하였을 때 전기차의 총 비용이 기존의 전기차 의사 결정 전략보다 낮아짐을 실험적으로 확인하고자 한다. 본 실험에서는 3개의 에너지 저장 장치의 단위 가격을 모두 1 ( $k_i = 1, i = 1, 2, 3$ )이라 가정한다.

그림 3은 V2G에서 시간에 따른 전기차의 SOC 변

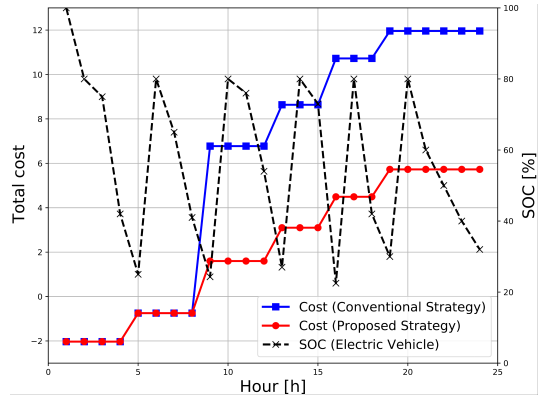


그림 3. 제안한 전기차의 에너지 교환 의사 결정 전략과 기존의 전기차 의사 결정 전략에 따른 전기차의 총 비용  
Fig. 3. The total cost of an electric vehicle according to the proposed energy exchange decision making strategy and the conventional strategy

화를 기반으로 제안한 전기차의 에너지 교환 의사 결정 전략과 기존의 전기차 의사 결정 전략을 사용할 때 한 대의 전기차가 주행 중에 지분하게 되는 총 비용을 나타낸다. 에너지 판매에 있어 기존의 의사 결정 전략을 사용할 때와 제안 의사 결정 전략을 사용할 때 모두 전기차의 판매 이득이 2.03인 것을 확인할 수 있다. 에너지 구입에서 기존 전략을 사용하면 평균 2.80, 최

표 3. 에너지 그리드에서 전기차의 에너지 교환 의사 결정 전략에 따른 월별 저장 에너지 분포의 표준편차  
Table 3. The standard deviation of the monthly stored energy distribution based on the decision-making strategies of energy exchange of electric vehicles in the energy grid

Standard Deviation		Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mean	Convention al Strategy	946	852	842	938	826	940	807	803	788	815	824	789
	Proposed Strategy	936	849	839	935	823	937	804	800	784	812	821	786
	<b>Decrease Rate [%]</b>	<b>1.057</b>	<b>0.352</b>	<b>0.356</b>	<b>0.320</b>	<b>0.363</b>	<b>0.319</b>	<b>0.372</b>	<b>0.374</b>	<b>0.508</b>	<b>0.368</b>	<b>0.364</b>	<b>0.380</b>
Max	Convention al Strategy	1729	1783	1486	2397	1357	1429	1424	1208	1336	1420	1757	1287
	Proposed Strategy	1728	1781	1481	2394	1356	1429	1423	1205	1332	1420	1754	1285
	<b>Decrease Rate [%]</b>	<b>0.058</b>	<b>0.112</b>	<b>0.336</b>	<b>0.125</b>	<b>0.074</b>	<b>0.000</b>	<b>0.070</b>	<b>0.248</b>	<b>0.299</b>	<b>0.000</b>	<b>0.171</b>	<b>0.155</b>
Min	Convention al Strategy	439	385	383	545	141	453	367	345	301	565	243	281
	Proposed Strategy	435	385	381	543	139	449	365	344	298	562	243	280
	<b>Decrease Rate [%]</b>	<b>0.911</b>	<b>0.000</b>	<b>0.522</b>	<b>0.367</b>	<b>1.418</b>	<b>0.883</b>	<b>0.545</b>	<b>0.290</b>	<b>0.997</b>	<b>0.531</b>	<b>0.000</b>	<b>0.356</b>

소 1.24, 최대 7.52의 비용을 지불하는 것을 확인할 수 있으며, 제안 의사 결정 전략을 따르게 되면 평균 1.55, 최소 1.24, 최대 2.35의 비용을 지불하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 제안 의사 결정 전략이 기존 의사 결정 전략에 비해 전기차의 에너지 구매 비용을 평균 44.55%, 최대 68.81% 줄일 수 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 제안하는 전기차의 의사 결정 전략을 통해 전기차의 주행 중 지불하게 되는 총 비용은 5.73이고 기존 전기차의 의사 결정 전략을 통한 총 비용은 11.96로 제안하는 의사 결정 전략이 기존 의사 결정 전략에 비해 약 52.11%의 비용 절감이 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

표 3은 V2G에서 전기차의 에너지 교환 의사 결정 전략에 따른 1년 동안 저장된 에너지 분포의 표준편차를 나타낸다. 제안한 전기차의 의사 결정 전략을 사용하였을 때 일반적인 의사 결정 전략을 사용한 것보다 에너지 분포 표준편차의 평균은 최대 1.06%, 최소 0.32% 감소하며 표준편차의 최댓값은 최대 0.34%, 표준편차의 최솟값은 최대 1.42% 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 제안한 전기차의 에너지 교환 의사 결정 전략이 전기차의 비용 최소화뿐만 아니라 V2G를 안정화할 수 있음을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 V2G의 시공간에 대한 에너지 저장 장치의 저장 에너지양을 기반으로 전기차의 주행 중 지불 비용을 최소화하는 에너지 교환 의사 결정 전략에 관한 연구를 진행하였다. 에너지 저장 장치의 에너지 생산 및 소비량과 전기차의 유입량 및 구매/판매 에너지양을 모델링하여 시공간에 따른 저장 에너지양 변화를 확인하였다. 에너지 분포를 통해 저장된 에너지양이 0이 되는 경우에도 전기차의 에너지 판매 요청이 있음을 확인하였으며, 이를 해결하기 위해 전기차의 비용 최소화를 위한 에너지 교환 의사 결정 전략을 제안하고 이를 실험하였다. 실험을 통해 기존 전기차의 에너지 교환 의사 결정 전략보다 제안 의사 결정 전략을 사용하였을 때 전기차의 비용이 절감되는 것을 확인하였으며, 제안하는 의사 결정 전략을 통해 V2G 에너지 불균등 분포의 표준편차가 줄어드는 것을 확인하였다. 따라서 제안하는 전기차의 의사 결정 전략을 통해 전기차의 주행 중 지불 비용을 최소화할 수 있으며 V2G의 에너지 분포를 안정화할 수 있다.

## References

- [1] Z. Li, A. Khajepour, and J. Song, "A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles," *Energy*, vol. 182, pp. 824-839, 2019. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.077>)
- [2] P. R. Fayziyev, I. A. Ikromov, A. A. Abduraximov, and Q. M. Dehqonov, "Timeline: History of the electric car, trends and the future developments," *Eurasian Res. Bulletin*, vol. 6, pp. 89-94, 2022.
- [3] D. V. Pelegov and J.-J. Chanaron, "Electric car market analysis using open data: Sales, volatility assessment, and forecasting," *Sustainability*, vol. 15, no. 1, pp. 399, 2023. (<https://doi.org/10.3390/su15010399>)
- [4] H. Goldstein, "What V2G tells us about EVs and the grid: Vehicle-to-grid technology adds another layer of complexity to the electric-vehicle transition," *IEEE Spect.*, vol. 59, no. 8, p. 2, 2022. (<https://doi.org/10.1109/MSPEC.2022.9852404>)
- [5] J. Singh and R. Tiwari, "Cost benefit analysis for V2G implementation of electric vehicles in distribution system," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 5, pp. 5963-5973, 2020. (<https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2986185>)
- [6] J. Kim, S. Lee, C. Kim, G. Kim, and S. Shin, "Development direction of standardization of V2G in Korea," in *Proc. KIEE Conf.*, vol. 7, pp. 1639-1640, 2015.
- [7] M. Kisacikoglu, T. Markel, A. Meintz, J. Zhang, and M. Jun, *EV-grid integration (EVGI) control and system implementation-research overview*, USA: NREL Golden CO, 2016.
- [8] S. M. G. Dumlao and K. N. Ishihara, "Impact assessment of electric vehicles as curtailment mitigating mobile storage in high PV penetration grid," *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 736-744, 2022. (<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.223>)
- [9] A. Triviño-Cabrer, J. A. Aguado, and S. Torre, "Joint routing and scheduling for

electric vehicles in smart grids with V2G,” *Energy*, vol. 175, pp. 113-122, 2019.

(<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.184>)

- [10] A. Kumari, M. Trivedi, S. Tanwar, G. Sharma, and R. Sharma, “SV2G-ET: A secure Vehicle-to-Grid energy trading scheme using deep reinforcement learning,” *Int. Trans. Electri. Energy Syst.*, vol. 2022, p. 11, 2022. (<https://doi.org/10.1155/2022/9761157>)
- [11] D. L. Gerlough and A. Schuhl, *Use of Poisson distribution in highway traffic*, Eno Foundation for Highway Traffic Control Saugatuck, CT, 1955.
- [12] A. Leon-Garcia, *Probability and random processes for electrical engineering*, Pearson Education India, 1994.
- [13] Public data portal, *Power generation and utilization rate by nuclear power plant(2021)*, Retrieved Nov. 16, 2022, from [https://www.data.go.kr/data/15002302/fileData.do#/layer\\_data\\_infomation](https://www.data.go.kr/data/15002302/fileData.do#/layer_data_infomation)
- [14] Public data portal, *Solar power generation status(2022)*, Retrieved Nov. 16, 2022, from <https://www.data.go.kr/data/15025486/fileData.do>
- [15] H. Yeo, S. Sim, S. Hong, C. Cha, and H. Park, “Energy consumption prediction algorithm for smart factory based on multiple parallel weighted models,” in *The 2nd Korea Artif. Intell. Conf.*, pp. 324-325, 2022.
- [16] D. Gale, “The law of supply and demand,” *Math. Scand.*, pp. 155-169, 1955.
- [17] M. Ashjaei, L. Lo Bello, M. Daneshtalab, G. Patti, S. Saponara, and S. Mubeen, “Time-sensitive networking in automotive embedded systems: State of the art and research opportunities,” *J. Syst. Archit.*, vol. 117, pp. 102137, 2021. (<https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2021.102137>)

**차 채 연 (Chaeyeon Cha)**



2021년 2월 : 이화여자대학교 전자공학과 학사

2021년 3월~현재 : 이화여자대학교 전자전기공학과 석박사 통합과정

<관심분야> 게임이론, 최적화, 인공지능, 머신러닝

[ORCID:0000-0002-9027-9740]

**김 경 주 (Kyoungjoo Kim)**



1998년 : 연세대학교 전기공학과 학사

2003년 : 연세대학교 전기전자공학과 석사

2012년 : 연세대학교 전기전자공학과 박사

2012년~현재 : 현대자동차

<관심분야> EV충전 제어, V2G 최적제어, EV 에너지 예측, EV/HEV 차량 제어

**박 형 곤 (Hyunggon Park)**



2004년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 학사

2006년 3월 : University of California, Los Angeles (UCLA) M.S.

2008년 12월 : University of California, Los Angeles (UCLA) Ph.D.

2010년~현재 : 이화여자대학교 전자전기공학과 교수

<관심분야> 멀티에이전트 시스템 최적화, 머신러닝, 인공지능, 게임이론

[ORCID:0000-0002-5079-1504]