

# 연구노트

2025. 03

장서현<sup>1</sup>

<sup>1</sup>**SY**stems **M**odeling and **P**rogramming Lab at Yonsei University (**SYMPLY**)  
연세대학교 산업공학과  
(<https://symply.yonsei.ac.kr/>)



**SYSTEMS MODELING AND PROGRAMMING LAB**  
**DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING, YONSEI UNIVERSITY**

Background

## Distributed Energy Resources (DER)

분산에너지원: 에너지를 사용하는 공간 · 지역 또는 인근지역에서 공급하거나 생산하는 에너지로, 일정 규모 이하의 소규모 에너지<sup>1</sup>

- 태양광(PV) 및 풍력 터빈(WT) 발전 장치, 에너지 저장 시스템(ESS), 전기 자동차(EV) 충전기, 마이크로그리드 등을 포함
- 소규모 발전의 형태에 적합한 탄소중립적인 에너지를 중심으로 생산
- DER 사업자의 종류
  - Generators: 에너지 생산 → 모든 발전량 판매/저장
  - Prosumers: 에너지 생산 → 직접 소비 → surplus 에너지 판매
  - Prosumagers: 에너지 생산 → 직접 소비 → surplus 에너지 판매/저장

⇒ 불안정한 대규모 중앙집중식 송전 및 발전에서 벗어나, 수요지 인근에서 환경친화적이고 독립적인 에너지의 생산과 소비 가능

# Wholesale Electricity Market

## Day-ahead Commitment Market

- 하루 전에 예측된 수요와 공급 기반으로 다음날 시간별 가격이 결정됨
- 공시된 가격에 따라 일정량의 전력 공급/소비를 하루 전에 **commit**
- 계약 불이행 시 페널티 발생

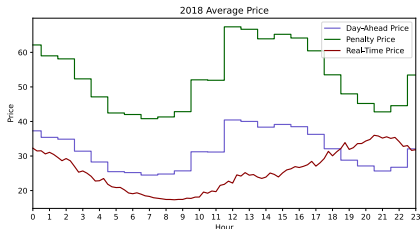


Figure 1: Annual Average Electricity Price<sup>2</sup>

## Real-time Balancing Market

- 실시간 수요와 공급 차이를 조정하는 시장
- 5분에서 20분 간격으로 실시간 가격 책정 및 수급 조정
- Day-ahead 시장가보다 평균적으로 낮으며, 가격 변동성이 큼

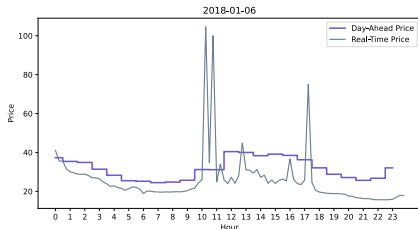


Figure 2: Variability in Real-Time Price<sup>2</sup>

## Challenges of DER Market Participation

---

- DER 사업자는 **price-taker**로 참여함
  - 생산 능력이 제한적이므로 시장 가격에 영향을 미치기 어려움
  - ↔ 전통적 대규모 발전소는 price-setter로서, 규모의 경제를 활용한 전략적 입찰을 통해 시장 경쟁력을 가짐
- DER 재생에너지 발전량의 **불확실성**으로 인해, 안정적인 day-ahead commitment를 하기 어려움
  - DER의 출력은 non-dispatchable하기 때문에 미충족 페널티가 부과될 위험이 높음
  - ↔ 전통적 대규모 발전소의 출력은 dispatchable하기 때문에 전략적 입찰이 가능하며, 페널티 위험을 최소화할 수 있음

# Aggregation of DERs

## Aggregation이란

- 여러 개별 DER들을 단일 포트폴리오로 통합하는 과정으로, 가상 발전소(VPP), 에너지 관리 시스템(EMS) 등을 통해 구현됨
- 개별 DER의 용량과 자원을 통합하여, 보다 효율적이고 최적화된 에너지 관리를 목표로 함
- Aggregation의 주체는 **Aggregator**로 불리며, 개별 DER 사업자들 사이 그리고 DER 사업자들과 전력 시장 사이의 중개자 역할을 함

## Aggregator의 역할

1. 개별 DER 사업자가 전력망 거래에 참여할 수 있도록 필요한 인프라를 제공하여 시장 진입 장벽을 낮추고, 잉여 에너지 판매를 통해 개별적 수익을 창출 할 수 있도록 지원함
2. 개별 DER들을 **통합(aggregate/pool)**하여 발전량의 불확실성으로 인한 개별 페널티 리스크를 완화하고, 하나의 개체로서 최적화된 day-ahead commitment와 real-time trading을 수행함

# Research Objectives

## Part 1: Evaluation of Aggregation Effectiveness

기존 관련 연구들은 Aggregator의 역할이나 Aggregation을 가정으로 포함하여 최적화 진행  
⇒ 이러한 가정의 실효성을 검토하기 위해, Aggregation의 경제적 가치를 분석하고자 함

Table 1: Summary of Related Literatures

Reference	Objective	Method	Data	Optimization Goal	Renewable Type	DER Owners
Beraldi et al. <sup>3</sup>	Resource Management	Stochastic Programming	Real-world	Min Risk	combined	generators
Sarfarazi et al. <sup>4</sup>	Real-time Pricing	Bi-level Optimization	Simulated	Max Net Profit	combined	prosumagers
Rashidzadeh et al. <sup>5</sup>	Bidding Strategies	Bi-level Optimization	Real-world	Max Profit	EV	-
Dabbagh et al. <sup>6</sup>	Profit Allocation	Cooperative Game Theory	Real-world	Min Risk	-	prosumers
Liu et al. <sup>7</sup>	Billing Mechanism	Stackelberg Game	Simulated	Max Profit	PV	prosumers

## Part 2: Settlement of Aggregated DERs

Aggregation의 현실적인 실현을 위해 필요한 settlement 과정을 수리 모델에 반영하여 개별 DER들의 시장 참여를 최적화하고자 함

## Problem Assumptions

---

### 외부 요인 통제

- 시장 접근 비용 및 인프라 구축 비용은 분석에서 제외
- 거래되는 에너지 양과 관계없이 시장에서 균등한 가격 경쟁력을 가진다고 가정

### DER 운영 및 시장 참여의 메커니즘 관련

- DER 사업자들은 모두 **generator**이며, **저장능력(storage)**이 없다고 가정
- 자신의 발전량은 전력시장에서 ① 직접 거래하거나 ② aggregator를 통해서 거래할 수 있으며, 모델에 따라 둘 중 하나만 가능하다고 가정
- 자신의 발전량은 하루 전 계약한 day-ahead commitment 충족을 위해 우선적으로 사용
- 발전량이 day-ahead commitment 양을 초과하면, **surplus**(잉여에너지)로 간주
  - real-time market에 실시간 시장가로 판매하게 됨
- 발전량이 day-ahead commitment 양에 미치지 못하면, **shortage**(전력 부족)로 간주
  - 미충족된 양만큼 페널티가 부과됨



# Model-Specific Assumptions

## Model 1. Individual DER Participation

- DER 사업자는 개별적으로 직접 시장에 참여
- 모든 수익과 페널티는 DER 소유자가 직접 부담

## Model 2. Aggregated DER Participation

- DER 사업자는 한 명의 aggregator를 통해 간접적으로 시장에 참여
- Aggregator는 개별 DER들의 집합적 운영을 최적화하는 역할을 수행하며, 중립적인 중개자로 별도의 자체적인 수익 창출을 목표로 하지 않는다는 가정
- 모든 수익과 페널티는 aggregated level에서 평가되며, 개별 DER 소유자에게 분배됨

두 모델의 비교를 통해

- Aggregation이 day-ahead commitment 양 및 net profit에 미치는 영향 분석
- Aggregation 참여가 개별 DER 사업자에게 실질적인 경제적 이익을 제공하는지 평가

# Nomenclature

---

## Sets and Indices

- $I$ : Set of individual DER owners  $i \in I = \{1, 2, \dots, N^I\}$
- $T$ : Set of elementary time periods (hours)  $t \in T = \{1, 2, \dots, N^T\}$
- $S$ : Set of scenarios used to represent the evolution of uncertain parameters  
 $s \in S = \{1, 2, \dots, N^S\}$

## Deterministic Parameters

- $P_t^{DA}$ : Day-ahead market price for hour  $t$
- $P_t^{PN}$ : Commitment shortage penalty price for hour  $t$

## Stochastic Parameters

- $P_t^{RT}(\xi)$ : Real-time market price for hour  $t$
- $R_{it}(\xi)$ : Amount of generated energy by individual  $i$  for hour  $t$
- $\xi_s$ : Realization of uncertain parameters under scenario  $s$
- $\pi_s$ : Probability of occurrence of scenario  $s$

## Two-stage Stochastic Optimization

**Sampling-based approach**를 활용하여 실시간 시장 가격이나 발전량의 불확실성 고려  
→ 각 시나리오들은 historical data를 바탕으로 구성되며, second-stage decision variable들과 stochastic parameter들은 scenario-dependent하게  $\xi_s$ 로 재정의됨

### Framework

#### (1) First-Stage Decision

- 불확실성이 실현되기 이전
- Day-ahead commitment 양 ( $x_{it}^{DA}, \alpha_t^{DA}$ ) 결정

#### (2) Second-Stage Decisions

- 불확실성이 실현된 이후
- 잉여에너지량( $y_{it}^+(\xi), \beta_t^+(\xi)$ ), 전력부족량( $y_{it}^-(\xi), \beta_t^-(\xi)$ ) 결정

## Individual DER Participation (1/2)

---

개별 DER 사업자의 입장에서 자신의 DER 운영을 최적화함으로써 자신의 수익 최대화를 목표로 함

### Decision Variables

- $x_{it}^{DA}$ : Amount of day-ahead commitment of individual  $i$  to aggregator for hour  $t$
- $y_{it}^+(\xi)$ : Surplus energy of individual  $i$  for hour  $t$ , relative to the amount of day-ahead commitment
- $y_{it}^-(\xi)$ : Shortage energy of individual  $i$  for hour  $t$ , relative to the amount of day-ahead commitment
- $z_{it}(\xi)$ : Binary variable that ensures either  $y_{it}^+(\xi)$  or  $y_{it}^-(\xi)$  can take a nonzero value, but not both, for each individual  $i$  and hour  $t$

**Objective Function:** Maximize individual profit (1a)

- Profit = Day-ahead Commitment Revenue  $\left( \sum_{t \in T} P_t^{DA} x_{it}^{DA} \right)$   
+ Real-time Trading Revenue  $\left( \sum_{t \in T} P_t^{RT}(\xi) y_{it}^+(\xi) \right)$   
- Commitment Breach Cost  $\left( \sum_{t \in T} P_t^{PN} y_{it}^-(\xi) \right)$

## Individual DER Participation (2/2)

$$\max \sum_{t \in T} \left( P_t^{DA} x_{it}^{DA} \right) + \sum_{s \in S} \pi_s \sum_{t \in T} \left( P_t^{RT}(\xi_s) y_{it}^+(\xi_s) - P_t^{PN} y_{it}^-(\xi_s) \right) \quad \forall i \in I \quad (1a)$$

$$\text{s.t. } R_{it}(\xi_s) - x_{it}^{DA} = y_{it}^+(\xi_s) - y_{it}^-(\xi_s) \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (1b)$$

$$R_{it}(\xi_s) \geq y_{it}^+(\xi_s) \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (1c)$$

$$y_{it}^+(\xi_s) \leq M z_{it}(\xi_s) \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (1d)$$

$$y_{it}^-(\xi_s) \leq M(1 - z_{it}(\xi_s)) \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (1e)$$

$$x_{it}^{DA} \geq 0, y_{it}^+(\xi_s) \geq 0, y_{it}^-(\xi_s) \geq 0, z_{it}(\xi_s) \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T, \forall s \in S. \quad (1f)$$

### Constraints

(1b) 자신의 발전량과 commitment 양에 따라 surplus/shortage energy 양이 결정됨

(1c) 자신이 real-time market에 판매할 양은 자신의 발전량보다 작아야함

(1d)(1e)  $y^+$  와  $y^-$  는 동시에 발생할 수 없음

## Aggregated DER Participation (1/2)

---

Aggregator의 입장에서 하나로 통합된 DER 포토폴리오 운영을 최적화함으로써 통합 수익 최대화를 목표로 함

### Decision Variables

- $\alpha_t^{DA}$ : Amount of day-ahead commitment of aggregator for hour  $t$
- $\beta_t^+(\xi)$ : Surplus energy of aggregator for hour  $t$ , relative to the amount of day-ahead commitment
- $\beta_t^-(\xi)$ : Shortage energy of aggregator for hour  $t$ , relative to the amount of day-ahead commitment
- $z_t(\xi)$ : Binary variable that ensures either  $\beta_t^+(\xi)$  or  $\beta_t^-(\xi)$  can take a nonzero value, but not both, for each hour  $t$

**Objective Function:** Maximize aggregated profit (2a)

- Profit = Day-ahead Commitment Revenue  $\left( \sum_{t \in T} P_t^{DA} \alpha_t^{DA} \right)$   
+ Real-time Trading Revenue  $\left( \sum_{t \in T} P_t^{RT}(\xi) \beta_t^+(\xi) \right)$   
- Commitment Breach Cost  $\left( \sum_{t \in T} P_t^{PN} \beta_t^+(\xi) \right)$

## Aggregated DER Participation (2/2)

$$\max \sum_{t \in T} \left( P_t^{DA} \alpha_t^{DA} \right) + \sum_{s \in S} \pi_s \sum_{t \in T} \left( P_t^{RT}(\xi_s) \beta_t^+(\xi_s) - P_t^{PN} \beta_t^-(\xi_s) \right) \quad (2a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in I} R_{it}(\xi_s) - \alpha_t^{DA} = \beta_t^+(\xi_s) - \beta_t^-(\xi_s) \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2b)$$

$$\sum_{i \in I} R_{it}(\xi_s) \geq \beta_t^+(\xi_s) \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2c)$$

$$\beta_t^+(\xi_s) \leq M z_t(\xi_s) \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2d)$$

$$\beta_t^-(\xi_s) \leq M(1 - z_t(\xi_s)) \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2e)$$

$$\alpha_t^{DA} \geq 0, \beta_t^+(\xi_s) \geq 0, \beta_t^-(\xi_s) \geq 0, z_t(\xi_s) \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T, \forall s \in S. \quad (2f)$$

### Constraints

(2b) Aggregation 참여자들의 발전량의 합과 aggregated commitment 양에 따라 aggregated surplus/shortage energy 양이 결정됨

(2c) Aggregator가 real-time market에 판매할 양은 aggregation 참여자들의 발전량 합보다 작아야함

(2d)(2e)  $\beta^+$  와  $\beta^-$  는 동시에 발생할 수 없음

# Model Comparison

## Objective Function

$$\max \sum_{t \in T} \left( P_t^{DA} x_{it}^{DA} \right) + \sum_{s \in S} \pi_s \sum_{t \in T} \left( P_t^{RT}(\xi_s) y_{it}^+(\xi_s) - P_t^{PN} y_{it}^-(\xi_s) \right) \quad \forall i \in I$$

$$\max \sum_{t \in T} P_t^{DA} \alpha_t^{DA} + \sum_{s \in S} \pi_s \sum_{t \in T} \left( P_t^{RT}(\xi_s) \beta_t^+(\xi_s) - P_t^{PN} \beta_t^-(\xi_s) \right)$$

## Surplus/Shortage 결정 제약

$$R_{it}(\xi_s) - x_{it}^{DA} = y_{it}^+(\xi_s) - y_{it}^-(\xi_s)$$

$$\sum_{i \in I} R_{it}(\xi_s) - \alpha_t^{DA} = \beta_t^+(\xi_s) - \beta_t^-(\xi_s)$$

## Real-time Market Participation 제약

$$R_{it}(\xi_s) \geq y_{it}^+(\xi_s)$$

$$\sum_{i \in I} R_{it}(\xi_s) \geq \beta_t^+(\xi_s)$$

## Surplus/Shortage 동시 발생 제약

$$\begin{aligned} y_{it}^+(\xi_s) &\leq M z_{it}(\xi_s) \\ y_{it}^-(\xi_s) &\leq M(1 - z_{it}(\xi_s)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_t^+(\xi_s) &\leq M z_t(\xi_s) \\ \beta_t^-(\xi_s) &\leq M(1 - z_t(\xi_s)) \end{aligned}$$



# Data Settings

## Pecan Street Dataport<sup>2</sup> 기반으로 가공

- 15분 간격의 실시간 가격 데이터
  - 제공된 데이터를 4개씩 평균 내어, 하루치 시간별 real-time price을 구성
  - 1년치 데이터에서 같은 시간대의 가격을 평균 내어, 시간별 day-ahead price 구성
  - Penalty price는 day-ahead price의 1.75배 가격으로 설정
- 총 19가구의 태양광 발전량 데이터
  - 각 DER 소유자의 발전량은 15분 간격의 발전량 데이터를 시간별로 합산한 후, 발전량의 변동성을 표현하기 위해 랜덤 스케일링을 적용함

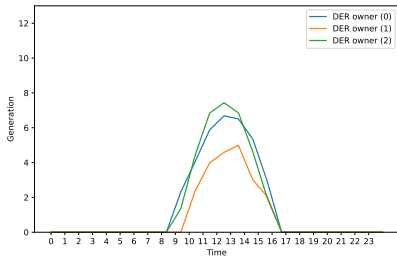


Figure 3: Original Generation Data

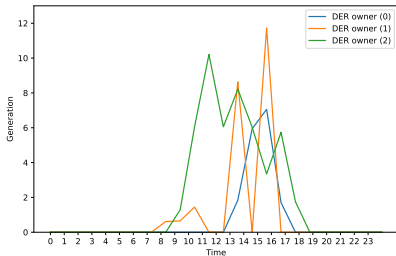


Figure 4: Randomly Scaled Generation Data

# Design of Experiment

---

- 총 19명의 DER 소유주( $I$ )가 aggregation에 참여한다고 가정
- 하루 동안의 최적화 진행하여, time period( $T$ )는 24로 설정
- 시나리오 수( $S$ )는 30개로, 한달치 데이터 사용

## 실험1. Amount of Day-Ahead Commitment

- 각 모델의 시간대별 commitment 양을 비교하고자 함

## 실험2. Profit Components

- 각 모델의 daily profit을 day-ahead revenue, real-time revenue, penalty cost로 나누어 비교하고자 함

## 실험3. Aggregation Robustness

- Aggregation 참여자 수에 따른 Aggregation의 효과 검증을 위해, commitment 양과 profit의 증가율을 비교하고자 함

# Experimental Results (1/2)

## 1. Amount of Day-Ahead Commitment

- Aggregated 모델이 Individual 모델에 비해 commitment 양이 많음
  - 높은 페널티 리스크의 영향

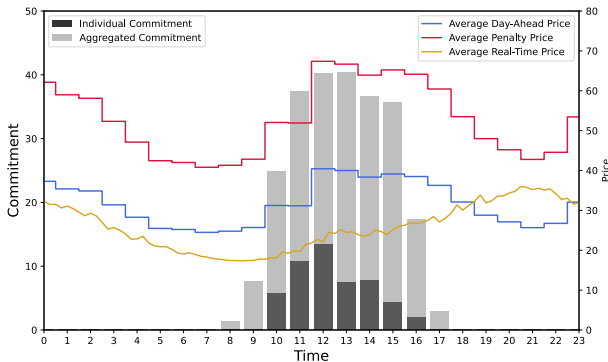


Figure 5: Difference in Hourly Day-Ahead Commitment

## Experimental Results (2/2)

### 2. Profit Components

- Aggregated market participation의 경우, total profit이 더 높음
  - Day-ahead commitment revenue의 영향
  - 평균적으로 높은 가격에 더욱 안정적인 DER 포토폴리오 운영 가능

Table 2: Comparison of Profit Components

	Individual DER Participation	Aggregated DER Participation
Total Profit (\$)	12701.00	<b>14267.92</b>
Day-Ahead Revenue (\$)	4654.90	<b>13033.13</b>
Real-Time Revenue (\$)	<b>9049.06</b>	1943.44
Penalty Cost (\$)	1002.96	<b>708.66</b>

### 3. Aggregation Robustness

- 발전량 패턴이 다양한 참여자가 많을수록 aggregation의 효과가 높아짐
  - Pooling flexibility의 영향

Table 3: Daily Commitment Comparison

Number of Participants	5	10	15
Individual DER Participation (kWh)	21.10	34.39	39.84
Aggregated DER Participation (kWh)	100.64	237.55	332.82
Commitment Differences (%)	<b>376.97</b>	<b>590.75</b>	<b>735.39</b>

Table 4: Daily Profit Comparison

Number of Participants	5	10	15
Individual DER Participation (\$)	4531.18	8508.44	10986.16
Aggregated DER Participation (\$)	4885.48	9422.01	12334.39
Profit Differences (%)	<b>7.81</b>	<b>10.74</b>	<b>12.27</b>

# Conclusion

## Pooling Mechanism

참여자들은 Pooling을 통해 서로의 surplus와 shortage를 상쇄함  $\Rightarrow$  페널티 리스크 감소

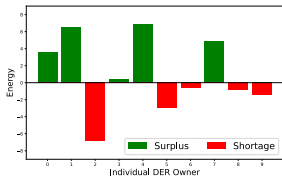


Figure 6: Pre-Pooling

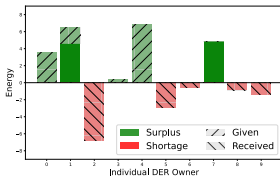


Figure 7: Pooling Process

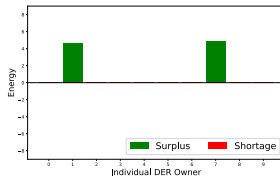


Figure 8: Post-Pooling

## Part 1: Conclusion

- Aggregated 모델이 Individual 모델보다 commitment 양 및 수익 측면에서 모두 효과적임
- Aggregation 참여자들 간의 pooling으로 인해, 상대적으로 안정적이고 효율적인 시장 참여가 가능하게 됨