

# 게임 이론에 기반한 가정용 수요 반응 가격 결정 방법론

고갑석  
강원대학교

## 요 약

본고에서는 애그리게이터가 가정용 전력 부하를 대상으로 수요 반응 서비스를 제공하는 것을 고려한다. 가정용 수요 반응은 하루 전날 다음날 에너지 가격 정보를 전달하고 고객들로부터 다음날 에너지 스케줄을 수집하는 방식을 채택한다. 고객들은 수요 반응으로 인해 생기는 불만족도를 고려하여 불만족도 최소화를 수행한다. One-shot 방식은 rebound 현상이 발생할 수 있어 이를 회피하기 위해 에너지 가격이 에너지 사용량에 따라 변하는 조율 방식을 채택한다. 제안 방식 적용시 에너지 가격의 평형점 존재 여부를 게임이론을 사용하여 분석한다.

## I. 서 론

신재생 에너지 보급률이 증가로 수요 반응에 대한 관심 많아지고 있다. 수요 반응은 산업용, 상업용, 가정용으로 나뉘고, 산업용 부하를 대상으로 하는 수요 반응 서비스가 제공되고 있다. 우리는 가정용 수요 반응을 고려한다.

가정용 부하를 대상으로 수요 반응 서비스를 제공하기 위해 애그리게이터가 하루 전 시간대별 에너지 가격을 고지하는 하루 전 에너지 가격제를 고려한다. 하루 전 에너지 가격제는 가격이 썩 시각에 부하가 몰리는 현상이 발생한다[1, 2]. 이를 해결하는 하나의 방법으로는 조율이 있다[3]. 우리는 애그리게이터가 직접 조율(부하에 대한 개인정보 필요)하는 대신에 하루 전 에너지 가격을 통해서 분산형 조율 방식[3]을 고려한다. 여기서 구체적인 조율 방법은 하루 전 에너지 가격이 에너지 요구량에 비례하여 결정되고, 하루 전 에너지 가격을 반복적으로 전달하면서 에너지 스케줄 정보를 수집하여 에너지 가격을 갱신하는 것이다. 이러한 분산형 조율 방식을 적용할 때 문제는 에너지 가격 수렴성이다. 우리는 게임 이론을 사용하여 에너지 가격 평형점이 존재하는지를 분석한다.

우리가 이전 연구[4]에서 제시한 가정용 수요 반응에 따른 고객의 불만족도를 기반으로 하여 각

고객들은 불만족도를 최소화하면서 에너지 가격 평형점에 도달할 수 있는지를 분석한다.

## II. 시스템 모델

가정용 수요 반응 서비스를 제공하는 애그리게이터와 서비스에 참여하는 가정용 에너지 소비자를 고려한다.

먼저, 애그리게이터는 다음과 같이 동작한다: 1) 하루 전날 고객들에게 에너지 가격을 전달, 2) 고객들로부터 에너지 스케줄 정보 수집. 에너지 가격 결정은 에너지 요구량에 기반한 다음 식 (1)과 같이 계산된다.

$$P^{DA}(h) = a^{DA}(h)E_{all}^{DA}(h) + b^{DA}(h), \quad (1)$$

$$\forall h \in \{0, \dots, H-1\},$$

여기서  $P^{DA}(h)$ 는 시간 슬롯  $h$ 에서 하루 전 에너지 가격을 나타내고,  $E_{all}^{DA}(h)$ 는 고객들로부터 수집한 슬롯  $h$ 에서 총 에너지 요구량을 나타낸다.  $a^{DA}(h)$ 와  $b^{DA}(h)$ 는 시간 슬롯  $h$ 에서 에너지 가격과 관련된 상수들이다.  $H$ 는 하루를 일정 시간 간격으로 나뉘었을 때 전체 슬롯 수를 나타낸다.

가정용 에너지 고객은 집합  $I = \{1, 2, \dots, I\}$ 로 나타낸다. 가정용 고객은 애그리게이터로부터 에너지를 구매하여 사용하고 수요 반응 참여를 위한 유연 자원을 가지고 있다고 가정한다. 가정용 유연 자원으로는 Heating, Ventilation, and air conditioning(HVAC)와 전기차를 고려한다.

HVAC를 다음과 같이 모델링 한다.

$$T_i^{in}(h) = T_i^{in}(h-1) + \delta_i(T_i^{out}(h) - T_i^{out}(h-1)) - \eta_i P_i^{HVAC}(h)\Delta h, \forall h \in \{0, \dots, H-1\} \quad (2)$$

여기서,  $T_i^{in}(h)$ 와  $T_i^{out}(h)$ 은 각각 시간 슬롯  $h$ 에서 고객  $i$ 의 집 실내와 외부 온도를 나타낸다.  $\delta_i$ 는 고객  $i$ 의 집의 관성력,  $\eta_i$ 는 고객  $i$ 의 집의 HVAC의 효율,  $P_i^{HVAC}(h)$ 는 시간

슬롯  $h$  에 고객  $i$  의 HVAC 가 소비하는 평균 전력을 나타낸다.

전기차는 에너지 소비가 많지만 에너지 소비에 유연성이 상당히 높은 자원이다. 전기차는 사용하려고 할 때 충분한 SoC 만 유지하면 된다. 전기차 State of Charging(SoC)는 다음과 같이 모델링 한다.

$$S_i(h+1) = S_i(h) + \frac{\eta_i^{EV} P_i^{EV}(h) \Delta h}{E_i^{EV}}, \quad (3)$$

$$\forall h \in \{0, \dots, H-1\}$$

여기서,  $S_i(h)$ ,  $\eta_i^{EV}$ ,  $E_i^{EV}$  는 각각 시간 슬롯  $h$  에 고객  $i$  의 전기차 SoC, 고객  $i$  의 전기차의 충전 효율과 고객  $i$  의 전기차의 에너지 용량을 나타낸다. 우리는 전기차가 시간 슬롯  $h_{i,out}^{EV}$  와  $h_{i,in}^{EV}$  에 각각 집을 떠나고 들어온다고 가정한다.

가정용 고객은 유연 자원 에너지 사용량을 조정함으로써 발생하는 불편함을 최소화하도록 에너지 사용량을 스케줄링한다. 우리는 고객의 불편함으로 에너지 가격, 실내 온도, 전기차 SoC 를 고려하고 있다, 자세한 내용은 [4]를 참조한다. 사용자의 불편함을 아래와 같이 모델링한다.

$$U_i^M \left( \sum_{h=0}^{H-1} a_i^{DA}(h) (E_i^{DA}(h) + E_{-i}^{DA}(h)) + b_i^{DA}(h) \right) \times \\ E_i^{DA}(h) + \alpha_i^{HVAC} \sum_{h=0}^{H-1} U_i^{HVAC}(T_i^{in}(h)) \\ + \alpha_i^{EV,1} U_i^{EV,1}(S_i^o) + \alpha_i^{EV,2} U_i^{EV,2}(S_i^e) \quad (4)$$

여기서,  $E_{-i}^{DA}(h)$  는 시간 슬롯  $h$  에 고객  $i$  를 제외한 모든 고객들의 에너지 사용량 합을 나타내고,  $S_i^o$  와  $S_i^e$  는 각각 고객  $i$  의 전기차가 떠날 때와 스케줄링 끝날 때 전기차 SoC 를 나타낸다. 참고로, 스케줄링이 끝날 때 SoC 를 목적 함수에 고려하지 않으면 전기차가 집에 들어와서 스케줄링이 끝나는 시점까지 충전을 하지 않게 된다.

### III. 비협력적 게임 이론

게임이론 모델을 형식화 하면 다음과 같다.

① 플레이어: 가정용 에너지 고객  $I$

② 행동: 각 가정의 에너지 프로파일  $E_i^{DA} = (E_i^{DA}(0), \dots, E_i^{DA}(H-1))$  이다. 참고로,  $E_i^{DA}(h)$  는 시간 슬롯  $h$  에 사용하는 총 평균 전력 값에  $\Delta h$ 를 곱해 구한다.

③ 유틸리티: 각 가정용 에너지 고객이  $E_i^{DA}$ 를 소비했을 때 불만족도

우리가 고려하는 에너지 가격 모델이 모든 가정용 고객들이 제출한  $E_i^{DA}(i = 0, \dots, I)$ 에 따라 바뀐다. 따라서, 서로의 행동이 영향을 주고 받게 되기 때문에 이러한 하루 전 에너지 가격 설정 방법이 안정적으로 동작하기 위해서는 평형점 특성을 보여야 한다. 이를 분석하기 위해서 우리는 내쉬 평형점을 분석한다. 각 플레이어들의 유틸리티 함수가 convex 함수이다. Convex 유틸리티 함수를 갖는 플레이어들에 대해서 내쉬 평형점이 존재함이 알려져 있다. 따라서, 애그리게이터가 가정용 고객으로부터 에너지 사용량 정보를 받아 에너지 가격을 결정한다면 내쉬 평형점에 도달하는 점을 찾을 수 있다는 것을 알 수 있다.

내쉬 평형점에 도달하기 위한 알고리즘으로는 best response 방법을 적용하여 찾을 수 있다.

### IV. 결 론

본 논문은 가정용 수요 반응 서비스를 하루 전 에너지 가격제로 제공하는 애그리게이터의 에너지 가격 결정 방법을 분석하였다. 가정용 고객은 수요 반응 참여에 따른 불편도를 기반으로 에너지 사용량을 최적화한다. 에너지 사용량에 따른 에너지 가격을 결정하는 분산형 조율 방식을 사용할 때 에너지 가격은 내쉬 평형점이 존재하여 안정적으로 동작할 수 있음을 분석하였다.

### 참 고 문 헌 (11pt)

- [1] Cui B., Gao D.-c., Wang S., Xue X. "Effectiveness and life-cycle cost-benefit analysis of active cold storages for building demand management for smart grid applications," Appl Energy, 147 (2015), pp. 523-535
- [2] Safdarian A., Fotuhi-Firuzabad M., Lehtonen M. "Optimal residential load management in smart grids: a decentralized framework," IEEE Transactions on Smart Grid, 7 (2016), pp. 1836-1845.
- [3] Tang, R., Wang, S., Li H. "Game theory based interactive demand side management responding to dynamic pricing in price-based demand response of smart grids," Appl Energy, 150 (2019), pp. 118-130.
- [4] K. Ko, S. Cho, R. Rao, "Electric Vehicle Charging in Residential Day-ahead Real-time Pricing," IEEE VTC Fall 2018.