

Prosumers' Self-consumption Optimization Scheme through Subsidy to Increase the Solar Photovoltaic Hosting Capacity in Distribution Systems

배전계통의 태양광 수용용량 증대를 위한 지원금 기반 프로슈머 자가소비 최적화 기법

Ye-Ji Son · Se-Heon Lim · Sung-Guk Yoon

손예지* · 임세헌* · 윤성국†

Abstract

In the power industry, renewable energy has been adopting into the power system to reduce global warming. However, renewable energy expansion such as solar photovoltaic (PV) raises a voltage stability issue for distribution systems. This work proposes a prosumers' self-consumption optimization scheme through subsidy to increase the hosting capacity of solar PV in distribution systems. Therefore, it reduces cost and increases the utilization of solar PV. We investigate a case study using the IEEE 15 bus test model. The case study confirms that the overvoltage problem is solved by changing the prosumers' power consumption pattern due to the subsidy. Therefore, the hosting capacity increases without system reinforcement and curtailment.

Key Words

distributed energy resources (DER), distribution system, hosting capacity, optimization, prosumer, solar photovoltaic (PV)

1. 서론

전 세계가 직면한 지구 평균온도 상승문제 해결을 위한 온실가스 감축 대책으로 재생에너지원의 중요성이 대두되었다. 우리나라 정부 역시 온실가스 감축을 위해 에너지전환 정책을 추진하여 재생에너지 비중 증대와 에너지 소비구조 혁신을 도모하고 있다. 정부가 2019년에 발표한 제3차 에너지기본계획은 '에너지전환을 통한 지속 가능한 성장과 국민 삶의 질 제고'를 목표로 에너지전환을 추진하고 있으며, 깨끗하고 안전한 에너지믹스 전환을 중점과제 중 하나로 두어 2040년까지 재생에너지의 발전 비중을 30~35%로 확대하고자 한다[1]. 이를 위해서는 분산형 에너지공급시스템 확충이 필수적이므로, 프로슈머와 같은 도심형 분산전원의 에너지 생산을 통한 분산형전원 확대가 중요하다. 그러나 배전망에서의 분산전원의 확대는 계통수용의 한계, 전력수급의 불균형, 그리고 주파수 및 전압 불안정 문제와 같은 난점을 가지고 있어 배전망 신뢰도에 부정적인 영향을 끼친다[2]. 특히 분산전원의 발전전력 증가로 인한 계통 전압상승은 정전을 야기할 뿐만 아니라 전력 설비의 열화 및 고장 등의 추가적인 문제를 유발한다[3,4].

분산전원의 수용용량(Hosting capacity)은 현재 전력계통 체

계에서 신뢰도에 악영향 없이 연계될 수 있는 분산전원의 발전 설비 용량을 뜻한다[5]. 본 연구는 분산전원 중 프로슈머의 설치가 용이한 태양광을 대상으로 진행되었다. 태양광의 수용용량 산정 시에 계통 신뢰도 기준 중 과전압의 영향이 주로 고려되므로, 과전압 문제의 해소를 수용용량을 증대시키는 기본적인 대책으로 간주할 수 있다. 과전압 문제 해결 방안의 일환으로 변압기 신설, 송전선로 확대 등 계통 보강을 이용한 방법과, OLTC(On-Load Tap Changer) 원격조정과 같은 다양한 기법을 통해 계통 전압을 범위 내로 조절하는 전압 조정 방법이 고안되었다[4,6]. 그러나 계통을 보강할 경우 시간적·금전적 비용이 크게 소모되며, OLTC를 이용한 전압 조정 방법의 경우 피더 별 전압 조정이 어렵다는 단점이 있다.

추가적으로 태양광 수용용량을 증대시키기 위해 배전망 내 요소를 활용할 수 있다. 예로 태양광 발전량 출력을 제한하는 가장 간단한 방법부터 태양광의 스마트 인버터를 활용한 무효 전력 조정 방법[7], 전압 조정과 더불어 손실 및 최대 소비 전력의 감소를 위한 BESS(Battery Energy Storage System) 활용 방안이 있다[8,9]. 이러한 기법들은 추가 전력설비를 설치하는 과정에서 시간적·금전적 비용을 소모할 뿐만 아니라, 발전량 출력 제한 및 조정으로 인해 태양광 발전량 활용을 극대화할

† Corresponding Author: Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea.
E-mail: sgyoon@ssu.ac.kr
<https://orcid.org/0000-0002-8987-6628>

* Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea.
<https://orcid.org/0000-0003-2687-7823> <https://orcid.org/0000-0001-7049-4163>

Received : Jan. 19, 2021 Revised : Feb. 26, 2021 Accepted : Mar. 29, 2021

수 없다. 특히 스마트 인버터로 무효전력을 제어할 경우, 과전압이 주로 나타나는 낮 시간대에 PCS(Power Conversion System) 용량제약으로 인해 무효전력을 충분히 흡수하지 못하여 유효 전력 출력이 삭감될 가능성이 있다. 이는 발전 사업자에게 손해를 입힐 수 있는 민감한 문제이므로, 배전계통의 모든 태양광 발전기에 VVC(Volt-Var Curve)를 탑재하는 것은 다소 제한적인 방법이다[10].

따라서 태양광 수용용량을 극대화시키기 위해 기존 전압조정방식의 한계점을 보완할 수 있는 소비자의 소비 패턴 변화를 이용한 방안이 연구되고 있다. 계통 손실 감소 및 수용용량 증대를 위해 최적화 문제와 수요반응을 이용하거나[11], 수요반응을 촉진하는 요금제 신설 또는 프로슈머 별 필수 자가 소비량 미달 시 위약금을 부과하는 방안 등이 고려되었다[12,13]. 그러나 기존 연구는 구체적인 수요반응 설계 없이 소비자의 부하 이동만을 가정하여 진행되었다. 따라서 본 논문은 소비자 참여의 방법을 확장시켜, 지원금 제도를 통해 계통의 과전압 문제를 해결하는 프로슈머 태양광 자가소비 최적화 기법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 프로슈머 태양광 자가소비 최적화 기법은 수용용량 극대화에 있어서 기존방식들과 함께 고려될 수 있다.

제안하는 기법에 참여하는 소비자는 AMI(Advanced Metering Infrastructure)로 본인의 태양광 발전량과 전력소비량 데이터를 취득한다. 이후 취득된 정보와 전력회사 측에서 산정된 지원금을 가정 내 설치된 HEMS(Home Energy Management System)를 이용해 전력회사와 공유한다. HEMS는 공유된 데이터를 최적화 문제의 입력변수로 사용하며, 최적화 기법에 의해 도출된 익일 전력사용패턴을 가전기기 모듈에 전달해 제어를 수행한다. 전력회사는 목적함수의 변수 중 소비자의 비용환산계수를 설정하기 위하여 소비자의 전력 사용 특성을 분석하고, 전압문제 해결을 위해 태양광 자가소비에 대한 시간별 지원금을 부여한다. 시간별 지원금은 소비자의 익일 전력사용패턴을 이용한 전압문제 판정 이후 계통전압이 범위 내로 유지되도록 범위를 초과하는 시간에 설정된다. 제안하는 기법의 성능은 실제 소비자 데이터와 IEEE 15모션 배전계통 모델을 활용한 사례연구를 통해 검증하였다. 사례연구에서 본 기법 적용 시 발생하는 모션별 전압변동, 태양광 수용용량 및 발전량 제한에 대한 변화를 분석하였다.

2. 시스템 모델

2.1 프로슈머 전력거래 제도

프로슈머는 재생에너지를 활용하여 전력을 생산하고, 소비 후 남은 전력을 판매할 수 있는 생산자이며 소비자이다. 프로슈머 전력거래 제도 하에서 소비자는 자가소비량과 잉여전력량, 전력회사로부터 구매하는 전력량의 조절이 가능하다. 이는 에너지관리에 대한 소비자의 선택지를 늘려 보다 능동적인 수

요 반응을 유도한다[14].

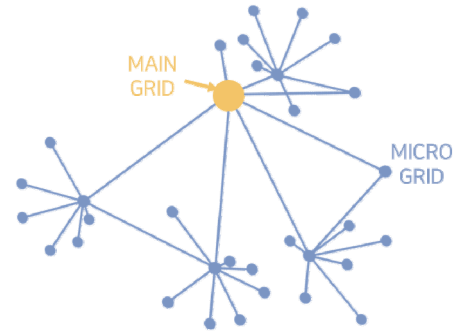


그림 1 프로슈머 전력거래 시장 구조
Fig. 1 Prosumer power trading market structure

본 논문의 전력거래는 그림 1과 같은 프로슈머와 계통의 연동 모델을 차용한다[15]. 이러한 전력거래 시장 구조를 가질 경우, 프로슈머는 전력소비량을 태양광 발전량으로 차감한 잉여전력을 전력회사 측에 판매하므로 프로슈머간 거래에 비해 많은 전력을 생산할 수 있다. 이는 한국전력공사 측과 구매계약을 맺어 잉여전력 판매금을 월가중평균 SMP(System Marginal Price)를 기준으로 정산 받는 자가용 PPA(Power Purchase Agreement)와 유사한 방식이다[16].

2.2 소비자 전력요금제

전력 시장에서 소비자가 전력 판매 시 얻는 잉여전력 정산가격(p^s)과 소비자의 전력구매가격(p_t^b)을 다음과 같이 설정하였다. 아래의 가격 조건은 임의로 설정된 값으로, 어떠한 가격 정보를 사용하더라도 제안 기법 적용이 가능하다.

지역별 한계가격(LMP, Locational Marginal Price)은 발전한계비용, 송전혼잡비용 및 송전손실비용으로 이루어진 가격으로, PJM¹⁾, NYISO²⁾, ERCOT³⁾ 등을 포함한 대부분의 선진화된 전력시장에서 사용되고 있는 요금제도이다[17]. PPA 거래를 참고해 식 (1)의 월가중평균 LMP 가격을 전력시장의 잉여전력 정산가격(p^s)으로 이용하였다. l_t 와 LMP_t 는 각각 하루 중 t 시간($T=24$)에 해당하는 전력소비량과 LMP 가격을 의미한다. 같은 변전소 내의 소비자별 잉여전력 정산금은 동일하다.

$$p^s = \frac{\sum_{t=1}^T (l_t \times LMP_t)}{\sum_{t=1}^T l_t} \quad (1)$$

- 1) Pennsylvania-New Jersey-Maryland Interconnection (PJM), <https://www.pjm.com/>
- 2) New York Independent System Operator (NYISO), <https://www.nyiso.com/>
- 3) Electric Reliability Council of Texas (ERCOT), <http://www.ercot.com/>

소비자의 전력구매가격(p_t^b)의 경우 시간대별로 차등요금을 가진 계시별 요금제로 설정하였다.

2.3 전압 유지범위

표 1은 IEC(International Electrical Commission)과 한국전력공사가 선정한 배전계통 전압별 전압유지범위 기준이다 [18,19]. 배전망 운용자는 규정에 의해 모든 모선의 전압을 해당 전압유지범위 내로 운영할 의무를 가진다. 본 연구에서는 한국전력공사의 초고압 전압유지범위를 사용하였다. 모선별 전압 조정 또는 국소적인 변전소 단위에서 추가적으로 필요한 전압범위유지 등에 본 기법을 활용할 수 있도록, 전압유지범위는 전력회사 측에서 필요에 따라 변경할 수 있다.

표 1 전압유지범위 기준

Table 1 Voltage maintenance range standard

기준	배전계통 전압	전압유지범위
IEC	Low/Medium	±10%
한국전력공사	저압(220V)	±6%
	고압(6.6kV)	-9 ~ +4.5%
	초고압(22.9kV)	-9 ~ +4%

2.4 변전소별 지원금 제도

임의의 변전소가 전력을 공급하는 배전계통에서의 전압안정을 이루기 위해 본 논문에서 제안하는 제도로써 자가소비량의 증가를 유도하여 전압상승을 억제하기 위해 설정되었다. 변전소 내부의 제어센터에서 시간별 지원금(p_t^{sub})의 가격 및 부여할 시간대를 선정하며, 이에 따른 과전압문제를 재판정한다.

3. 지원금 기반 프로슈머 자가소비 최적화 기법

배전망에서 전압문제를 해결하기 위해 지원금에 반응하는 프로슈머의 전력 이동량 및 부하 이동에 따른 불편감을 분석한다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 프로슈머의 전력 이동량을 고려하여 계통 전압문제를 해결하기 위한 최적의 지원금을 선정하는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다.

3.1 프로슈머 측면

3.1.1 프로슈머 비용 최적화

본 연구에서는 프로슈머가 본인의 비용을 최소화하기 위해 부하를 이동한다고 가정하였다. 프로슈머 비용 최소화 문제는 다음과 같은 2차 계획법 최적화 문제를 이용하여 정의하였다.

$$\text{minimize } \sum_{t \in T} p_t(\hat{l}_t - e_t) + \mu(\hat{l}_t - l_t)^2 - p_t^{sub}(\hat{l}_t - l_t) \quad (2)$$

$$0.5 \sum_{t \in T} |\hat{l}_t - l_t| \leq \min(\alpha \sum_{t \in T_1} l_t, \sum_{t \in T_2} |e_t - l_t|) \quad (3)$$

$$\sum_{t \in T} (\hat{l}_t - l_t) = 0 \quad (4)$$

subject to $\hat{l}_t \geq (1 - \alpha)l_t \quad (5)$

$$e_{T_1} \leq \hat{l}_{T_1} \leq l_{T_1} \quad (6)$$

$$l_{T_2} \leq \hat{l}_{T_2} \leq e_{T_2} \quad (7)$$

표 2 최적화 문제의 기호

Table 2 Nomenclature of the optimization problem

기호	의미
e_t	태양광 발전량 (kWh)
l_t	전력소비량 (kWh)
\hat{l}_t	최적화 후 전력소비량 (kWh)
t	시간 변수 (hour)
$T = \begin{cases} T_1 & (l_t > e_t) \\ T_2 & (l_t \leq e_t) \end{cases}$	하루 단위 시간 (24h)
α	이동가능 부하 비율
μ	소비자 불편감의 비용환산계수 ($\$/(\text{kWh})^2$)
p_t^{sub}	시간별 지원금 ($\$/\text{kWh}$)
$p_t = \begin{cases} p_t^b & (t \in T_1) \\ -p^s & (t \in T_2) \end{cases}$	시간별 적용 가격 ($\$/\text{kWh}$)
p_t^b	소비자의 전력구매가격 ($\$/\text{kWh}$)
p^s	소비자의 잉여전력 정산가격 ($\$/\text{kWh}$)

본 연구에서는 식 (2)와 같이 소비자의 부하 이동 불편비용과 기존의 전력 요금 및 지원금의 합을 목적함수로 설정하였다. 프로슈머의 통계변수는 익일 전력소비(\hat{l}_t)이다. 목적함수의 첫 번째 항은 소비자 전력구매 요금 및 잉여전력 정산금을 나타낸다. 이때 시간별 적용가격은 T_1 과 T_2 시간대에 각각 전력구매가격과 잉여전력 정산가격으로 적용한다. T_1 시간대는 발전량이 부하보다 적은 시간대를 의미하며, 프로슈머는 전력회사로부터 부족한 전력을 구매해야 한다. T_2 시간대는 발전량이 부하보다 많은 시간대로서 프로슈머는 잉여 전력량을 전력회사로 판매한다. 두 번째 항은 부하 이동에 따른 불편감 비용으로 소비자 불편감 비용환산계수가 크고 전력 이동량이 많을수록 부하 이동을 자제하게 된다. 소비자 불편감 비용환산계수(μ)를 통해 부하 이동 불편감을 금전적으로 환산하여 소비자 특성 별로 느끼는 불편감이 다름을 반영하였다. 또한 기존의 전력 소비량에 비해 전력 이동량이 많을수록 소비자가 느끼는 불편감이 상승하는 것을 고려하였으며, 이는 그림 2과 같은 2차함수로 표현된다[20]. 세 번째 항은 지원금에 대한 항으로, 부하 이동이 필요한 시간에 한시적으로 지원금을 부가하여 해당 시간대의 전력소비량이 증가되도록 유도한다.

소비자 비용 최적화 문제에는 식 (3)-(7)의 제약조건들이 존재한다. 식 (3)의 좌항은 이동한 전력량, 우항은 이동가능한

부하의 총량 또는 발전 후 소비하고 남은 잉여전력량의 총량 중 최소값이다. 이는 이동할 수 있는 전력량의 상한값이 존재함을 나타낸다. 식 (4)는 기존의 총 전력 소비량과 최적화 이후의 총 전력소비량이 동일해야 한다는 것을 표현한다. 식 (5)는 매 시간마다 필수적으로 소비하는 부하가 있음을 의미한다. 기존 전력 소비량의 $(1-\alpha)$ 에 해당하는 필수 부하 이동할 수 없으므로, 최적화 후 전력소비량은 필수 부하 이상이어야 한다. 식 (6)과 식 (7)은 최적화 후 전력소비량이 기존의 전력 소비량과 태양광 발전량 사이에 존재하도록 설정하는 제약조건이다.

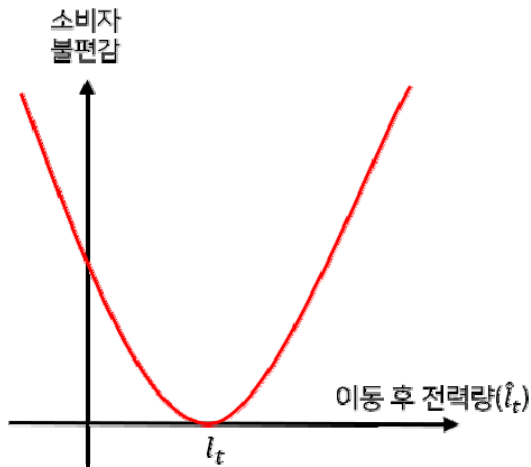


그림 2 이동 후 전력량에 따른 소비자 불편감
Fig. 2 Consumer discomfort due to the power shift

3.1.2 비용환산계수 산정

소비자 불편감 비용환산계수(μ)는 소비자의 부하 이동 불편감을 비용으로 환산한 계수로서 소비자에 따라 느끼는 정도가 다를 것을 고려하여 설정된다. 소비 특성이 전력 시장에 끼치는 영향을 분석하기 위해 설문조사 등의 실제 데이터를 이용하여 소비자 특성을 판단하는 다양한 연구가 진행되어 왔다[21-24].

소비자 특성의 예시로서 미국 Pecan Street 소비자에 대한 설문 조사문항 및 응답을 표로 작성하였다. 표 3과 표 4는 각각 부하 이동이 어려운 소비자 특성과 비용을 중시하는 소비자 특성을 나타내는 설문 문항이다. 전력회사는 이와 같이 냉난방공조(Heat, ventilation, and air conditioning, HVAC)의 설정 온도, 태양광을 설치한 이유 및 본인이 생각하는 태양광의 특징 등 다양한 객관식·주관식 문항을 포함한 설문조사를 소비자 특성 분석에 활용할 수 있다.

표 3 부하 이동이 어려운 소비자 특성

Table 3 Consumer characteristics with difficulty in shifting load

설문 문항	응답
어떤 종류의 냉난방공조 시스템을 쓰는가?	사용하지 않음
몇 대의 가전기기가 사용되는가?	사용하지 않음
평일 중 언제 집에서 시간을 보내는가?	보내지 않음
구성원의 연령대가 어떻게 되는가?	5살 미만

표 4 비용을 중시하는 소비자 특성

Table 4 Consumer characteristics who value cost

설문 문항	응답
집에 에너지 효율을 위한 개조가 있었는가?	시도 있음
집의 냉방 온도를 몇 도로 유지하는가? (평일/주말/아침/낮/저녁 개별 평가)	21°C
	26°C
	32°C
태양광 시스템 설치 이유는 무엇인가?	(서술형) 금전적인 측면 언급
태양광 기대 효과는 무엇인가?	
태양광의 장단점은 무엇인가?	
태양광이 가진 이득은 무엇인가?	
전기 요금 조절 시도를 해본 적이 있는가?	시도 있음

3.2 전력회사의 지원금 설정

식 (2)-(7)의 최적화 문제를 이용해 전체 소비자가 익일에 이동할 최적화 이후 전력소비량을 산정한 후, 각 모선의 부하량으로 과전압 문제를 판단한다. 본 논문에서는 OpenDSS를 이용한 조류 계산을 진행해 모선별 과전압 문제를 확인하였다.

임의의 모선이 설정된 전압 범위를 초과할 경우, 전력회사는 해당 시간에 지원금(p_t^{sub})을 지급하여 태양광 자가소비량을 증가시켜 과전압 문제를 해소한다. 전력회사는 앞서 기술된 최적화 문제의 목적함수 식 (2)에서 지원금(p_t^{sub}) 변수를 제어할 수 있다. 지원금이 전력소비량 변화에 끼치는 영향을 분석하기 위해 목적함수에 p_t^{sub} 에 대한 편미분을 수행한 식은 다음과 같다.

$$\frac{df(p_t^{sub})}{dp_t^{sub}} = l_t - \hat{l}_t < 0 \tag{8}$$

소비자에게 지원금을 지급할 경우 식 (2)의 총 비용은 감소하기에 식 (8)에서 표현된 p_t^{sub} 에 대한 목적함수의 편미분 값은 음수이다. 소비자는 비용감소를 최대화하기 위해 식 (8)의 편미분 값을 최소화하는 방향으로 동작하므로, 목적함수의 감소 기울기 폭을 증가시키도록 \hat{l}_t 를 증가시킨다. 결과적으로 제시된 최적화 문제는 지원금이 증가할 때 최적화 후 전력소비량 역시 증가하도록 동작한다. 이는 전압 문제가 발생한 시간대에 지원금을 부여함으로써 태양광 자가소비량을 증가시켜 전압 문제를 해결할 수 있음을 시사한다.

3.3 지원금 기반 프로슈머 자가소비 최적화 기법

전력회사는 과전압문제를 해결하기 위한 최소 지원금을 구해야 한다. 최소 지원금은 전압문제가 확인된 시간대 지원금을 전압 문제가 해소될 때까지 초깃값 0부터 일정량(Δ)씩 증가시키므로써 찾을 수 있다. 그림 3은 제안하는 지원금 기반 프로슈머 자가소비 최적화 기법의 순서도이다. 초기화 후 소

비자는 본인의 전력소비량, 태양광 발전량 정보를 전력회사 측으로 송신한다. 전력회사는 각 소비자의 부하 이동불편특성을 반영하여 비용환산계수(μ)를 결정하고, 프로슈머 비용 최적화 문제를 풀어 소비자의 익일 전력 이동량을 예측한다. 이후 조류 계산을 통해 과전압문제 발생 유무를 판정한다. 과전압문제가 발생할 경우, 해당 시간대에 지원금을 Δ 만큼 상향 조정하여 부하 이동을 촉진시킨다. 이 과정은 모든 과전압문제가 해결되는 최소 시간별 지원금(p_t^{sub})이 결정될 때까지 반복된다. 최종적으로 소비자는 결정된 지원금에 반응하여 실제 부하를 이동시킴으로써 과전압 문제를 해소한다.

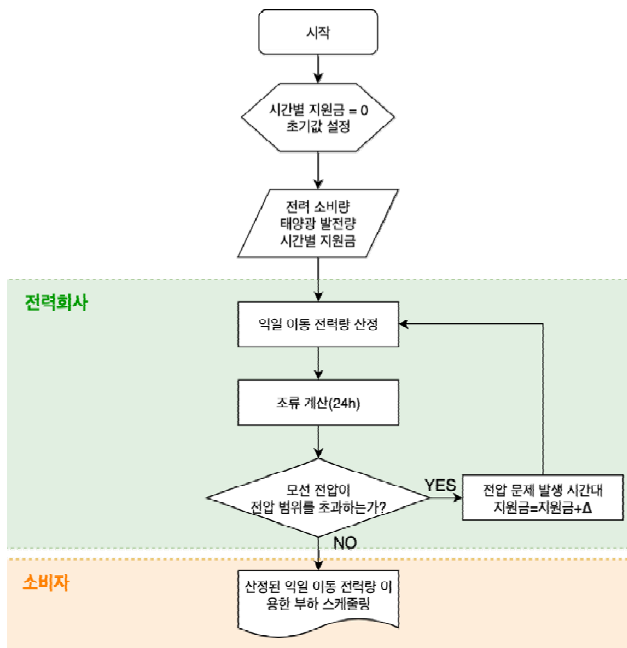


그림 3 지원금 기반 프로슈머 자가소비 최적화 기법의 순서도
Fig. 3 Flowchart of the proposed prosumers' self-consumption optimization scheme through subsidy method

4. 사례 연구

4.1 특고압 배전계통 모델 구성

4.1.1 사용 데이터

1) 소비자 데이터: 2019년 8월 Pecan Street 데이터⁴⁾ 중 소비자의 태양광 발전량과 전력소비량의 한 시간 단위 데이터를 사용하였다. Pecan Street 실제 소비자 14명의 데이터를 기반으로, 난수를 섞어 총 196명의 전력소비량 및 태양광 발전량으로 확장시켜 사용하였다. 사례연구에서는 14개의 부하 모션에 모션 당 14명의 프로슈머가 존재한다고 설정하였다.

2) 불편감 비용환산계수(μ): 소비자 불편감 비용환산계수(μ)는 평균 0.2, 표준편차 0.063을 가지는 가우시안 랜덤변수를 통해 설정하였다. 사례 연구에 적용된 전력구매가격의 최솟값

(0.2)을 평균값으로, 0과 최댓값(0.39) 사이에 대부분의 μ 가 존재하도록 표준편차를 설정하였다[25].

3) 잉여전력 정산가격(p^s): 소비자가 잉여전력을 판매할 때 적용되는 잉여전력 정산가격(p^s)은 2019년 8월 1일 PJM의 LMP 가격을 기반으로 계산된 월가중평균 LMP(\$ 0.0264)를 이용하였다.

4) 소비자 전력구매요금(p_t^b): 전력회사가 판매하는 소비자 전력구매요금(p_t^b)의 경우 2019년 8월 여름에 적용된 표 5의 PG&E (Pacific Gas and Electric Company) EM-TOU(Time Of Use, 계시별 요금제) 가격을 이용한다[26].

표 5 EM-TOU 정보
Table 5 EM-TOU information

여름 (5-10월)	구분	시간대	가격(\$/kWh)
	최대부하		오후 1:00 ~ 오후 7:00
중부하		오전 10:00 ~ 오후 1:00 오후 7:00 ~ 오후 9:00	0.27
경부하		오후 7:00 ~ 오전 10:00	0.20

5) 이동가능부하량(α): 본 연구에서는 주거부하비를 통계로 이용해 이동가능부하량을 산정하였다. 부하수준을 조절할 수 있는 조절가능부하(Controllable Loads), 부하자체를 이동시켜야 하는 이동가능부하(Shiftable Loads)로 구분하여 전체 조절가능부하의 50%, 이동가능부하의 100%를 이동가능부하량으로 가정하였다.

그림 4은 EIA(Energy Information Administration)에서 조사한 2015년의 주거 부하 종류 통계이다[27]. 조절가능부하(Air conditioning, Space-Water Heating, Lighting, Refrigerator) 비율 63%의 절반인 31.5%와 이동가능부하(Clothes dryers, New end users) 비율 17%를 더한 $\alpha = 48.5\%$ 로 사례 연구를 진행하였다.

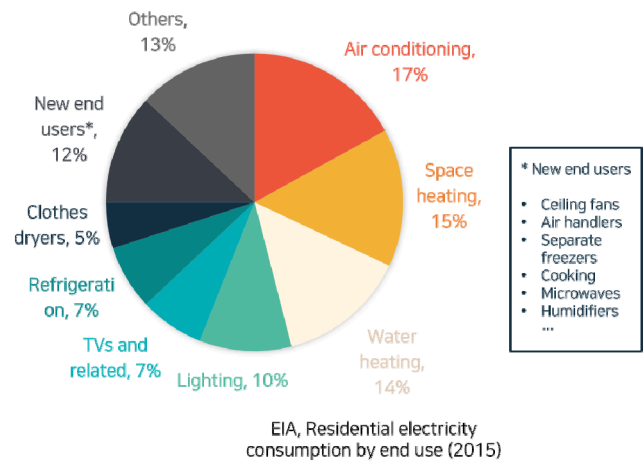


그림 4 주거 소비자의 전력 사용 비율
Fig. 4 Percentage of residential consumers' electricity use

4) <https://www.pecanstreet.org/>

4.1.2 모델 계통

모델 계통으로 그림 5의 IEEE 15모선 방사형 배전계통을 이용하며, 기준 용량 및 전압으로 50MVA/11kV를 이용한다. 식 (9)를 이용해 선 부하를 환산하여 사용하였으며, 계통 정보는 표 6과 같다[28]. 모선 부하의 역률은 0.9로 가정하여 부하(유효전력) 이동 시, 무효전력도 유효전력의 일정 비율만큼 이동하여 전압 조절에 영향을 준다. 본 논문에서는 제안 기법의 효과를 검증하기 위해 소비자의 부하 이동 외의 제어요소는 고려하지 않았다. 이러한 이유로 계통 전압에 영향을 줄 수 있는 태양광 발전기의 무효전력은 별도의 제어 없이 0으로 가정하여 사례연구를 진행하였다.

$$\%Z = \frac{Z}{Z_{base}} = \frac{Z'}{Z'_{base}} \quad (9)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$$

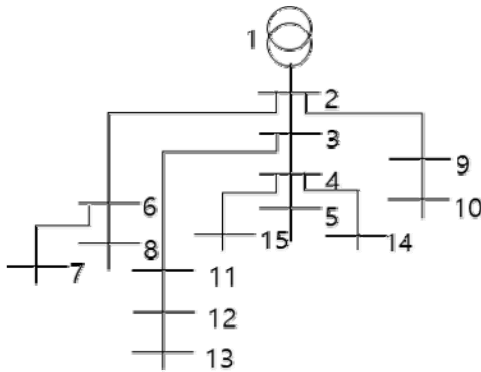


그림 5 IEEE 15모선 계통도(100MVA/11kV)
Fig. 5 IEEE 15-bus diagram(100MVA/11kV)

표 6 IEEE 15모선 계통 정보

Table 6 IEEE 15-bus information

모선 번호	선 부하	모선 부하
송전단	수전단	R(Ohm) L(Henry) P(kW) Q(kVAR)
1	2	1.35309 1.32349 44.1 44.99
2	3	1.17024 1.14464 70.1 71.44
3	4	0.84111 0.82271 140 142.82
4	5	1.52348 1.0276 44.1 44.99
2	9	2.01317 1.3279 70 71.44
9	10	1.68671 1.1377 44.1 44.99
2	6	2.55727 1.7249 140 142.82
6	7	1.0882 0.734 140 142.82
6	8	1.25143 0.8441 70 71.414
3	11	1.79553 1.2111 140 142.82
11	12	2.44845 1.6515 70 71.414
12	13	2.01317 1.3579 44.1 44.99
4	14	2.23081 1.5047 70 71.414
4	15	1.9702 0.8074 140 142.82

4.2 사례 연구 결과

4.2.1 비용환산계수에 따른 소비 패턴 변화 분석

소비자 불편감의 비용환산계수 수치가 높으면[낮으면] 전력 가격에 따른 부하 이동량이 적게[많게] 된다. 이를 확인하기 위해 그림 6에 전력소비량 및 태양광 발전량 크기가 유사하되 비용환산계수가 상이한 세 명의 소비자 그래프를 도시하였다. 황색 선은 태양광 발전량, 청색 선은 기법 적용 이후, 적색 선은 기법 적용 이전의 소비 패턴이다. 각 소비자의 불편감 비용환산계수(μ)와 자가소비 증가량은 표 7에 작성하였다. 그림 6과 표 7을 통해 실제로 비용환산계수와 부하 이동량이 반비례함을 확인하였다.

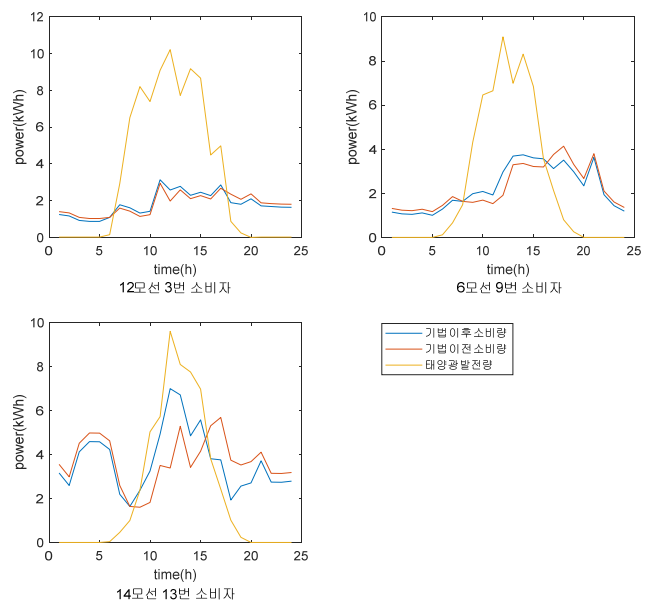


그림 6 소비자별 소비량 및 발전량 패턴
Fig. 6 Consumption and power generation patterns by consumer

표 7 소비자별 비용환산계수 및 부하 이동량

Table 7 Cost conversion factor and load shift amount by consumer

소비자	$\mu [\$ / (kWh)^2]$	부하 이동량(kWh)
12모선 3번	0.32	2.46
6모선 9번	0.21	3.76
14모선 13번	0.06	11.48

4.2.2 지원금 유무에 따른 모선 전압 변동 분석

HEMS가 지원금 없이 익일 이동전력량을 산정할 경우, 소비자 전력 매대 요금과 부하 이동 불편감만이 부하 이동에 고려되어 부하 이동은 거의 일어나지 않는다. 이 경우의 전력소비량 패턴과 태양광 발전량을 그림 7에 나타냈다. 적색 선은 태양광 발전량, 청색 선은 기법 적용 후, 흑색 선은 기법 적용 이전의 소비 패턴을 의미한다. 태양광 발전량을 자가소비하도록 전력 소비 패턴이 변화하였으나, 지원금이 적용되지 않아 실제 전압 문제가 발생한 시간대의 전력 이동은 미미했다.

그림 8은 시간별 모선 전압으로, 점선은 기법 적용 이전, 실선은 기법 적용 이후이며 황색 범위는 전압유지 기준을 의미한다. 1.01 p.u. 값을 가지는 파란색 수평선은 1모선의 전압으로 이는 고정시켜 송출하는 변전소 송출 전압을 의미한다. 12시의 부하 이동 이전 최고 전압 $V_{max} = 1.0501$ 에서 부하 이동 이후 최고 전압 $V_{max} = 1.0456$ 로 모선 전압이 감소하였으나, 기준과 마찬가지로 운용전압범위를 초과하였다.

용으로 인해 프로슈머 자가소비량은 584.02[kWh] 증가하였다.

그림 10은 지원금 적용 시의 시간별 모선 전압을 나타낸다. 실선은 기법 적용 이전, 점선은 기법 적용 이후이며 황색 범위는 전압유지 기준을 의미한다. 12시에 부하 이동 이전 최고 전압 $V_{max} = 1.051$ 으로 기준 전압범위를 초과하였으나, 12시에 지급한 지원금으로 인해 최고전압이 $V_{max} = 1.0398$ 로 감소하여 전압문제가 해결된 것을 확인하였다.

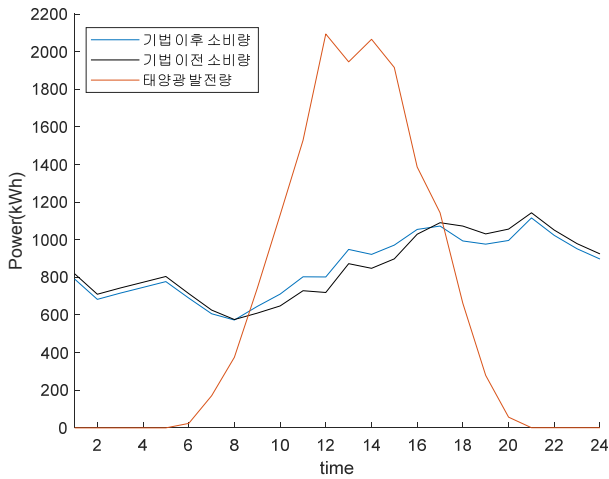


그림 7 모선 전체 전력 소비 패턴 변화($p_{12}^{sub} = 0.26$)
 Fig. 7 Changes in power consumption pattern of the entire bus($p_{12}^{sub} = 0.26$)

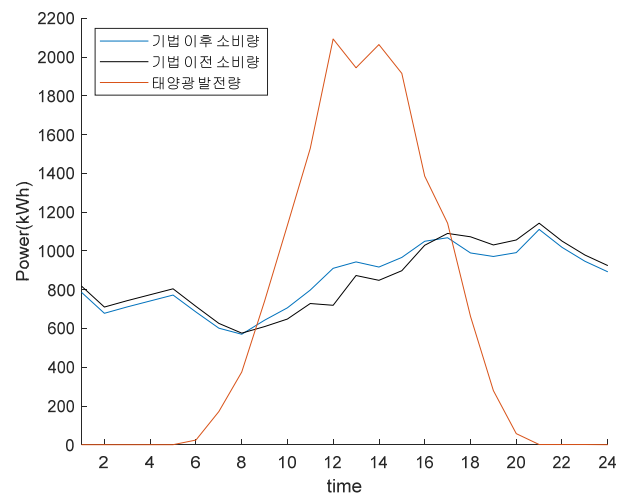


그림 9 모선 전체 전력 소비 패턴 변화($p_{12}^{sub} = 0.26$)
 Fig. 9 Changes in power consumption pattern of the entire bus($p_{12}^{sub} = 0.26$)

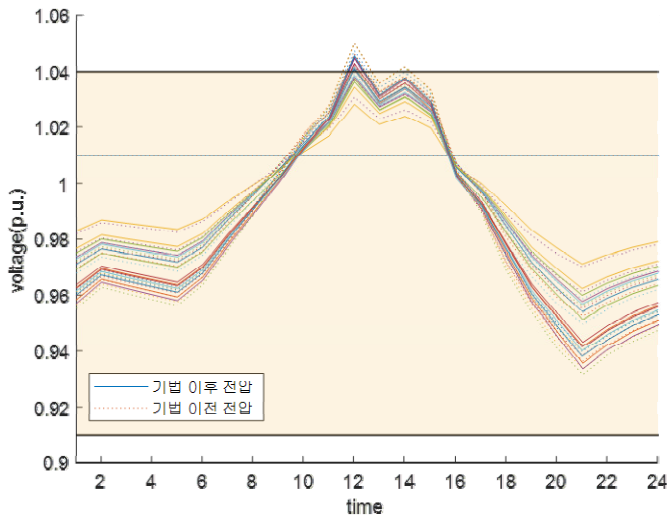


그림 8 시간별 모선 전압($p_i^{sub} = 0$)
 Fig. 8 Bus voltage by time ($p_i^{sub} = 0$)

동일한 상황에서 제안 기법을 적용하면 과전압 문제가 발생하는 12시에만 0.26\$/kWh의 지원금을 지급하여 과전압 문제를 해결한다. 제안하는 기법 적용 전후 전력소비량 패턴과 태양광 발전량을 그림 9에 나타냈다. 적색 선은 태양광 발전량, 청색 선은 기법 적용 후, 흑색 선은 기법 적용 이전의 소비 패턴을 의미한다. 지원금이 부가된 12시의 자가소비 전력량이 지원금 적용 이전보다 증가한 것을 확인하였다. 본 기법의 적

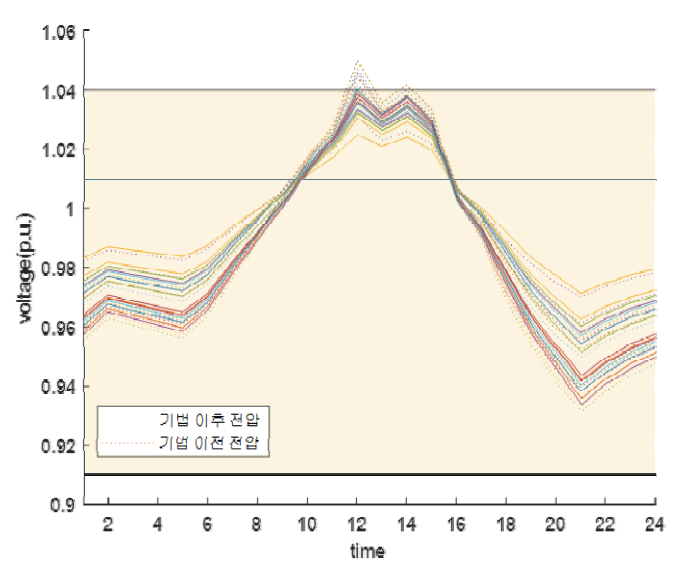


그림 10 시간별 모선 전압($p_{12}^{sub} = 0.26$)
 Fig. 10 Bus voltage by time ($p_{12}^{sub} = 0.26$)

4.2.3 전압문제 해결방안 비교

제안하는 기법을 발전량 제한 방법, 태양광 설비 용량 감소 방법과 비교하였다. 각 전압 문제 해결 방안에 따른 태양광 수용용량과 일일 태양광 발전량의 변화를 표 8에 나타냈다. 본 기법을 적용했을 경우, 태양광 발전의 출력을 제한하지 않고 태양광 수용용량을 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

표 8 전압 문제 해결 방안별 결과 비교

Table 8 Comparison of results by voltage problem solution

	발전량 제한	설비용량 감소	기법적용결과
일일 태양광 발전량[kWh]	15,195	13,510	15,529
태양광 수용용량[kW]	2,163	1,882	2,163

4.2.4 전력회사와 소비자의 금전적 손익 분석

제안하는 기법을 적용했을 때 소비자는 태양광 자가소비량이 증가시키므로 전력회사가 구매해야 하는 전력량은 감소하나, 지원금을 통한 추가 지출이 발생한다. 식 (10)은 제안하는 기법으로 인하여 전력회사가 추가적으로 지출하는 비용을 나타낸다. 이는 지원금으로 지출되는 금액에서 구매량 감소 금액의 차이로 전력회사의 추가 비용을 구할 수 있다.

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} p_t^{sub}(\widehat{l}_{i,t} - l_{i,t}) - p_t^s(\widehat{l}_{i,t} - l_{i,t}) \quad (10)$$

본 사례 연구에서 전력회사는 지원금으로 인한 지출 \$46.62과 태양광 구매 감소 이득 \$14.12으로 인하여, 총 \$32.5의 일일 추가 비용을 지출한다. 따라서 추가적으로 지출되는 비용과 즉각적인 태양광 연계 대기 문제해결 이득, 실제 계통에서 계통용량 증대를 위해 소요되는 신설 선로 및 유지보수 비용 회피 등 다양한 손익 요소를 고려하여 제안하는 기법의 적용 여부를 결정해야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 배전계통의 태양광 수용용량을 증대시키기 위해 과전압 문제를 해결하는 지원금 기반 프로슈머 태양광 자가소비 최적화 기법을 제안하였다. 전력회사는 소비자의 전력소비 패턴으로부터 부하 이동 불편감을 나타내는 특성을 분석하여 사전에 소비자 불편감의 비용환산계수를 결정한다. HEMS를 통해 수신한 소비자의 태양광 발전량 및 전력소비량 데이터를 최적화 문제에 이용하여 소비자가 익일 이동할 전력 패턴을 산정한다. 이후 산정된 값으로 진행된 조류 계산의 결과로써 계통에 발생한 전압 문제를 판별한다. 태양광 자가소비량이 증가하도록 과전압 문제가 예상되는 시간대에 한시적인 지원금을 부여하며, 결정된 지원금은 소비자의 HEMS로 송신된다. 이에 소비자는 본인의 불편감 특성과 지원금을 고려하여 익일 전력소비 패턴을 변화시킨다.

제안하는 기법은 태양광 발전량 자가소비를 촉진해 모선의 과전압 문제를 해결하므로, 발전량 출력 제한 또는 계통보강을 통한 용량 증대 없이 태양광 수용용량을 증가시킬 수 있다. IEEE 15 모선을 이용한 사례 연구를 통해 제안 기법의 유효

성과 일 \$32.5의 비용으로 과전압 문제를 해결할 수 있음을 확인하였다. 1년 동안 발생하는 과전압 문제가 태양광이 최대 출력을 보이는 봄-여름에 집중되는 점을 고려할 때, 제안하는 기법은 변압기 및 선로를 신설하는 것보다 훨씬 적은 비용으로 문제를 해결할 수 있다.

Acknowledgements

This work was supported in part by the “Human Resources Program in Energy Technology” initiative of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, the Republic of Korea (No. 20184010201690), and in part by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2020R1F1A1075137).

References

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, “The 3rd Basic Energy Plan,” 2019.
- [2] M. Islam, N. Mithulananthan, J. Hossain, R. Shah, “Dynamic voltage stability of unbalanced distribution system with high penetration of single-phase PV units,” *The Journal of Engineering*, vol. 17, pp. 4074-4080, 2019.
- [3] H. M. Sultan, A. A. Z. Diab, O. N. Kuznetsov, Z. M. Ali, O. Abdalla, “Evaluation of the impact of high penetration levels of PV power plants on the capacity, frequency and voltage stability of Egypt’s unified grid,” *Energies*, vol. 12, no. 3, p. 552, 2019.
- [4] H. Kim, S. Sung, “Key Technologies for Stabilization of Power System for Successful Achievement of 3020 Renewable Energy Policy,” *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 67, no. 2, pp. 149-157, 2018.
- [5] N. Etherden, M. H. Bollen, “Increasing the hosting capacity of distribution networks by curtailment of renewable energy resources,” in *Proc. 2011 IEEE Trondheim PowerTech*, pp. 1-7, 2011.
- [6] C. Long, L. F. Ochoa, “Voltage control of PV-rich LV networks: OLTC-fitted transformer and capacitor banks,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 4016-4025, 2015.
- [7] J. Seuss, M. J. Reno, R. J. Broderick, S. Grijalva, “Improving distribution network PV hosting capacity via smart inverter reactive power support,” in *Proc. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, 2015.
- [8] N. Jayasekara, M. A. Masoum, P. J. Wolfs, “Optimal operation of distributed energy storage systems to improve distribution network load and generation hosting capability,” *IEEE Transactions on sustainable energy*, vol. 7, no. 1, pp. 250-261, 2015.
- [9] N. Etherden, M. H. Bollen, “Increasing the hosting capacity

- of distribution networks by curtailment of renewable energy resources,” in Proc. 2011 IEEE Trondheim PowerTech, pp. 1-7, 2011.
- [10] H. Lee, et al. “A Study on Volt-Var Curve of Smart Inverter to Improve Hosting Capacity,” The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 69, pp. 1312-1317, 2020.
- [11] A. Soroudi, A. Rabiee, A. Keane, “Distribution networks’ energy losses versus hosting capacity of wind power in the presence of demand flexibility,” Renewable Energy, vol. 102, pp. 316-325, 2017.
- [12] S. G. Moreira, N. Kalache, D. Paschoareli, “Improving the hosting capacity of photovoltaic distributed generators in low voltage distribution systems by using demand response,” in Proc. 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, pp. 1-6, 2017.
- [13] A. I. Nousedilis, G. C. Christoforidis, G. K. Papagiannis, “Active power management in low voltage networks with high photovoltaics penetration based on prosumers’ self-consumption,” Applied energy, vol. 229, pp. 614-624, 2018.
- [14] Y. Lee, “Study on system improvement plan for vitalization of energy prosumer (korean),” Korea Energy Economics Institute occasional research report, pp. 1-93, 2016.
- [15] Y. Parag, B. K. Sovacool, “Electricity market design for the prosumer era,” Nature energy, vol. 1, no. 4, pp. 1-6, 2016.
- [16] H. Jang, Samjung Accounting Firm, Ministry of Trade Industry and Energy, “Survey on the actual condition of the power offset transaction and measures for improvement (korean),” 2015.
- [17] S. Raikar, S. Adamson, “Renewable Energy Finance: Theory and Practice,” Academic Press, pp. 123-126, 2019.
- [18] K. Ma, T. Yao, J. Yang, & X. Guan, “Residential power scheduling for demand response in smart grid,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems,” 78, pp. 320-325, 2016.
- [19] Y. Son, W. An, S. Baek, S. Lim, S. Yoon, “Residential Load Characteristics Analysis Using Clustering and Principal Component Analysis,” in Proc. ICEE 2019, 2019.
- [20] International Electrotechnical Commission, “IEC 60038: 2009-IEC Standard Voltages,” 2009.
- [21] Korea Electric Power Corporation, <http://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/H/C/CYHCHP00704.jsp>.
- [22] I. Dukovska, N. G. Paterakis, H. J. Sloatweg, “Local energy exchange considering heterogeneous prosumer preferences,” in Proc. In 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, pp. 1-6, 2018.
- [23] D. Menniti, F. Costanzo, N. Scordino, N. Sorrentino, “Purchase-bidding strategies of an energy coalition with demand-response capabilities,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 3, pp. 1241-1255, 2009.
- [24] D. T. Nguyen, L. B. Le, “Joint optimization of electric vehicle and home energy scheduling considering user comfort preference,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 1, pp. 188-199, 2013.
- [25] S. Bahrami, M. H. Amini, M. Shafie-khah, J. P. Catalao, “A decentralized electricity market scheme enabling demand response deployment,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 4, pp. 4218-4227, 2017.
- [26] Pacific Gas and Electric Company, “ELECTRIC SCHEDULE EM-TOU: RESIDENTIAL TIME OF USE SERVICE,” p. 2, 2020.
- [27] RESIDENTIAL ENERGY CONSUMPTION SURVEY (RECS), <https://www.eia.gov/consumption/residential>, 2020.
- [28] D. Das, D. P. Kothari, A. Kalam, “Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 17, no. 5, pp. 335-346, 1995.

저자소개



Ye-Ji Son

She received the B.S. and M.E. degrees in electrical engineering from Soongsil University, Seoul, South Korea, in 2018 and 2020.
E-mail: suonj1024@naver.com



Se-Heon Lim

She received her B.S. degree in Electrical Engineering from Soongsil University, Seoul, South Korea, in 2018. Currently, she is pursuing Ph.D. degree at Soongsil University, Seoul, Korea.
E-mail: seheon0223@naver.com



Sung-Guk Yoon

He received the B.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering and computer science from Seoul National University, Seoul, South Korea, in 2006 and 2012, respectively. He is currently with Soongsil University as an associate professor. His research include energy big data, game theory for power system, and power system optimization.
E-mail: sgyoon@ssu.ac.kr