

# 전기자동차들의 불확실한 행동을 고려한 DRMPC 최적화 기반 스마트 전기차 충전소 에너지 관리 시스템

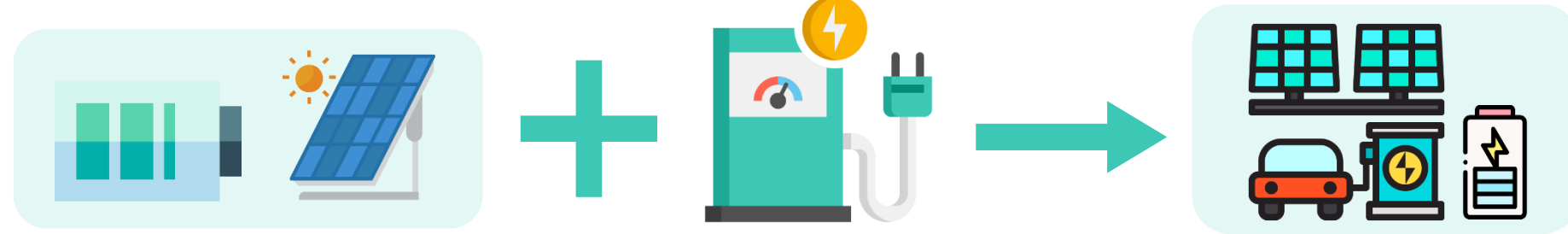


## 1. 제안배경

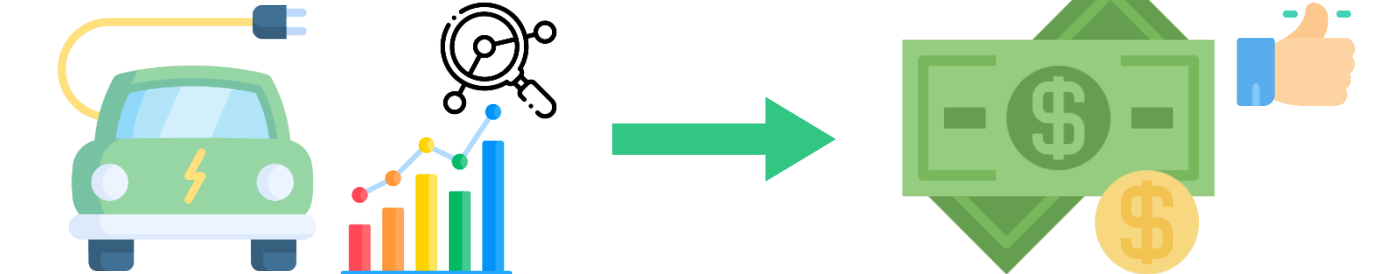
- 국제 사회의 탄소중립을 통한 환경보호 실천을 위해 전기차 (Electric vehicle, EV)에 대한 관심 증가.
- 이에 따라 전기차 이용 시 필수기반시설인 전기차 충전소의 수가 증가하고, 경제적인 전기차 충전소 운영을 위한 연구가 활발히 진행.



- 비용 절감 및 효율적인 에너지 운영을 위해 기존의 충전소에 신재생 에너지 시스템이 결합된 스마트 전기차 충전소가 제안됨.
- 또한 스마트 그리드의 기술 발전으로 전기차 고객은 충전소로부터 충전만이 아닌, 잉여 에너지도 판매할 수 있을 것으로 전망.



- 하지만 불확실한 전기차 고객의 행동에서 비롯된 에너지 사용은 정확한 예측이 어려워 충전소의 경제적인 운영에 영향을 미침.
- 따라서 본 팀은 전기차 고객의 불확실한 행동을 고려한 경제적인 스마트 전기차 충전소 에너지 관리 시스템을 제안.



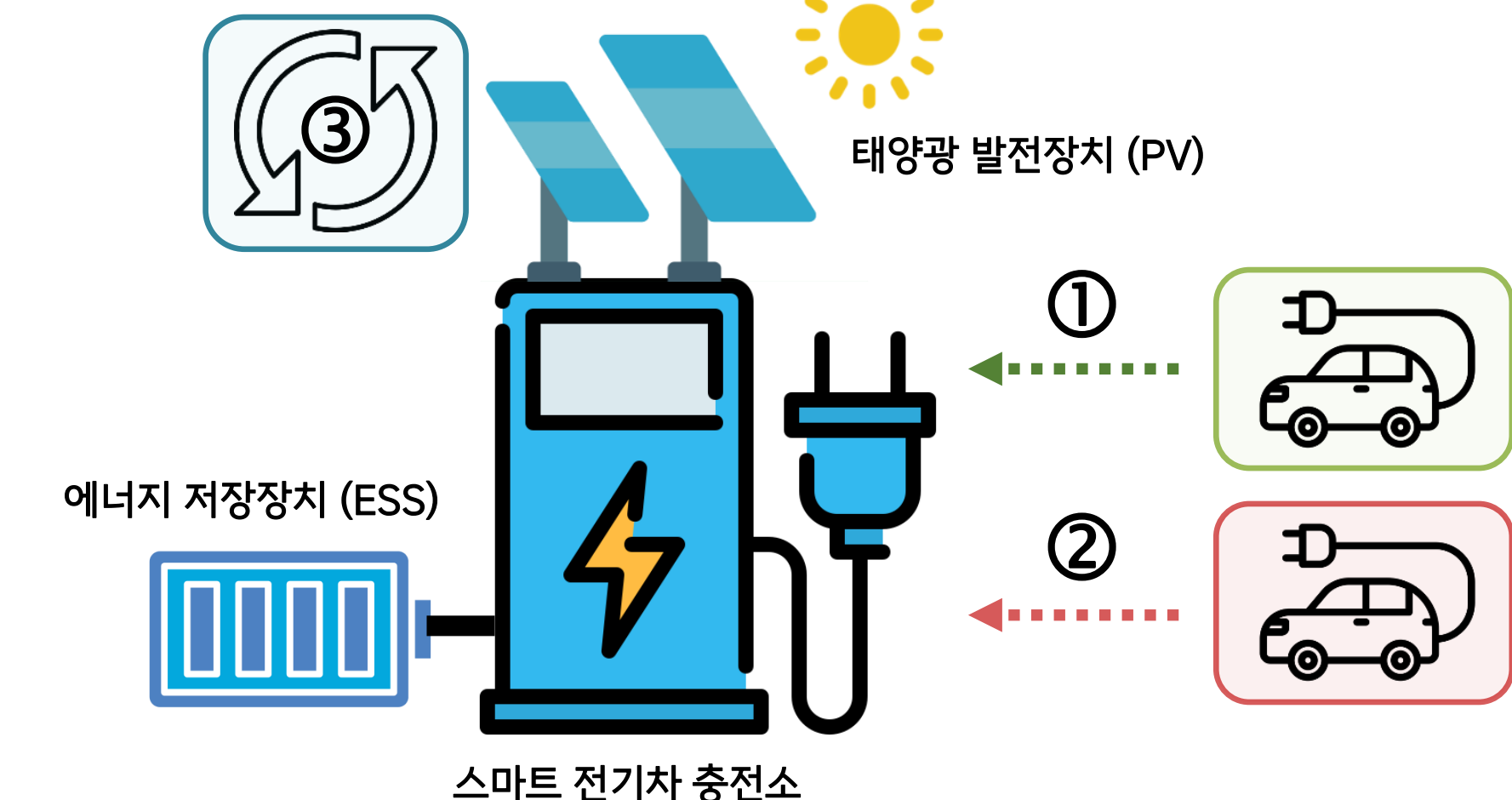
## 2. 핵심내용

### 2-1. 연구 목표

- 전기차 고객의 불확실한 에너지 구매 및 판매 환경을 고려한 스마트 전기차 충전소의 경제적인 에너지 운영 시스템 제안.
- 태양광 발전장치 (Photovoltaic system, PV) 와 에너지 저장장치 (Energy storage system, ESS) 의 신재생 에너지 시스템이 결합된 스마트 전기차 충전소 내 불확실한 환경요소들을 각 시간대별로 고려한 DRMPC<sup>1)</sup> 기반의 시스템 제안.

<sup>1)</sup> DRMPC : Distributionally robust model predictive control

### 2-2. 시스템의 주요 내용



<그림 1. 제안하는 시스템의 흐름도>

#### ■ 스마트 전기차 충전소 에너지 운영 환경

- 시스템의 사용자는 충전소 운영자로 설정.
- EV 고객으로부터 에너지 구입이 가능하다고 가정하며, EV 고객의 에너지 판매 및 구매량에 대한 불확실성을 고려.
- 연결된 PV와 ESS를 통해 에너지 운영 보조 [1].

#### ■ 시스템 과정

- EV 고객들에게 판매할 에너지 데이터 예측.
- EV 고객들에게 구매할 에너지 데이터 예측.
- 예측 데이터의 오차를 고려한 DRMPC 기반의 최적화된 에너지 솔루션 도출.

### 2-4. 시스템의 수식설계 및 재설계

$$\begin{aligned} \max (J_1 - J_2) \\ J_1 = \inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}_{N_{sell}}} \mathbb{E}^{\mathbb{P}} \left[ \sum_{t \in T} \pi_t^{sell} E_t^{sell} \right] \\ J_2 = \sup_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}_{N_{buy}}} \mathbb{E}^{\mathbb{P}} \left[ \sum_{t \in T} \pi_t^{buy} (E_t^{buy} + E_t^{net}) \right] \\ E_t^{net} = E_t^{fixed} + (E_t^{ch} - E_t^{dch}) \\ SOE_t = SOE_{t-1} + \mu_{ch} E_t^{ch} - \frac{E_t^{dch}}{\mu_{dch}} + E_t^{PV} \\ 0 \leq E_t^{buy} + E_t^{net} \\ SOE_{min} \leq SOE_t \leq SOE_{max} \\ E_{min}^{ch} b_t^{ESS} \leq E_t^{ch} \leq E_{max}^{ch} b_t^{ESS} \\ E_{min}^{dch} (1 - b_t^{ESS}) \leq E_t^{dch} \leq E_{max}^{dch} (1 - b_t^{ESS}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_1^{(re)} = \sup_{\lambda_t^{sell} \geq 0, s_{t,k}^{sell} \in \mathbb{R}} \sum_{t \in T} \left( -\lambda_t^{sell} \epsilon_t^{sell} + \frac{1}{N_{sell}} \sum_{k=1}^{N_{sell}} s_{t,k}^{sell} \right) \\ \text{s.t. } \pi_t^{sell} E_t^{sell} - \lambda_t^{sell} (E_t^{sell} - E_{t,k}^{sell}) \geq s_{t,k}^{sell} \\ \pi_t^{sell} E_{t,k}^{sell} \geq s_{t,k}^{sell} \\ J_2^{(re)} = \inf_{\lambda_t^{buy} \geq 0, s_{t,k}^{buy} \in \mathbb{R}} \sum_{t \in T} \left( \lambda_t^{buy} \epsilon_t^{buy} + \frac{1}{N_{buy}} \sum_{k=1}^{N_{buy}} s_{t,k}^{buy} \right) \\ \text{s.t. } \pi_t^{buy} (E_t^{buy} + E_t^{net}) + \lambda_t^{buy} (E_t^{buy} - E_{t,k}^{buy}) \leq s_{t,k}^{buy} \\ \pi_t^{buy} (E_t^{buy} + E_t^{net}) - \lambda_t^{buy} (E_t^{buy} - E_{t,k}^{buy}) \leq s_{t,k}^{buy} \\ \pi_t^{buy} (E_{t,k}^{buy} + E_t^{net}) \leq s_{t,k}^{buy} \end{aligned}$$

$J_1/J_2$	시스템의 목적함수 1과 2
$N_{sell}/N_{buy}$	전기차 고객에게 판매/구매하는 에너지량에 대한 시나리오 개수
$\mathcal{P}_{N_{sell}(buy)}$	전기차 고객에게 판매/구매하는 에너지량의 시나리오 분포
$T$	시스템에서 예측하는 전체 시간 범위
$E_t^{net}$	$t$ 시간에서의 전기차 충전소 net 에너지 소비량
$\pi_t^{sell}/\pi_t^{buy}$	$t$ 시간에서의 단위 에너지 판매/구매 가격
$\bar{E}_t^{sell}/\bar{E}_t^{buy}$	$t$ 시간에서의 분포 기반의 전기차 충전소 에너지 판매/구매량
$E_t^{ch}/E_t^{dch}$	$t$ 시간에서의 전기차 충전소 ESS의 에너지 충/방전량
$E_{min}^{ch}/E_{max}^{ch}$	ESS의 최소/최대 충전량
$E_{min}^{dch}/E_{max}^{dch}$	ESS의 최소/최대 방전량
$SOE_t$	$t$ 시간에서 ESS 잔여 에너지량
$SOE_{min}/max$	ESS 최소/최대 잔여 에너지량
$\mu_{ch}/\mu_{dch}$	ESS의 충/방전 효율
$E_t^{PV}$	$t$ 시간에서의 PV 발전량
$b_t^{ESS}$	$t$ 시간에서 ESS의 충/방전 여부를 결정하는 이진 변수

<표 1. 수식 (1)~(9) 설계에서 사용한 변수 및 환경설정>

목적함수를 연산프로그램을 통해 해결하기 위해 유한 (finite) 차원의 convex 문제로 재설계 (10)~(16). 참고문헌 [3]을 통해 재설계. ([3]의 proposition 1 참고)

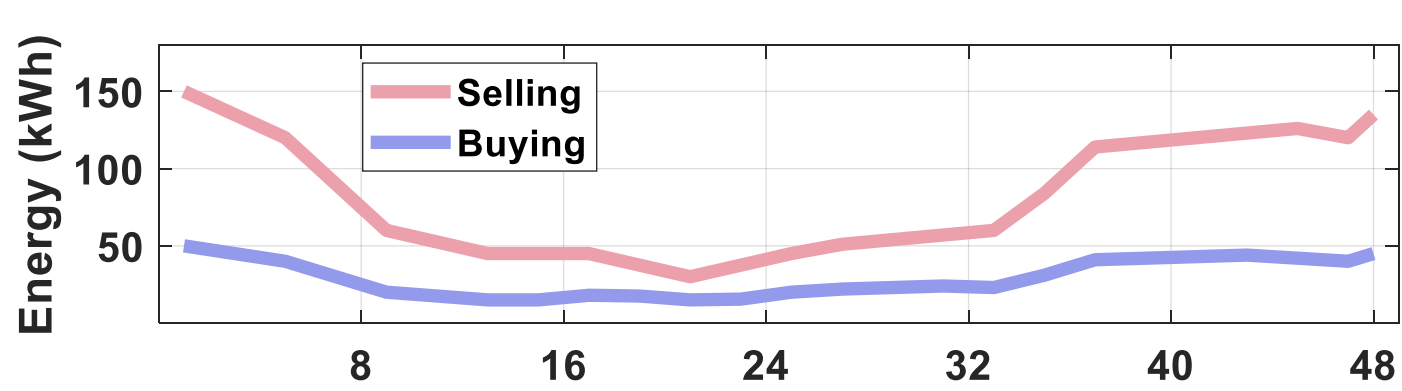
$J_1^{(re)}/J_2^{(re)}$	재설계된 시스템의 목적함수 1과 2
$\epsilon_t^{sell}/\epsilon_t^{buy}$	$t$ 시간에서의 에너지 판매/구매량의 WD
$E_{t,k}^{sell}/E_{t,k}^{buy}$	$t$ 시간에서의 에너지 판매/구매량에 대한 $k$ 번째 샘플
$E_t^{sell}$	$t$ 시간에서의 에너지 판매량 시나리오에 대한 최솟값
$E_t^{buy}/E_t^{net}$	$t$ 시간에서의 에너지 구매량 시나리오에 대한 최소/최대값

<표 2. 수식 (10)~(16) 재설계에서 사용한 변수 및 환경설정>

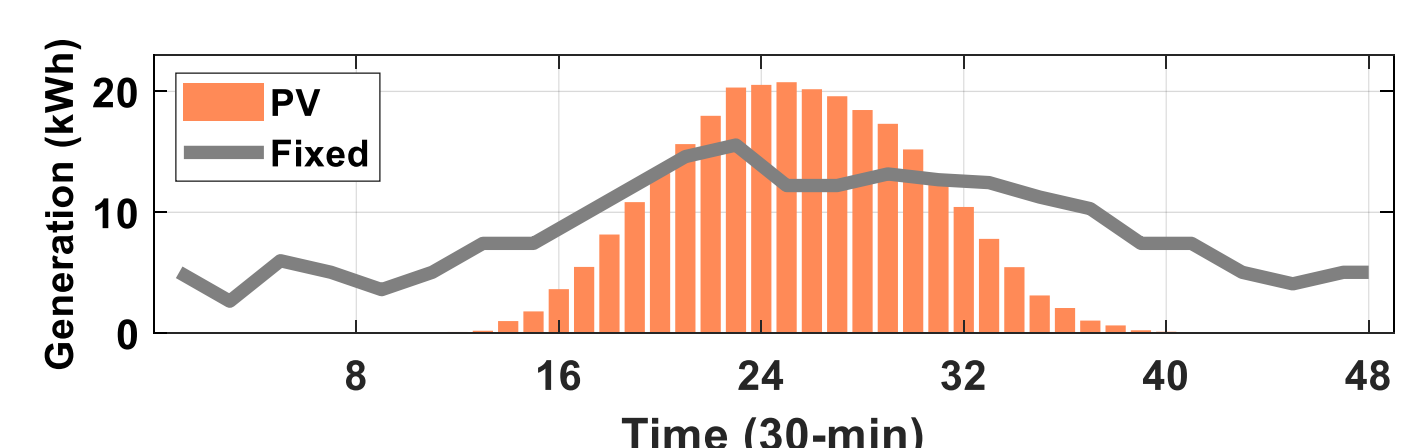
## 3. 시뮬레이션 분석

### 3-1. 시뮬레이션 가정

- 총 예측시간은 24시간이며, 단위 시간은 30분 으로 설정.
- $\pi_t^{buy}$  는 TOU Price를 적용하고,  $\pi_t^{sell}$  는  $\pi_t^{buy}$  의 2배로 설정.
- EV 고객에게 판매/구매하는 에너지량 ( $E_t^{sell}/E_t^{buy}$ ) 의 예측값은 <그래프 1-1>과 같이 설정.
- PV 발전량과 고정 (Fixed) 부하량은 <그래프 1-2>와 같이 설정.
- ESS는 해당 시간대에 충/방전 중 하나만 동작한다고 가정.
- 오차 시나리오에 대한 확률분포는 <표 4>와 같이 설정.
- MPC의 Horizon은 17,  $\bar{E}_t^{sell}/\bar{E}_t^{buy}$  에 대한 오차 시나리오 개수는 20개로 설정.



<그래프 1-1. EV 고객에게 판매/구매하는 에너지량>



<그래프 1-2. PV 발전량과 고정 부하량>

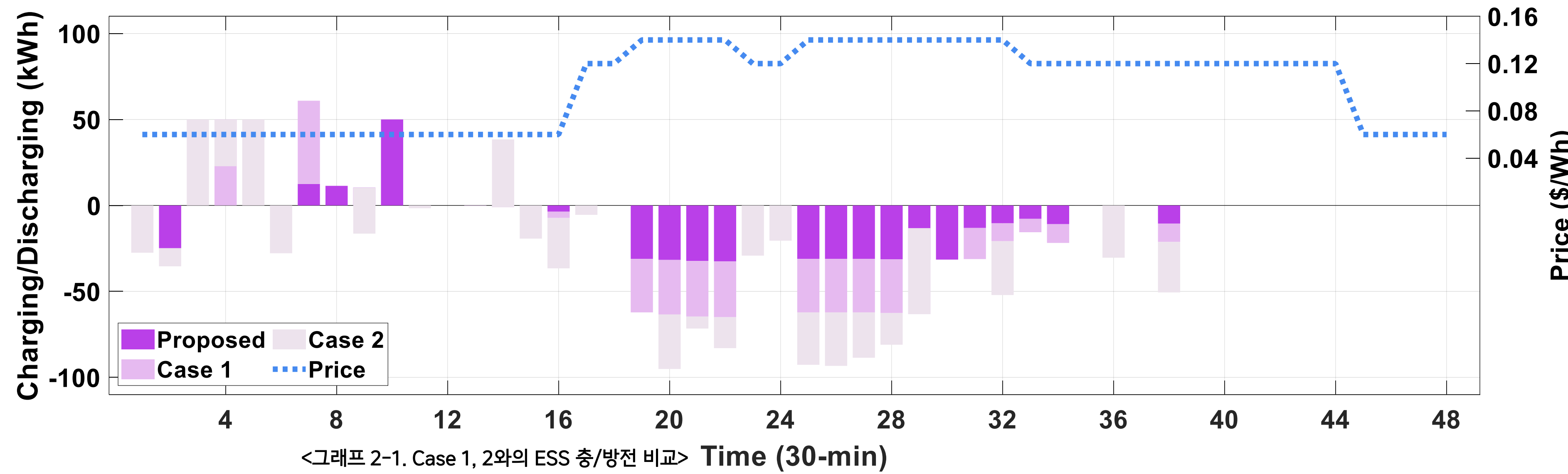
2) SOE : State-of-energy	
용량	200 kWh
최대 충/방전량	40 kWh
초기 SOE <sup>2)</sup>	85 kWh
최대/최소 SOE	190 / 20 kWh

<표 3. ESS 환경설정>

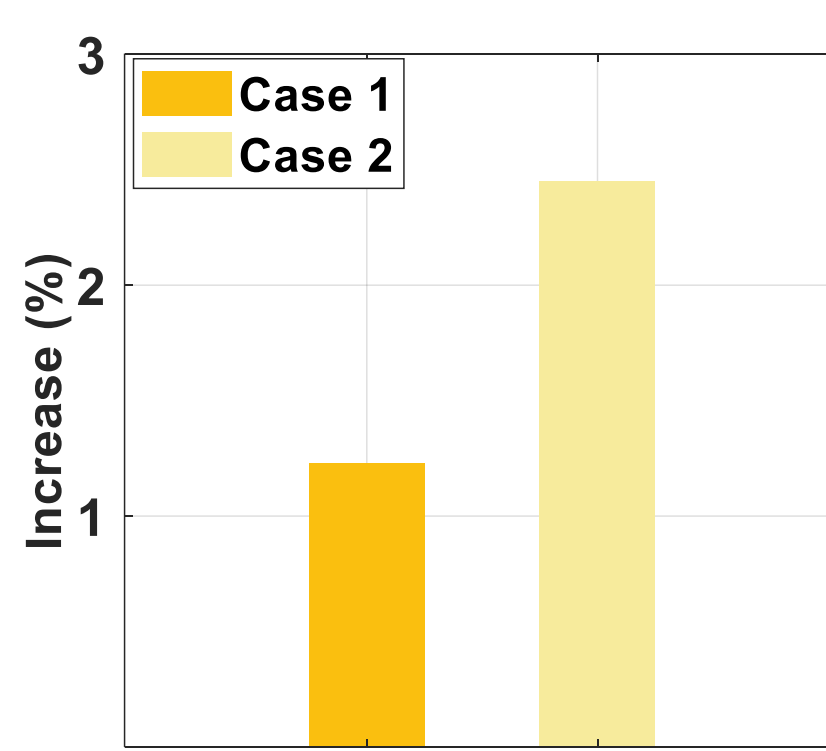
분포 종류	정규 분포
평균	데이터 예측값
분산	2 <sup>2</sup>

<표 4. 오차 시나리오에 대한 확률분포>

### 3-2. 시뮬레이션 결과 및 분석 (시뮬레이션에서 사용된 Case들은 오른쪽 <표 5>를 참고)



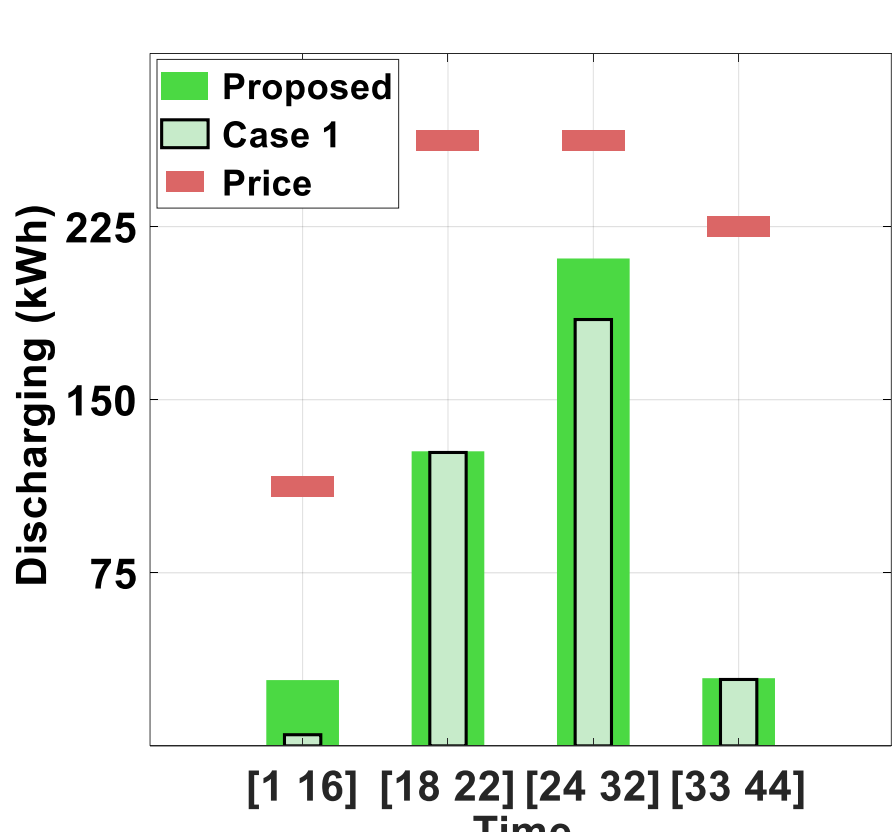
<그래프 2-1. Case 1, 2의 ESS 충/방전 비교>



<그래프 2-2. 기존 연구와의 이익 비교>

- 제안한 시스템은 불확실성을 고려한 기존 기법 (Case 1, 2) 에 비해 각각 1.2%, 2.5% 만큼의 이익이 증가한 것을 확인.

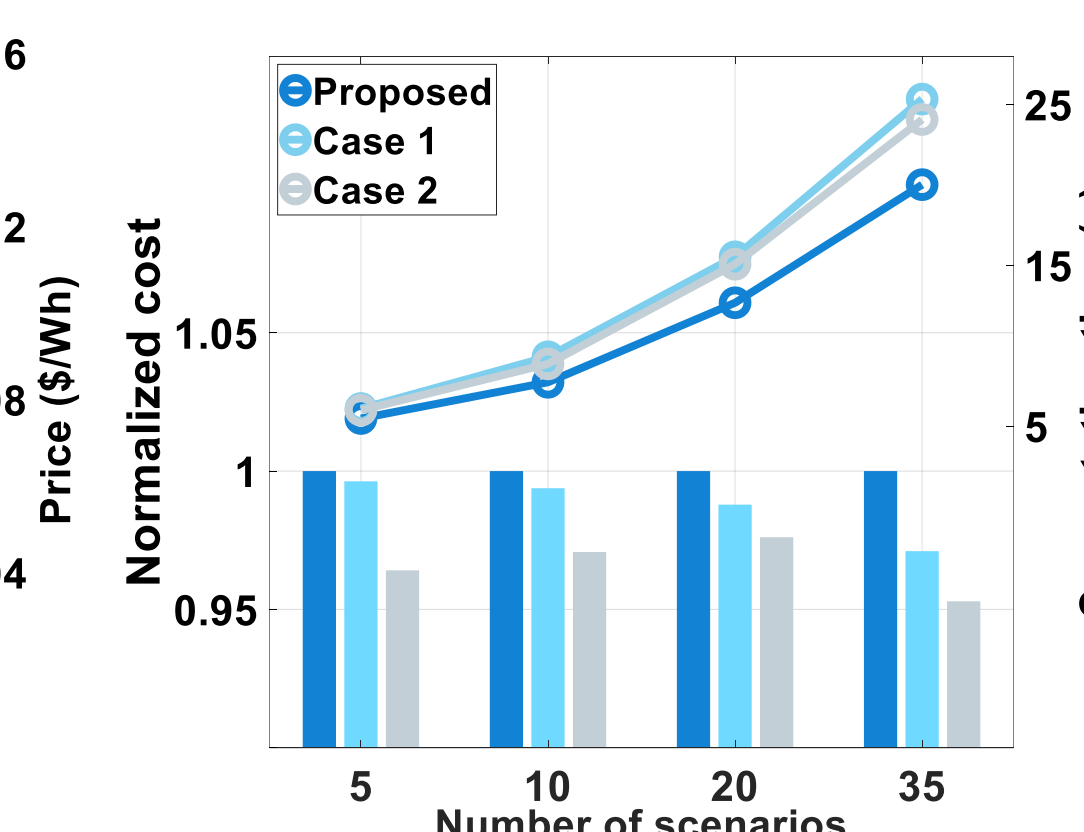
- 이는 RO에 비해 덜 보수적이며, MPC를 통해 각 Horizon별로 최적화된 에너지 운영을 통해 도출되는 것으로 확인.



<그래프 2-3. 시간대별 ESS 방전량 비교>

- 제안한 시스템에서의 ESS 총 에너지 방전량이 (MPC를 적용하지 않은) Case 1 보다 1.4% 더 많은 것을 확인.

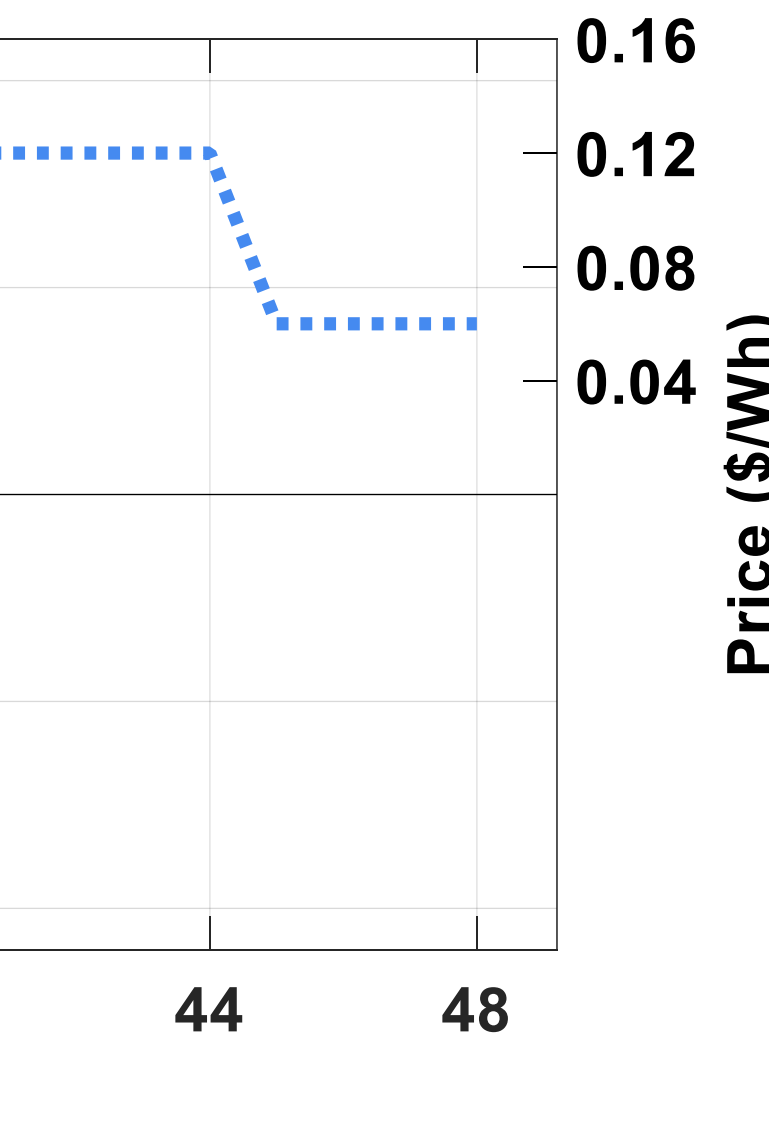
- MPC에서의 Horizon별 최적화된 에너지 운영으로 더 많은 방전량을 통해 경제적 운영을 도출.



<그래프 2-4. 시나리오 개수에 따른 성능 비교>

- 제안한 시스템은 모든 경우에서 제일 경제적인 운영을 도출하며, 이를 통해 데이터 효율적인 연산이 이루어지는 것을 확인.

- 시나리오 개수가 늘어날수록 연산시간이 증가하는 경향을 보이지만, 30분 단위의 운영임을 고려했을 경우 실제 적용에 무리 없을 것으로 판단.



<그래프 2-5. Case 3, 4의 성능 비교>

- 불확실성을 고려하지 않은 기존 기법들 (Case 3, 4) 은 제안한 시스템보다 각각 3.6%, 1.8% 더 경제적인 에너지 운영을 도출.

- Case 3, 4의 이상적인 에너지 환경을 고려하였을때, 제안한 시스템이 실제 환경에 더욱 실용적일 것으로 판단.

Case	최적화 기법 (불확실성 고려)	MPC
Proposed <sup>3)</sup>	DRO (O)	O
Case 1	DRO (O)	X
Case 2	RO <sup>4)</sup> (O)	X
Case 3	DO <sup>5)</sup> (X)	O
Case 4	DO (X)	X

<표 5. Case study 분류>

- Proposed : 제안한 DRMPC 기반의 충전소 에너지 관리 시스템.
- Robust optimization (RO) : 불확실한 환경에서 최악의 시나리오를 고려하여 솔루션을 도출하는 최적화 기법.
- Deterministic optimization (DO) : 불확실성은 고려하지 않으며, 예측된 값이 참값이라 가정하여 솔루션을 도출하는 최적화 기법.

### 3-3. 최종분석

- 제안한 DRMPC 기반의 충전소 운영 시스템은 불확실성을 고려한 경제적인 에너지 운영 솔루션을 도출하는 것을 확인.
- Case 분석을 통해 기존의 기법들보다 더 경제적인 충전소를 운영하고, ESS 에너지를 더욱 효율적으로 사용하는 것을 확인.
- 기존의 기법들에 비해 더 절감된 시간 동안 데이터 효율적인 연산을 통해 우수한 솔루션을 도출하는 것을 확인.
- 이상적인 환경에서의 솔루션과 적은 차이를 보임으로서, 실제 환경에서 우수한 성능을 도출할 것으로 예상.

## 4. 결론

### 4-1. 요약

- 전기차 고객의 불확실한 에너지 운영 환경을 고려한 경제적인 스마트 전기차 충전소 에너지 관리 시스템을 제안.
- 기존의 시스템들보다 적은 데이터의 환경에서도 수익성이 더 좋은 결과를 도출하였으며, 결합된 신재생 에너지 시스템에 대한 효율적인 에너지 운영도 도출.

### 4-2. 기대효과 및 미래연구

- 미래 에너지 사회에서 데이터 기반 (Data-driven) 의 실시간 전기차 고객들의 에너지 행동 패턴을 고려하여 경제적인 전기차 충전소 운영에 대한 기대.
- 전기차 충전소 에너지 환경요소들을 예측할 수 있는 머신러닝 기반의 지능형 모델을 결합하여 미래 에너지 환경에 대한 예측 및 대응 알고리즘을 구현할 계획.
- 전압, 주파수를 비롯한 실제 전력망 환경요소를 고려한 충전소 운영 알고리즘을 구현할 계획.

## 참고 문헌

- N. A. El-Taweel, et al., "Optimization model for EV charging stations with PV farm transactive energy", IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 18, no. 7, pp. 4608-4621, 2021.
- P. Mohajerin Esfahani and D. Kuhn, "Data-driven distributionally robust optimization using Wasserstein metric: Performance guarantees and tractable reformulations", Mathematical Programming, vol. 171, pp. 115-166, 2018.
- R. Gao and A. Kleywegt, "Distributionally robust stochastic optimization with Wasserstein distance", Mathematics of Operations Research, 2022.