

## 에너지 허브 기반 프로슈머 전력 스케줄링 알고리즘

박희재\*, 위성률\*, 박래혁<sup>o</sup>

## Energy Hub Based Prosumer Electricity Scheduling Algorithm

Heejae Park\*, Seongryool Wee\*, Laihyuk Park<sup>o</sup>

## 요약

스마트 그리드 기술의 발전은 스마트 시티와 전력거래 시장 생성과 같은 전력망 패러다임의 변화를 가져오고 있다. 이러한 흐름에 따라 기존 전력 소비자들은 전력을 소비하던 소비자 역할에서 벗어나 전력을 함께 생산하고 소비하는 프로슈머(Prosumer)로 변화했다. 본 논문은 프로슈머들이 자신의 전력을 사거나 팔 수 있고, 주변 프로슈머와 교환할 수 있는 스마트 그리드 시스템에 대해서 소개한다. 스마트 그리드 시스템은 ESS (Energy Storage System) 을 활용하여 전력을 효율적으로 사용할 수 있도록 한다. 또한 지능형 에너지 스케줄링은 프로슈머의 효율적인 전기 사용을 가능하게 한다. 본 논문에서 대규모 시스템에서 전력 스케줄링 오버헤드 문제를 풀기 위한 게임 이론 기반의 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 성능을 평가한다.

키워드 : 프로슈머, 에너지 허브, 전력 스케줄링

Key Words : Prosumer, Energy Hub, Scheduling

## ABSTRACT

The development of smart grid technology has created a promising atmosphere for smart cities and energy trading markets. In particular, traditional power consumers evolve into prosumers who consume as well as produce electricity in modern power systems. This paper introduces a new smart grid system, where the prosumers can buy or sell their electricity and exchange electricity. The proposed smart grid system can lead to the efficient use of electricity through a common energy storage system. Moreover, this system induces the smart electricity usage of the prosumer according to an intelligent scheduling algorithm. This paper proposes the game-theory based scheduling algorithm to solve the overhead problem for the massive environment. The proposed algorithm is evaluated by the simulation to show the performance.

## 1. 서론

최근 산업 발전에 따른 전기 사용량의 급속한 증가와 전력 수요 예측의 불안함으로 인하여 전력 수요와 공급 사이에 불균형이 발생했다. 이러한 수요 공급의

불균형은 대규모 정전의 원인이 되었다. 이러한 문제 해결을 위하여 기존 전력망에 양방향 통신을 가능하게 하는 스마트 그리드가 등장했다<sup>[1]</sup>. 스마트 그리드는 양방향의 정보 공유를 바탕으로 전력 수요와 공급의 안정성을 보장할 수 있도록 한다. 전력 수요에 관

\* 이 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : Seoul National University of Science and Technology Department of Computer Science, prkhj98@naver.com, 학생회원

\* Seoul National University of Science and Technology Department of Computer Science, fbfbf1@seoultech.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Seoul National University of Science and Technology Department of Computer Science, lhpark@seoultech.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202108-215-C-RE, Received August 25, 2021; Revised August 31, 2021; Accepted August 31, 2021

한 정보는 공급자에게 전달되고, 이 정보에 근거하여 공급자는 실시간 가격 정책을 결정하고 알리게 된다. 즉, 전력 수요가 더 집중되면 전력 금액이 더 비싸진다. 스마트 그리드 시스템에서 재생에너지원 (RER: Renewable Energy Resource)과 ESS (Energy Storage System) 기술의 발전에 따라 전력 프로슈머 (Prosumer)의 개념이 등장했다. 최근, 많은 재생에너지 발전 예측들이 연구되었으며 스마트 그리드 수요 반응 알고리즘과 함께 융합하여 전력 사용의 효율성을 향상시킬 수 있도록 한다. 본 논문에서는 재생 에너지원 발전을 바탕으로 하는 스마트 그리드 스케줄링 연구를 소개한다.

Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 스마트 그리드 시스템을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 스마트 그리드 시스템은 하나의 ESS와 다수의 프로슈머, 그리고 하나의 에너지 허브로 구성되어 있다. 이 시스템에서 프로슈머와 ESS는 에너지 허브를 통해 연결되어있기 때문에 프로슈머와 ESS 사이에 전력이 전달될 수 있다. 각각의 프로슈머들은 재생에너지원로부터 전력을 공급받을 수 있게 된다. 이 전력은 프로슈머들에 의해 사용되거나 시스템 내의 ESS에 저장될 수 있다. 잔여 전력을 지능적으로 스케줄링 하게 될 경우 전력을 효율적으로 유도할 수 있다. 본 논문은 이를 위하여 ESS와 프로슈머의 목적함수를 소개하고, 게임이론 기반 알고리즘을 제안한다.

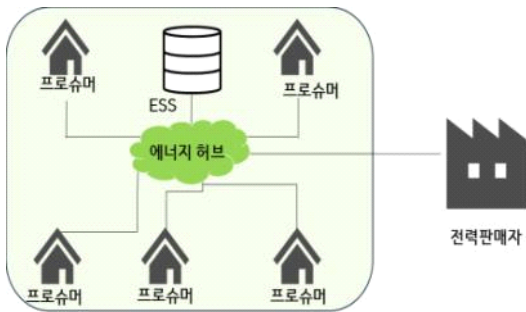


그림. 1. 제안하는 스마트 그리드 시스템.  
Fig. 1. Proposed smart grid system

## II. 관련 연구

연구<sup>12-41</sup>는 Fuzzy Logic을 이용한 에너지 가격 최적화, 전력최고치 밸런싱, 재생에너지원 관리연구를 제안했다. 연구<sup>21</sup>에서는 Fuzzy Logic의 낮은 계산 복잡성을 통하여, 가상 발전소 시스템 입찰(Bidding) 전략을 최적화하였다. 연구<sup>31</sup>에서는 배터리 충전 상태,

부하 우선순위, Time of Use pricing(TOU)와 같은 입력 파라미터 기반 Fuzzy Logic 컨트롤러 기반 충전 전략 및 온/오프 관리 결정 기법을 제안한다. 연구<sup>41</sup>에서는 소비자 피드백을 사용하는 Fuzzy Logic 기반 에너지 스케줄링을 제안했다.

연구<sup>2,5-81</sup>은 효율적인 Energy Management System (EMS)을 위해서 수요반응 에너지를 정확하게 예측하는 연구를 제안했다. 연구<sup>91</sup>는 부하 예측 모델을 선형/비선형 모델로 설계했고, 각 모델에 적절한 접근 방법을 선택했다. 또한 최근 머신러닝 기법의 발전에 따라 이를 부하 예측에 사용하는 연구가 등장했고, 특히 비선형 에너지 모델을 학습시키기 위해 신경망 (Neural Network)에 대한 연구들이 진행되었다. 연구<sup>61</sup>은 부하 예측 정확도를 위해 Feedforward Neural Network's와 Beneficial Correlated Regularization을 사용하여 학습을 진행했다. Levnberg-Marquardt (LM) 알고리즘을 통하여 예측의 정확성과 비용을 동시에 학습할 수 있도록 역전파 과정을 수행한다. 연구<sup>81</sup>은 주변 온도, TOU 가격, 최대 수요 제약 조건에 대한 함수와 신경망 기반 모델을 이용하여 부하 수요를 추정한다.

연구<sup>7,9-121</sup>은 신경망과 강화학습 (RL: Reinforcement Learning)등의 다양한 머신러닝 기법들을 수요 반응과 부하 예측에 사용한다. 연구<sup>71</sup>은 가정의 에너지 요구량을 예측하기 위해 Artificial Neural Network (ANN)를 사용했고, 가정용 에너지 관리 시스템의 최대 부하 관리 문제에 대해 다룬다. 또한, 동적, 비선형 모델링 시스템에서는 에너지 예측을 위해 Neural Network Auto Regressive External input 모델 (NNARX)과 LM 알고리즘을 사용했다. 연구<sup>101</sup>은 다수의 애그리게이터(Aggregator) 환경에서 소비자들의 전력 수요를 줄이는 쿠폰의 공정성을 보장하기 위한 방법이 제안되었고, 지역별 한계가격 수요 모델을 추정하기 위해 ANN을 사용했다. 또한 사옥의 Heating, Ventilating, and Air-Conditioning (HVAC) 시스템에 대한 최적 수요 반응을 스케줄링하기 위해서 기온과 직원의 열적 쾌적함 사이의 관계를 ANN으로 학습했다. 강화학습은 모델을 사용하지 않는 학습 기법이고 최근의 연구<sup>91, 111</sup>에서 이를 수요 반응에 대해 최적의 결정을 내리기 위한 방법으로 사용했다. 연구<sup>91</sup>는 Batch RL 기법인 Fitted Q-Iteration(FQI)를 이용하여 다음 날 하루 소비량을 계획한다. 추가로 Thermostatically Controlled Load(TCL)에 적용된 학습 에이전트를 통해 제공된 전문 지식을 이용하여 정책을 조정해나간다. 연구<sup>111</sup>은 Batch RL 기법을 CNN과 결합해 TCL의 대형 클러스터에 대한 전력비용을 절감하

는 결과를 도출해냈다.

### III. 전력 스케줄링 알고리즘

#### 3.1 가정 및 기본 모델링

본 장에서는 논문에서 제안한 스마트 그리드 시스템의 구조 및 모델링을 설명한다. 본 논문에서는 제안하는 스마트 그리드 시스템은 Fig. 1과 같이 하나의 ESS 와 다수의 프로슈머, 그리고 하나의 전력 판매자로 구성되어 있으며, 모든 구성 장비는 에너지 허브를 통해서 연결되어 있다. 이 에너지 허브를 통하여 각 구성장비는 전력 및 정보를 교환할 수 있다고 가정한다. 본 논문은 시간은 일정한 크기의 타임슬롯으로 나눌 수 있다고 가정하며  $t$  로 표시한다. 또한 타임슬롯  $t$  ESS에 저장되어 있는 전력의 충전량 비율을  $B^t$ 로 표시하며, 이 값은 0에서 100사이의 값을 갖는다고 가정한다.  $B^t$ 가 0에 가까울수록 저장된 전력량은 적고, 100에 가까울수록 가득 차 있다고 가정한다. 스마트 그리드 시스템 안에  $N$ 개의 프로슈머가 있다고 가정하고  $n$ 번째 프로슈머는  $r_n$ 이라고 한다.  $e_n^t$ 을 프로슈머  $r_n$ 이  $t$ 시간에 전송하고자 하는 전력량을 의미한다. 만약  $r_n$ 이  $t$  시간에 잉여전력이 생겨서 전력을 팔고 싶을 경우  $e_n^t$ 은 양수가 된다. 반대로  $r_n$ 이  $t$  시간에 전력소비가 많기 때문에 전력을 사고 싶을 경우  $e_n^t$ 은 음수가 된다.  $E^t$ 를  $t$ 시간에 ESS 저장된 전력 변화량이라고 모델링 할 경우 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$E^t = \sum_{n=1}^N e_n^t \quad (1)$$

여기서  $E^t$ 가 양수일 경우 ESS에 저장된 전력양이 증가하며, 반대로 음수일 경우에는 ESS에 저장된 전력량이 감소하게 된다. 식 (1)을 바탕으로 ESS의 전력량 비율인  $B^t$ 는 아래와 같이 모델링 될 수 있다.

$$B^{t+1} = B^t + \frac{100E^t}{C_{ESS}} \quad (2)$$

여기서  $C_{ESS}$ 는 ESS의 최대 저장량이다. 본 논문에서는 프로슈머  $r_n$ 은 자신이 사용할 전력 사용에 대한 다음과 같은 전력 사용 요구사항을 가지고 있다고 가정한다. 전력 사용 요구사항은, 전력 사용을 시작하는 시간  $s_n$ , 끝내는 시간  $f_n$ , 해당시간 내에 소비해야 하

는 총 전력량  $\delta_n$ 으로 구성된다. 따라서 아래와 같은 전력 요구사항에 대한 식을 유도할 수 있다.

$$\sum_{t=s_n}^{f_n} c_n^t \geq \delta_n \quad (3)$$

여기서  $c_n^t$ 는  $r_n$ 이  $t$  시간에 소모하는 전력 에너지의 양이다.

본 논문에서는 프로슈머가 전력을 공급받을 수 있는 에너지원을 1) 자신의 재생에너지, 2) ESS, 3)전력 판매업자라고 가정한다.  $t$ 시간에 자신의 재생에너지 생산량을  $g_n^t$ , 전력 판매업자로부터  $t$ 시간에 구매한 전력량을  $z_n^t$ 라고 모델링 하면 아래와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$c_n^t \leq g_n^t - e_n^t + z_n^t \quad (4)$$

#### 3.2 실시간 전력 요금 모델링

본 논문에서 제안하는 시스템은 실시간 전력 요금을 가정한다. 실시간 전력 요금은 모두 ESS에 저장되어 있는 전력에 대한 실시간 요금과 전력 판매자의 실시간 요금으로 구분할 수 있다. 먼저 ESS에 저장되어 있는 전력에 대한 실시간 요금은 다음과 같이 모델링한다. 실시간 전력 요금은 ESS 내의 전력 저장량에 따라 결정된다. 만약 ESS의 저장량이 충분할 경우 실시간 전력 요금은 저렴하고, 반대로 ESS의 저장량이 적을 경우 실시간 전력요금은 비싸지게 된다. 이를 바탕으로 ESS의 잔여 전력 저장량  $x$ 에 따른 전력 요금 함수  $P(x)$ 를 아래와 같이 계산한다.

$$P(x) = \frac{100-x}{100}(P_{\max} - P_{\min}) + P_{\min} \quad (5)$$

여기서  $P_{\max}$ 와  $P_{\min}$ 은 시스템에서 정한 최대 전력 요금과 최소 전력 요금을 말한다. ESS의 전력 변화량에 따른 실시간 전력 요금을 계산하기 위하여, 시간  $t$ 에서 전력량 변화에 따른 전력요금  $P^t$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$P^t \leq \frac{\int_{B^t}^{B^{t+1}} P(x) dx}{E^t} \quad (6)$$

위 실시간 전력 요금을 바탕으로 프로슈머  $r_n$ 에게

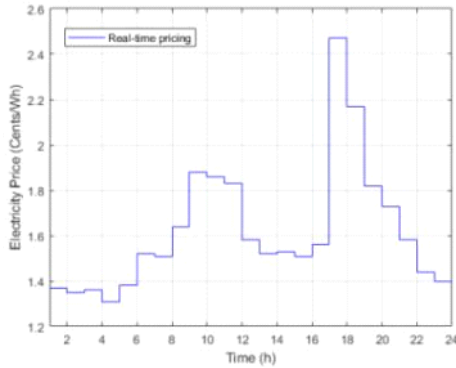


그림. 2. Illinois Power Company 의 실시간 전력 요금 (2009, 12.15)  
Fig. 2. real time pricing at Illinois Power Company (2009, 12.15)

부과되는 전력 요금  $Bill_n$ 은 아래와 같이 계산된다.

$$Bill_n = - \sum_{\forall t} P^t \cdot e_n^t \quad (7)$$

앞에서 이야기하였듯이, 본 논문에서 제안하는 시스템은 프로슈머가 주변 프로슈머뿐 아니라 전력 판매업자에서 전력을 구매할 수 있다고 가정한다. Fig.2는 미국 일리노이 전력회사의 전력 요금을 보여준다. 시간  $t$ 에 전력 판매업자의 전력 요금이  $PR^t$ 라고 가정하면, 전력 판매업자로부터 프로슈머  $r_n$ 에게 부과되는 전력 요금  $BillR_n$ 은 아래와 같이 계산된다.

$$BillR_n = - \sum_{\forall t} PR^t \cdot y_n^t \quad (8)$$

### 3.3 전력 스케줄링 알고리즘

본 논문에서 제안하는 전력 스케줄링 알고리즘은 프로슈머에게 전력 요금을 최소화 하고, ESS 저장량의 안정성을 최대화 하여 안정적이고 효율적인 스마트 그리드 시스템 구축을 목적으로 한다. 이를 위해, 본 논문에서는 ESS 운영자와 프로슈머들이 전력사용 및 실시간 요금에 대한 전략 교환을 통하여 최적의 스케줄링 결과를 얻을 수 있는 게임이론 기반의 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제안하는 게임이론 기반 알고리즘은 프로슈머들의 전략을 ESS 운영자에게 전달하고, ESS는 프로슈머들의 전략을 바탕으로 자신의 전략을 수립한다. ESS는 운영자는 자신의 전략을 모든 프로슈머들에게 전달한다. 이러한 전략교환은 전략 값이 수립될 때까지 반복한다. 알고리즘 설명을 위해 타임슬롯의 길이는 1시간이며, 각 프로슈머가 앞으로

24시간의 전력 스케줄링을 수행한다고 가정한다. 모든 프로슈머는 현재 시간  $t$ 부터  $t+24$ 까지의 전력 스케줄링 결과  $\xi_n$ 을 ESS 운영자에게 전달한다.

$$\xi_n = [e_n^t, e_n^{t+1}, e_n^{t+2}, \dots, e_n^{t+24}] \quad (9)$$

ESS 운영자는 모든 프로슈머로부터 수집된  $\xi_n$ 를 바탕으로 앞으로 24시간 동안 매 타임슬롯의 ESS 총 전량을 계산할 수 있다. 이를 바탕으로 현재 시간  $t$ 부터  $t+24$ 까지의 실시간 전력 요금  $\rho$ 를 모든 프로슈머에게 전달해준다.

$$\rho = [P^t, P^{t+1}, P^{t+2}, \dots, P^{t+24}] \quad (10)$$

프로슈머는 실시간 전력 요금  $\rho$ 를 바탕으로 다시 전력 스케줄링을 수행하며 결과  $\xi_n$ 을 ESS 운영자에게 전달한다. 위 과정은 값이 수립될 때까지 반복한다.

#### 3.3.1 프로슈머의 전략

본 논문에서 프로슈머는 자신의 전력 소모 요구사항 내에서 가장 적은 금액으로 전력 스케줄링을 수행하려고 한다. 본 논문에서 프로슈머의 재생에너지를 통한 전력 생산량은 예측이 가능하다고 가정한다. 타임슬롯  $t$ 에 프로슈머  $r_n$ 에서 생성된 재생에너지의 예측량이  $\hat{g}_n^t$ 라고 가정하면 기존 수식 (4)을 아래와 같이 수정가능하다.

$$c_n^t \leq \hat{g}_n^t - e_n^t + z_n^t \quad (11)$$

지금까지 정의한 모델링을 바탕으로, 아래와 같은 프로슈머 전력 요금에 대한 목적함수를 설계할 수 있다.

$$\text{maximize}_{e_n^t, z_n^t} \sum_{\tau=t}^{t+23} (\hat{P}^\tau \cdot e_n^\tau - PR^\tau \cdot z_n^\tau) \quad (12)$$

subject to

$$\sum_{t=s_n}^{f_n} c_n^t \geq \delta_n$$

$$c_n^t \leq \hat{g}_n^t - e_n^t + z_n^t$$

여기서  $\hat{P}^t$ 는 ESS 운영자로부터 전달받은 타임슬롯

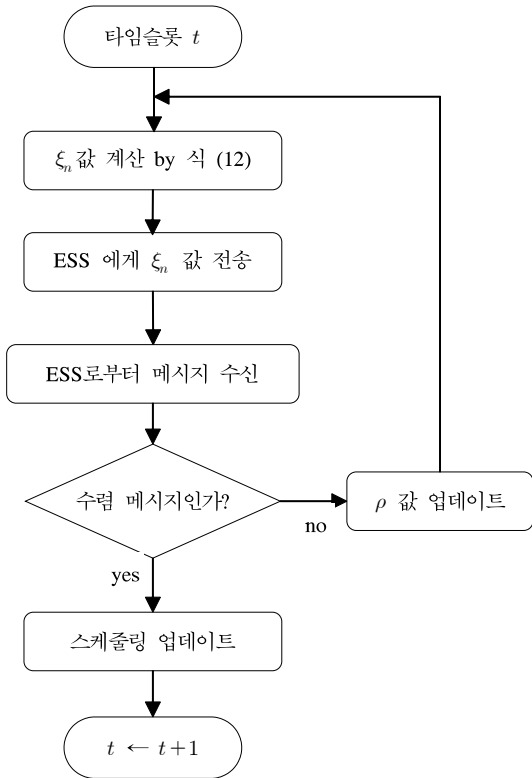


그림. 3. 프로슈머의 동작  
Fig. 3. operation of prosumer

$t$ 에 대한 실시간 전력 금액을 말한다. 목적함수 (12)는 Convex Form이므로 각 프로슈머는 Polynomial 시간 내에 최적의 전략을 찾을 수 있다. Fig. 3는 프로슈머의 동작 알고리즘을 보여준다.

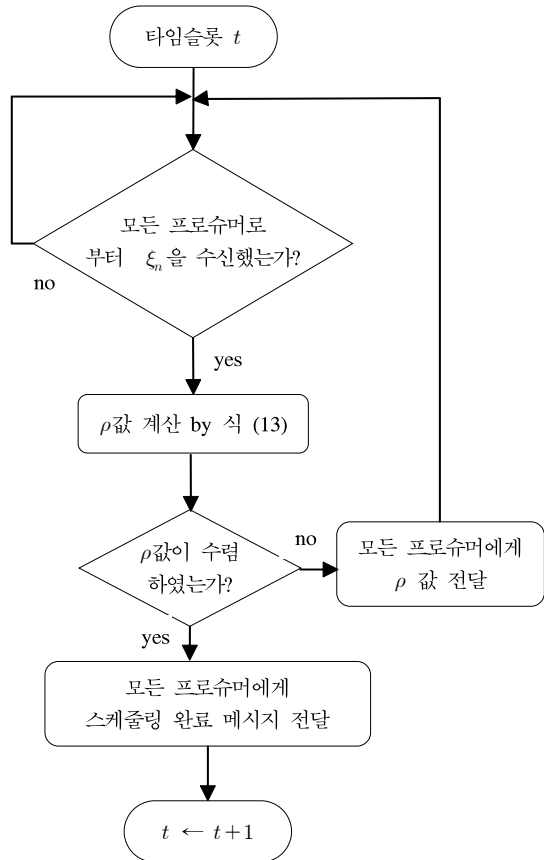
### 3.3.2 ESS 운영자의 전략

Fig. 4는 ESS 운영자의 동작 알고리즘을 보여준다. ESS 운영자는 모든 프로슈머의 전략을 수신 받은 후, 해당 값을 바탕으로 자신의 전략  $\rho$ 를 찾는다. 본 논문에서 ESS 운영자는 실시간 전력 요금제를 통하여 이득을 최대화 하려고 한다고 가정한다. 따라서, 이를 위한 목적함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{maximize } P^t \sum_{\tau=t}^{t+23} P^\tau \quad (13)$$

subject to

$$0 \leq B^t \leq 100$$



$$E^t = \sum_{n=1}^N e_n^t$$

$$B^{t+1} = B^t + \frac{100E^t}{C_{ESS}}$$

$$P^t \leq \frac{\int_{B^t}^{B^{t+1}} P(x) dx}{E^t}$$

목적함수 (13)은 Convex Form이므로 ESS 운영자는 Polynomial 시간 내에 최적의 값을 찾을 수 있다. 이를 통해 계산된 값이 이전의 전략과 동일한 경우 프로슈머에게 스케줄링 완료 메시지를 전달하고, 다른 경우 새로운 전략을 전달하여 전략교환이 계속되도록 한다.

## IV. 성능평가

본 장에서는 MOSEK 최적화 도구<sup>[14]</sup>와 MATLAB

을 사용하여 제안된 스마트 그리드 시스템의 성능을 평가한다. 시뮬레이션 파라미터는 다음과 같다. ESS의 배터리 용량은  $3.5 \cdot 10^7 J$ 이고, ESS의 초기 배터리 양을 40%로 설정했다. 식 (5)을 계산하기 위해  $P_{max} = 160, P_{min} = 100$  으로 설정하였다.  $\hat{g}_n^t$ 는 연구<sup>[13]</sup>의 태양열 발전 및 풍력 발전의 랜덤 분포를 따른다. 태양열 발전분포의 경우, 햇빛이 강한 낮 동안의 에너지 생산이 더 높지만 풍력 발전의 경우는 시간과 큰 상관관계를 보이지 않는다. 전력 판매자의 Fig. 2에 나온 일리노이 전력회사 실시간 전력 금액을 사용했다. 프로슈머의 수는  $N=100$ 으로 설정했으며 전력 사용 요구사항은 시작시간은 10시 종료시간은 16시의 평균을 갖도록 가정했다.

성능평가에서는 먼저 제안한 알고리즘의 시간 복잡도를 측정한다. Fig. 5는 프로슈머 증가에 따른 수렴 시간의 평균값을 보여준다. 이 그래프에서 프로슈머의 수가  $N=100$ 일 때 평균 수렴 시간은 거의 2초로 측정되었다. 또한 프로슈머 증가에 따른 수렴 시간의 증가 속도는 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 제안된 모델의 목적 함수 (12), (13)은 Standard Convex Linear Programming 형태이므로 평균 수렴 시간은 프로슈머의 수에 따라 선형적으로 증가하게 된다. 따라서 제안하는 알고리즘은 Polynomial 시간 안에 계산 될 수 있음을 보여준다.

Fig. 6은 ESS의 사용 유무에 따른 프로슈머의 전력 요금 그래프를 보여준다. 두 경우 전체 전력수요 변화분포는 유사하지만, ESS를 사용할 경우 스케줄링을 유연하게 할 수 있기 때문에, 전체 요금이 감소하고 특정 시간 대 가격은 22%까지 줄어든 것을 볼 수 있

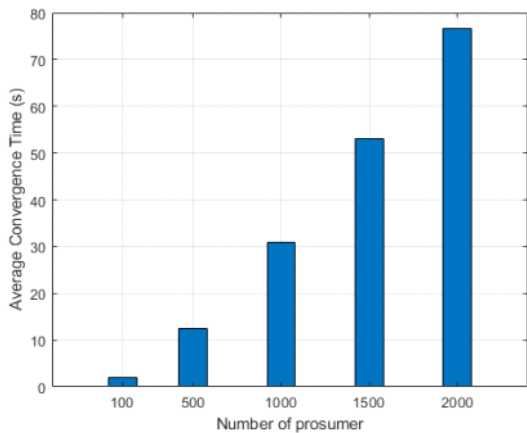


그림 5. 프로슈머 숫자 vs. 알고리즘 수렴 시간  
Fig. 5. number of prosumers vs. Average Conversion Time

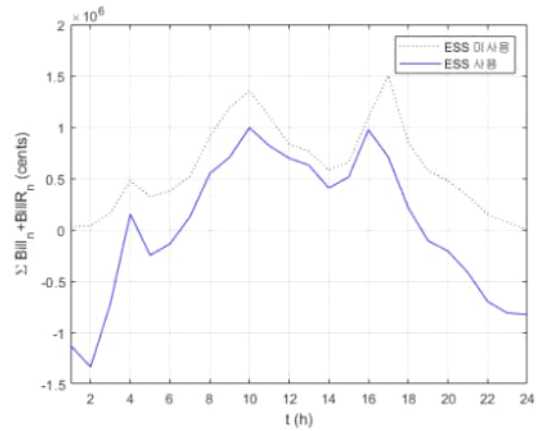


그림 6. ESS 사용유무에 따른 전력 요금  
Fig. 6. Electricity bill according to ESS usage

다. Fig. 6에서 ESS가 사용될 때 특정 시간에 요금이 상승 값을 가지는데, 이는 프로슈머에 의해 생산된 에너지가 충분할 때 잉여 전력을 ESS에 판매되어 발생한 프로슈머의 이익을 보여준다. 본 성능평가를 통하여 ESS를 활용하여 스케줄링을 할 경우, 효과적으로 잉여전력을 활용하여 전력 요금을 낮추는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 ESS의 배터리 충전량에 따른 전기요금 그래프를 보여준다. 그림에서 전력 판매자의 실시간 요금은 ESS 충전량의 영향을 받지 않는다. 본 논문에서 제안하는 스마트 그리드 시스템의 실시간 전력 요금  $P^t$ 는 식 (5)에 따라 ESS의 전력 저장량에 의해 결정된다. 따라서  $P^t$ 은 ESS의 저장량과 반비례 관계를 가지고, 해당 결과는 Fig. 7에서 확인 할 수 있다.

Fig. 8은 시간에 따른 다양한 전력 소모 변화량을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 전력 소모량  $c_n^t$ 는

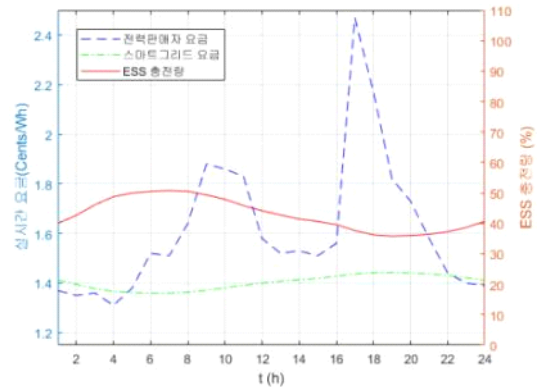


그림 7. ESS 충전량에 따른 실시간 요금  
Fig. 7. real time price according to ESS charge

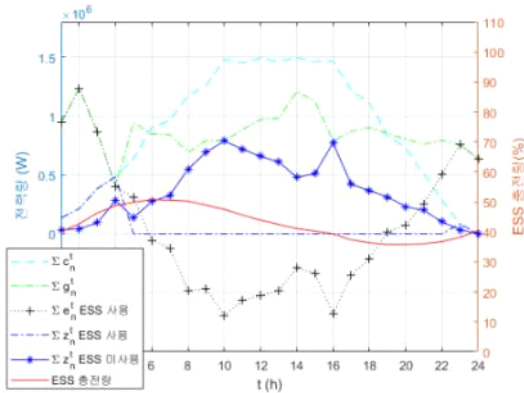


그림. 8. 시간에 따른 전력 소비량의 변화  
 Fig. 8. variation of electricity consumption according to time

프로슈머의 전력 요구사항에 따라 10시부터 16시에 가장 큰 값을 가지고 있는 것을 볼 수 있으며, 이를 통하여 프로슈머의 요구사항을 준수하며 알고리즘이 동작하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 ESS가 사용되지 않는 경우, 재생에너지원으로 발전된 전력 외, 부족한 전력은 전력판매자로부터 구매를 해야 한다. 즉, 목적함수의  $e_n^t$  값이 사용되지 않으므로 각 프로슈머들은 전력 판매업자로부터  $c_n^t - g_n^t$  만큼의 전력을 구매해야 한다. 따라서, 전력 소비량의 증가에 따라 소매업자로부터 사온 에너지양인  $z_n^t$ 는 함께 증가하게 된다. 반면, ESS를 사용할 경우, 프로슈머는 잉여 에너지를 사고 팔 수 있다. 그림에서 1시에서 5시 사이에  $e^t$  값이 0보다 큰 것을 볼 수 있다. 그 이유는, 해당시간에 프로슈머들은  $g^t$ 만큼의 에너지를 팔고 전력 판매업자로부터 필요한 전력을 구매한다. 이런 현상이 발생하는 이유는 Fig. 7을 함께 보면 알 수 있다. 1시에서 5시 사이는 ESS에서 책정한 전력 가격이 전력 판매업자의 가격보다 높은 것을 볼 수 있다. 따라서 생산된 에너지를 ESS에 팔고 더 적은 가격으로 소매업자로부터 에너지를 구매한다. Fig. 8에서 6시에서 18시 사이에는 전력 소비가 생산보다 높은 것을 볼 수 있다. 따라서 각 프로슈머들은 ESS나 소매업자로부터 에너지를 사야한다. 하지만 Fig. 7의 전력 금액에서 볼 수 있듯이, 해당 시간대의 ESS의 전력 가격은 전력판매업자의 가격보다 싸다. 따라서 모든 프로슈머들은 ESS로부터 필요한 에너지를 산다. 따라서  $z_n^t$ 는 해당 기간 동안 0 값을 가진다. 이러한 결과를 미루어 볼 때 ESS를 사용하는 것은 소매업자의 에너지 부하를 줄여 줄 뿐만 아니라 에너지 피크 상황에서의 요금도 줄여

주는 효과를 확인 할 수 있다. 18시 이후,  $c^t$ 는  $g^t$ 보다 더 작아지므로 남은 에너지를 ESS에 팔게 된다. 하지만 22시 이후 ESS의 가격이 소매업자의 가격보다 다시 높아지므로 생산된 모든 에너지를 ESS에 팔게 되고 필요한 에너지는 전력판매업자로부터 사게 된다. 본 알고리즘을 통하여 전력 판매업자의 발전량을 오후 시간에서 밤이나 새벽 시간으로 분산할 수 있음을 볼 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 재생에너지원, ESS와 함께 구성된 프로슈머를 위한 게임이론 기반 스마트 그리드 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 이를 위한 목적함수를 설계하였으며, 성능평가를 통해 제안된 알고리즘의 시간 복잡도 및 사용자의 전력 요금 감소를 확인할 수 있었다. 제안된 알고리즘은 전력판매자의 생산 부하를 분산 시킬 수 있음을 보였다.

### References

- [1] L. Park, Y. Jang, S. Cho, and J. Kim, "Residential demand response for renewable energy resources in smart grid systems," *IEEE Trans. Indu. Informatics*, vol. 13, no. 6, pp. 3165-3173, Dec. 2017.
- [2] A. T. Al-Awami, N. A. Amleh, and A. M. Muqbel, "Optimal demand response bidding and pricing mechanism with fuzzy optimization: Application for a virtual power plant," *IEEE Trans. Indu. Appl.*, vol. 53, no. 5, pp. 5051-5061, Sep./Oct. 2017.
- [4] M. Collotta and G. Pau, "A solution based on bluetooth low energy for smart home energy management," *Energies*, vol. 8, no. 10, pp. 11916-11938, 2015.
- [5] A. Garulli, S. Paoletti, and A. Vicino, "Models and techniques for electric load forecasting in the presence of demand response," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 1087-1097, May 2015.
- [6] F. Y. Xu, X. Cun, M. Yan, H. Yuan, Y. Wang, and L. L. Lai, "Power market load forecasting on neural network with beneficial

correlated regularization,” *IEEE Trans. Indu. Informatics*, vol. 14, no. 11, pp. 5050-5059, Nov. 2018.

[7] M. Collotta and G. Pau, “An innovative approach for forecasting of energy requirements to improve a smart home management system based on BLE,” *IEEE Trans. Green Commun. and Netw.*, vol. 1, no. 1, pp. 112-120, Mar. 2017.

[8] B. V. Solanki, A. Raghurajan, K. Bhattacharya, and C. A. Cañizares, “Including smart loads for optimal demand response in integrated energy management systems for isolated microgrids,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 4, pp. 1739-1748, Jul. 2017.

[9] F. Ruelens, B. J. Claessens, S. Vandael, B. D. Schutter, R. Babuška, and R. Belmans, “Residential demand response of thermostatically controlled loads using batch reinforcement learning,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2149-2159, Sep. 2017.

[10] Z. Li, S. Wang, X. Zheng, F. De Leon, and T. Hong, “Dynamic demand response using customer coupons considering multiple load aggregators to simultaneously achieve efficiency and fairness,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3112-3121, Jul. 2018.

[11] B. J. Claessens, P. Vrancx, and F. Ruelens, “Convolutional neural networks for automatic state-time feature extraction in reinforcement learning applied to residential load control,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3259-3269, Jul. 2018.

[12] Y. J. Kim, “Optimal price based demand response of HVAC systems in multizone office buildings considering thermal preferences of individual occupants buildings,” *IEEE Trans. Indu. Informatics*, vol. 14, no. 11, pp. 5060-5073, Nov. 2018.

[13] S. Y. Choi and S. W. Min, “Optimal scheduling and operation of the ESS for prosumer market environment in grid-connected industrial complex,” *IEEE Trans. Indu. Appl.*, vol. 54, no. 3, pp. 1949-1957, May/Jun. 2018.

[14] MOSEK: <https://www.mosek.com/>

**박희재 (Heejae Park)**



2018년 2월~현재 : 서울과학기술대학교 컴퓨터 공학과 학사과정  
 <관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학  
 [ORCID:0000-0002-6144-4831]

**위성률 (Seongryool Wee)**



2016년 2월~현재 : 서울과학기술대학교 컴퓨터 공학과 학사과정  
 <관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학  
 [ORCID:0000-0002-2762-2526]

**박래혁 (Laihyuk Park)**



2008년 2월 : 중앙대학교 컴퓨터 공학과 졸업  
 2010년 2월 : 중앙대학교 컴퓨터 공학과 석사  
 2017년 2월 : 중앙대학교 컴퓨터 공학과 박사과정  
 2019년 9월~현재 : 서울과학기술대학교 조교수

<관심분야> Intelligent Computing, IoT, 스마트 그리드  
 [ORCID:0000-0001-7848-8470]