

Techno-Economic Evaluation Software for Optimal Business Model and Sizing of Photovoltaic Power Station-Linked Energy Storage System

PV연계 ESS의 최적 사업모델 및 용량 산정을 위한 설계 프로그램

Kyeong-Hee Cho · Seul-Ki Kim · Hyung-Chul Jo · Wanbin Son · Eung-Sang Kim · June Ho Park

조경희* · 김슬기** · 조형철** · 손완빈** · 김응상** · 박준호†

Abstract

Under the Korea government's Energy Transition Roadmap, energy transition is underway with the gradual reduction of nuclear power plants and the expansion of renewable energy. Moreover, in the Third Energy Master Plan, the target share of renewable energy by 2040 was increased to 30-35%. The increase in the capacity of small-and medium-sized photovoltaic power stations (PV) is the highest among different renewable energy sources. As the output of PV power stations varies considerably, linking them with energy storage systems(ESSs) is attracting attention. When designing a PV-ESS, as the investment costs are high and the applicable support policies vary with the purpose of operation, it is important to review the economic feasibility of various models before installation. However, conducting this review might be very complex and difficult for the operator. Accordingly, the present study introduces a design program for distributed resources (MODDER) that can select the optimal capacity and business model considering the domestic policies and the operating characteristics of the distributed resources. The program comprises a database of weather information, load patterns according to application, sales unit costs, electricity rate unit costs, and renewable energy system specifications and can conveniently analyze the economic feasibility of a PV-ESS by selecting and configuring it according to the user's purpose. Accordingly, the program helps determine the optimal capacity and business model. To verify the effectiveness of the proposed program, through a case study, simulations of a demand side management business and a renewable energy generation sale business were conducted based on actual industrial customers, and the results were analyzed. The developed program can be used to maximize the return on investment of renewable power generation and ESSs, thereby reducing investment risk and contributing to improving the acceptance of renewable energy.

Key Words

Distributed Energy Resource, Energy Storage System, Optimal Business Model, Optimal Sizing, Photovoltaic power station, PV-ESS

1. 서론

2019년 6월, 정부는 에너지정책의 근거가 되는 제 3차 에너지기본계획에서 재생에너지 발전비중을 2040년까지 30~35%로 확대할 계획을 발표했다[1]. 국내뿐만 아니라 해외 각국에서 화석연료발전으로부터 친환경발전으로 에너지전환 정책이 진행 중이며, 신재생에너지 발전량 비중은 갈수록 높아질 전망이다[2]. 재생에너지 중에서도 설치가 쉽고 경제성이 있는 중소규모 태양광발전소(Photovoltaic power station, PV)의 설치가 가장 많이 증가하고 있으며, PV의 전력계통 연계용량이 증가하면서 출력변동성이 증가되는 문제가 발생되고 있다. 출력

변동성을 완화하기 위하여 정부는 PV에 에너지저장시스템(Energy Storage System, ESS)을 연계하여 운영할 경우 인센티브를 주는 지원제도를 시행하여 PV연계 ESS(PV-ESS) 설치를 장려하고 있다. 지원제도의 예로, PV-ESS를 신재생에너지 발전사업용으로 사용하여 10시부터 16시까지 PV 발전량을 ESS에 충전하였다가, 16시 이후 계통에 판매할 경우 REC가중치를 높게 정산해주고 있고, 수요관리용으로 사용할 경우 ESS 특별할인요금제인 기본요금할인이나 충전요금할인을 제공하고 있다[3].

PV-ESS의 용량 설계절차 및 수식과 관련하여 선행 논문들을 조사해 보았을 때, 분산자원을 모델링하여 최적 용량을 찾거나

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea.

E-mail: parkjh@pusan.ac.kr
<https://orcid.org/0000-0002-5967-0100>

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea.
<https://orcid.org/0000-0002-5774-8269>

** Smart Grid Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute, Korea.
<https://orcid.org/0000-0001-5562-4871> <https://orcid.org/0000-0002-1960-8222>
<https://orcid.org/0000-0003-1372-1176> <https://orcid.org/0000-0003-0152-0983>

Received : June 8, 2020 Revised : July 31, 2020 Accepted : August 29, 2020

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

[4-5], 신뢰성 조건을 만족하기 위한 마이크로그리드에서의 ESS 최적 용량을 산정하거나[6], PV 출력안정화를 위한 ESS 경제성을 분석하는[7] 논문들이 있었다. 또한 주택용[8]과 독립형 마이크로그리드용[9], 수요관리용[10], 발전사업용[11]의 특정 용도를 위한 분산자원 설계 결과 논문들이 발표되었다.

선행 논문들을 검토하였을 때 PV-ESS 설계를 위해서는 PV-ESS를 모델링하고 운영모의 시뮬레이션을 수행하여 수익을 계산하고 경제성분석을 진행하여야한다. 이를 설계시마다 직접 계산하기에는 절차가 복잡하며 번거롭기 때문에, 설계에 필요한 입력 정보를 데이터베이스로 구축하고 설계 절차를 일반화하여 프로그램으로 개발할 필요가 있다.

기존의 분산자원 설계를 위한 프로그램 개발 관련 선행 연구들을 조사하였을 때, 신재생발전소의 설계, 시뮬레이션 및 용량산정을 위한 소프트웨어 개발 논문[12]과 마이크로그리드를 위한 계획 설계 및 기술 경제성 평가 소프트웨어 개발 논문[13], 상용 프로그램인 HOMER(Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources)가 있었다. 이러한 프로그램들은 특정 목적이나 분산자원을 위한 설계 프로그램이었으며, HOMER는 외국 상용 프로그램으로 가격이 비싸고 국내 사업모델을 정확하게 시뮬레이션하기가 쉽지 않았다. 또한 본 논문에서 제시하고자 하는 국내 사업모형별 분산자원 설계 절차와 수익모형을 정리하여 비교분석한 논문은 없었다.

본 논문에서는 국내의 정책과 사업모형별 수익모형을 정의하였고 PV-ESS의 최적 모형 및 용량을 설계할 수 있는 프로그램인 MODDER(Modeling and Design of Distributed Energy Resources, MODDER)를 제안하고자 한다. 사례연구에서는 제안 프로그램에 대한 효용성을 입증하기 위하여, 국내 산업용 수용가를 대상으로 PV-ESS를 수요관리사업과 신재생에너지 발전판매사업 두 가지 운영방법을 모의하여 그 경제성을 분석하였다.

2. PV-ESS 사업모델

본 장에서는 국내 에너지정책 하에서 PV-ESS를 이용한 사업모델 중 수요관리사업, 신재생에너지 발전판매사업 각각의 사업모델별로 정의와 수익구조도를 설명하고 수익모형과 설계 절차를 설명한다.

2.1 수요관리사업

수요관리 사업모델은 계통에 연계된 수용가가 전기요금을 절감할 목적으로 PV-ESS를 운영하는 경우를 의미한다. PV-ESS에 대한 수요관리 사업모델의 수익모형을 아래의 그림 1과 같이 도식화하였다. PV에서 생산된 발전량은 부하에 공급하여 전기요금을 절감하고 ESS는 PV의 잉여발전량이나 시간별 요금단가가 낮을 때 충전하였다가 전기요금단가가 높을 때 방전하여 발생하는 전력량요금 절감 수익을 얻을 수 있다. 또

한 피크부하시 PV발전량이나 ESS방전을 통하여 기본요금 절감 수익을 얻을 수 있다.

2.1.1 수요관리사업 수익모형

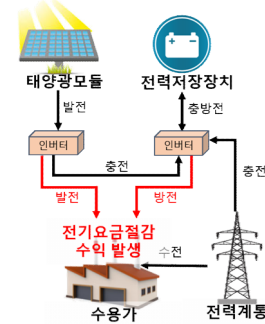


그림 1 수요관리 사업모델의 수익구조도

Fig. 1 Revenue Diagram of Business Model(BM) for Demand Side Management (DSM)

그림 1을 이용하여 수요관리용 PV-ESS의 수익 계산식을 정의하면 아래의 식 (1)~(3)과 같이 시간대별로 계산식이 적용된다. 수요관리 수익은 전력량요금 절감 수익, 기본요금 절감 수익, ESS 특별할인제도에 따른 수익을 더하여 계산하며, 특별할인제도는 기본요금할인, 전력량요금할인, ESS 배터리용량비율에 따른 할인이 있다. 중간의시간대는 식 (1)로, 정부하 시간대는 식 (2)로, 최대부하시간대는 식 (3)으로 계산되며 시간별 수익을 합하여 일간 수익을 식 (4)로 계산할 수 있다. 피크부하를 저감할 수 있는 경우 기본요금 절감수익은 PV-ESS 출력을 이용하여 피크저감 가능한 용량에 기본요금단가를 곱하고 월별일수로 나누어 계산할 수 있으며(R_{peak}), 일간 수익에 더하여 고려할 수 있다.

i) i 가 중간의 시간대일 경우 시간별 수익은 아래의 식과 같이 수익이 계산된다.

$$R_i = (P_{PV,i} - P_{ESS,i}) \times R_{unit,i} \quad (1)$$

ii) i 가 정부하 시간대일 경우, 충전요금이 50%할인되어 아래의 식과 같이 계산된다.

$$R_i = (P_{PV,i} - 0.5 \times P_{ESS,i}) \times R_{unit,i} \quad (2)$$

iii) i 가 최대부하 시간대일 경우, ESS의 방전량에 따라 기본요금이 할인되며 아래의 식과 같이 계산된다.

$$R_i = (P_{PV,i} - P_{ESS,i}) \times R_{unit,i} + (-P_{ESS,i} \times R_{bas}) / (3 \times m) \quad (3)$$

$$R_d = \sum_{i=1}^{24} R_i + R_{peak} / m \quad (4)$$

여기서, R_i : i 시간의 PV-ESS 수익

- $P_{PV,i}$: i 시간의 PV 발전량(i : 1~24)
 $P_{ESS,i}$: i 시간의 ESS 출력(충전 양수, 방전 음수)
 $R_{unit,i}$: i 시간의 전력량요금단가
 R_{bas} : 기본요금단가
 m : 해당월 평일 일수
 R_{peak} : 기본요금 절감 수익
 R_d : d 일의 수요관리용 PV-ESS 수익

PV-ESS 운영 모의를 위하여 아래와 같이 ESS운전계획 최적화 모형을 구성하였다. 목적함수로 식 (4)의 일간 전기요금 절감 수익을 최대화하도록 각 제약조건에 맞는 ESS 운전계획을 최적화하여 수익을 계산하였다[10].

- 목적 함수 : 일간 전기요금 절감 수익 최대화 $Maximize(R_d)$
- 변수 : $P_{ESS,i}$
- 제약 조건 : $SOC_{min} \leq SOC_i \leq SOC_{max}$

$$-P_R \leq P_{PCS,i} \leq P_R$$

$$0 \leq P_{PCC,i} \leq L_{Peak}$$

여기서, SOC : State of Charge, 전지의 충전상태

P_R : PCS 정격출력

$P_{PCS,i}$: i 시간의 PCS 출력

$P_{PCC,i}$: i 시간의 수전전력 출력

L_{Peak} : 최대부하상한

2.1.2 수요관리사업 설계 절차

수요관리사업 설계 절차는 수용가 정보 입력, 요금제 선택, 부하데이터 저장, PV 및 ESS 종류 선택, 운전방법 선택, 경제성분석 파라미터 입력의 7단계로 구성되어 있으며 아래와 같이 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

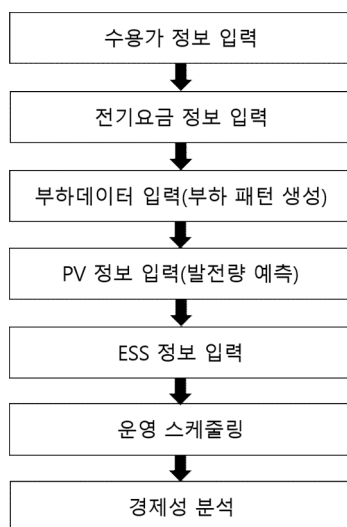


그림 2 수요관리사업 설계 절차

Fig. 2 Process to use DSM BM for economic analysis

첫 번째, 수용가 정보 입력에서는 해당 수용가명을 입력하고 지역, 해당연도, 구성요소를 선택한다. 두 번째, 요금단가 입력에서는 전기요금제를 선택하고 계약전력을 입력한다. 전기요금단가는 수동으로 입력가능하다. 세 번째, 부하패턴을 저장한다. 수동으로 입력하거나, 용도별 패턴을 불러오거나, iSmart¹⁾ 사이트의 로그인 정보를 입력하면 지난 1년간의 전력사용량을 복사하여 패턴을 만들도록 구현하였다. 네 번째, PV 정보입력에서는 PCS(Power Conditioning System)효율, 경사각, 설치위치, PV종류를 선택하여 월별 PV발전패턴을 생성한다. 다섯 번째, ESS 정보입력에서는 ESS의 종류를 선택하고 SOC 제한, 충방전효율, cycle에 따른 용량감소율을 입력한다. 여섯 번째, ESS의 운전 모의는 2.1.1절의 수익모형을 이용하여 전기요금절감수익 최대화를 목적함수로 하는 최적화 기반 스케줄러를 선택하여 수익을 계산한다. 마지막으로, 경제성 분석에서는 투자비 단가, 용량범위, 경제성분석 파라미터를 입력하고 경제성분석을 실행하고 결과를 조회한다.

2.2 신재생에너지 발전판매사업

신재생에너지 발전판매사업(이하 발전판매사업) 모델은 PV-ESS를 설치하고 발전된 전기를 전력거래소에 판매하는 목적으로 운영하는 경우를 의미한다. 발전판매사업 수익구조를 아래의 그림 3과 같이 도식화하였다. 본 모형의 수익은 PV에서 생산된 발전량을 계통에 바로 판매하거나 ESS로 저장하였다가 계통에 판매하여 얻는 발전량 판매 수익이다. 여기서, PV 발전량을 10시부터 16시까지 ESS로 충전하여 이외의 시간에 방전할 경우 REC 판매 가중치를 더 받을 수 있다.

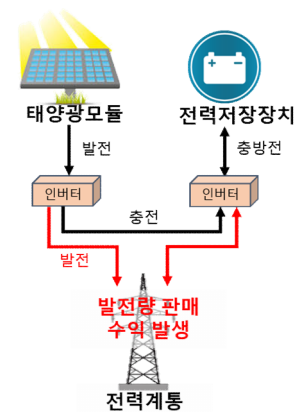


그림 3 신재생에너지 발전판매 사업모델의 수익구조도

Fig. 3 Revenue Diagram of BM for Renewable Energy Generation Sale

2.2.1 발전판매사업 수익모형

그림 3을 이용하여 발전판매사업용 PV-ESS의 경제성 분석을 위한 수익 계산식을 정의하면 아래와 식 (5)~(7)로 나타낼

1) 한국 전력회사 전력사용량 정보 제공 사이트(<https://pccs.kepco.co.kr/iSmart/>)

수 있으며 일간 SMP와 REC 수익을 각각 산정할 수 있다.

$$R_{SMP,d} = \sum_{i=1}^{24} (P_{PV,i} - P_{ESS,i}) \times C_{SMP,i} \quad (5)$$

$$R_{REC,m} = \sum_{d=1}^{30} \sum_{i=1}^{24} (P_{PV,d,i} - P_{charge,d,i}) \times C_{REC,m} \times \omega_{PV} \quad (6)$$

$$+ \sum_{d=1}^{30} \sum_{i=1}^{24} (P_{dischar,d,i}) \times C_{REC,m} \times \omega_{ESS}$$

$$R_{REC,d} = R_{REC,m} / N_m \quad (7)$$

여기서, $R_{SMP,d}$: d일의 SMP 판매 수익

$R_{REC,m}$: m월의 REC 판매 수익(m : 1~12)

$C_{SMP,i}$: i시간의 SMP 판매 단가[원/kWh]

$C_{REC,m}$: m월의 REC 판매 단가[원/MWh]

$P_{charge,i}$: i시간의 ESS 충전량

$P_{dischar,i}$: i시간의 ESS 방전량

ω_{PV} : PV의 REC 가중치

ω_{ESS} : PV 연계형 ESS의 REC 가중치

$R_{REC,d}$: d일의 REC 판매 수익(d : 1~30)

N_m : m월의 월별일수

발전판매사업용 PV-ESS 운영 모의를 위하여 아래와 같이 ESS운전계획 최적화 모형을 구성하였다. 목적함수로 식 (5)와 (7)을 더하여 일간 발전판매수익을 최대화하도록 ESS 운전계획을 최적화하여 수익을 계산하였다[11]. 10시~16시 사이에 PV의 발전량을 ESS로 충전하고 이외에 시간에 방전하도록 제약조건을 설정하였다.

- 목적 함수 : 발전판매수익의 최대화 $Maximize(R_{SMP,d} + R_{REC,d})$

- 변수 : $P_{ESS,i}$

- 제약 조건 : $SOC_{min} \leq SOC_i \leq SOC_{max}$

if $i=10\sim16$, $0 \leq P_{PCS,i} \leq Min(P_R, P_{pv,i})$

if $i=17\sim24$, $-P_R \leq P_{PCS,i} \leq 0$

2.2.2 발전판매사업 설계 절차



그림 4 신재생에너지 발전판매사업 설계 방법

Fig. 4 Process to use Renewable Energy Generation Sale BM for economic analysis

발전판매사업 설계절차는 사업자 수용가정보 입력, 판매단가 선택, PV 및 ESS 종류 선택, ESS 운전방법 선택, 경제성분석 실행의 여섯 단계로 구성되어 있으며 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

수요관리사업 설계절차 그림 2와 비교하였을 때 발전판매사업 설계절차는 부하 입력이 없고 요금단가 대신 판매단가를 입력하도록 구성되었다. 다섯 번째, ESS의 운전 스케줄 모의에서는 2.2.1절의 수익모형을 이용하여 판매수익 최대화를 목적함수로 하는 최적화 기반 스케줄러를 선택하여 수익을 계산하고 경제성을 분석한다.

3. 분산자원 설계 프로그램(MODDER)

본 장에서는 사용자가 분산자원을 설치하고자 할 때, 최적 사업모델 및 용량을 설계할 수 있도록 개발한 프로그램인 MODDER 프로그램을 제안하고자 한다.

MODDER 프로그램의 메인 화면은 그림 5와 같고 상단의 메뉴 중 모형설계를 클릭하면 수요관리 사업모형, 신재생발전 판매 사업모형 중 원하는 사업모형을 선택할 수 있다. 사업모형을 선택하면 그림 2와 그림 4에서 설명하였던 설계 절차에 따라 입력이 진행된다. 본 장에서는 먼저 MODDER 프로그램의 개발프로세스를 살펴보고 각각의 기능들을 설명하고자 한다.

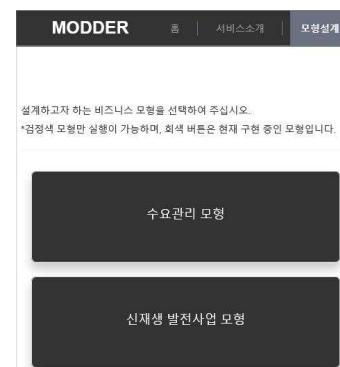


그림 5 MODDER 홈페이지 사업모형 선택화면

Fig. 5 BM design page of MODDER site

3.1 MODDER 개발 프로세스

MODDER 프로그램은 그림 6과 같이, 파라미터 입력 및 패턴 생성, 모의 시뮬레이션을 통한 수익계산, 최적 사업모델 및 용량 선정의 3단계로 구분할 수 있다.

1단계, 파라미터 입력 및 패턴 생성에서는 운영 모의 시뮬레이션에 필요한 부하 또는 신재생발전량패턴을 생성하고 PV와 ESS 각각의 특성정보를 입력한다. 또한 가격정보와 전기요금단가 또는 판매단가 등의 경제성분석을 위한 단가 정보와 파라미터를 입력한다. 설계하고자 하는 정보를 모두 입력한

후 후보용량을 선택하여 다음단계로 진행한다.

2단계, 모의 시뮬레이션을 통한 수익계산에서는 선택한 모형에 따른 수익모형을 이용하여 운전계획 최적화하여 운영 모의를 실행한다. 운영 모의에 따른 수익을 계산하고, 1단계에서 입력한 단가를 이용하여 경제성분석 지수인 내부수익률 (Internal rate of return, IRR), 투자비회수기간, 누적수익을 산정한다. 이를 사업모델과 후보용량별로 반복한다.

3단계, 사업모델별 후보용량에 따른 경제성 결과를 이용하여, 대상 수용가의 경제성이 좋은 사업모델을 선택하고 그 사업모델의 후보용량 중 가장 경제성이 높은 용량을 최적용량으로 산정한다.

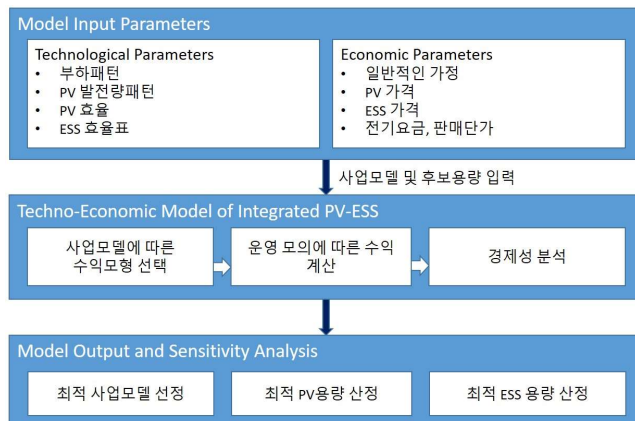


그림 6 MODDER 개발 프로세스

Fig. 6 Development process of MODDER program

제안 프로그램의 특징 및 장점은 아래와 같다.

- 분산자원 설계를 위한 데이터 및 정보들을 한 프로그램에 저장하여 활용할 수 있다.
- 국내 사업모델에 따라 설계절차와 수익모형을 제안하였다.
- 국내 사업모델에 따른 수익을 비교하여 최적 사업모델을 선택할 수 있다.
- 요금제나 판매단가를 수동으로 입력할 수 있어 제도변화에 유연하게 대응할 수 있다.

3.2 MODDER 기능 설명

분산자원을 설계하기 위하여 MODDER에는 여러 가지 기능들이 모듈로 구현되었다. 필요한 정보들을 저장하고 불러오는 데이터베이스 구축 및 사용 기능, 발전패턴 또는 부하패턴 등을 예측하는 패턴생성기능, ESS와 같은 제어 가능한 전원의 운전계획 최적화 기능, 수익 및 투자비를 계산하는 경제성분석 기능 등이 있으며 각 모듈을 간단히 설명하고자 한다. 이러한 기능을 조합하여 사업모델 설계절차를 구성하였다.

3.2.1 데이터베이스(Database, DB) 사용 기능

분산자원 설계하고자 할 때 기상정보, 단가정보, 부하정보와 같은 고려해야할 데이터가 다양하므로 연도별 데이터베이스

구축이 필요하다. 분산자원 설계를 위한 필요한 데이터 항목 및 용도를 정리하면 아래의 표 1과 같다. 아래와 같이 데이터베이스를 구축하였고 설계를 진행하면서 필요시 불러오거나 선택할 수 있도록 구현하였다.

표 1 MODDER의 구축된 데이터 항목 및 용도

Table 1 Data List and Using for Design of DER

분류	데이터 항목	출처 기관명	용도
기상 정보	일사량	기상청 (www.kma.go.kr)	PV발전패턴 예측
	남중고도	천문우주지식정보 (https://astro.kasi.re.kr)	
단가 정보	전기요금단가	한국전력공사 사이버지점 (cyber.kepco.co.kr)	전기요금 절감 수익 계산
	SMP	한국전력거래소 (www.kpx.or.kr)	발전판매 수익 계산
	REC		
부하 정보	통계적 패턴 (산업용, 교육용, 일반용)	통계청 (kostat.go.kr)	부하패턴 예측

표 1의 각각의 데이터는 해당 공공기관들의 홈페이지에서 매년 업데이트하여 갱신한다. 일사량데이터는 기상청에서, 남중고도데이터는 천문과학연구원 사이트에서 다운로드 연도별로 저장하였다. 전기요금단가는 한국전력공사 사이버지점 사이트에서, 판매요금 단가는 한국전력거래소 사이트에서 다운로드 연도별로 저장하여 데이터베이스를 구축하였다. 부하데이터는 통계청에서 제공하는 산업용, 교육용, 일반용의 계절별 전력사용량 평균값을 저장하였다. 또한 수용가에 맞는 전기요금단가, 판매요금단가, 부하패턴, 신재생에너지 발전량패턴이 없을 경우 수동으로 입력이 가능하도록 구현하였다.

3.2.2 패턴 생성 기능

패턴 생성 기능은 부하 패턴과 PV 발전량 패턴 생성에 적용된다. 부하패턴 생성은 그림 7과 같이, 고압수용가의 경우 전력회사의 전력관리시스템(iSmart)의 수용가 로그인 정보를 입력하면 자동으로 1년 전의 사용량 및 부하데이터를 저장할 수 있고, 이를 바탕으로 매월의 근무일, 토요일, 공휴일, 최대 부하일로 분류되고 월별 평균 부하패턴을 생성하도록 구현하였다. 저압수용가인 경우 iSmart 계정없음 항목에 체크하면 미리 저장된 용도별 부하 패턴을 불러올 수 있고 여기에 평균부하를 곱하여 부하패턴을 생성할 수 있다. 또한 수동 입력을 클릭하여 직접 부하패턴을 엑셀파일로 입력할 수 있다.

PV 발전량 패턴 생성 기능은 PV종류, PCS효율, 경사각, 설치지역을 입력하면 저장된 해당지역의 과거 일사량 데이터를

이용하여 월별 평균 PV 발전패턴이 생성된다. PV 정보 입력 화면은 그림 8과 같다.

그림 7 iSmart 부하데이터 저장 화면
Fig. 7 Load data download page

그림 8 PV 발전정보 입력 화면
Fig. 8 Input page for information of PV

3.2.3 운전계획 최적화 기능

운전계획 최적화 기능은 앞서 설명한 수요관리모형(2.1.1)과 발전판매사업(2.2.1)의 수익모형을 프로그램화하여 수유가 정보와 PV-ESS 파라미터들을 입력하고 ESS의 운전계획을 최적화하여 운영 모의하는 기능이다. 수요관리용 운전계획은 그림 9와 같이 선택하여 최적화를 실행할 수 있다.

그림 9 수요관리 모형 운전계획 선택 화면
Fig. 9 ESS Scheduler method selection page

3.2.4 경제성분석 기능

경제성분석 기능에서는 투자비단가 입력, 용량범위 입력, 경제성분석 파라미터를 입력하고 경제성분석을 실행하고 결과를 조회할 수 있다. 투자비 단가입력은 그림 10과 같이 입력하며, 설비비는 각각의 발전기 또는 구성요소의 제품구매비용을 의미하고 설치비는 설치부지비용, 공사비용, 통신연결 및 테스트 비용 전체를 의미한다.

PV 비용	설비비	1000	천 원/kW
	설치비	500	천 원/kW
ESS 비용	Battery	400	천 원/kWh
	PCS	230	천 원/kW
	EMS *	100	천 원
	설치비 **	100	천 원/kW

* ESS의 EMS 가격은 단위용량이 아닌 전체 EMS 비용을 의미합니다.
** ESS의 설치비는 PCS 정격용량당 단가를 의미합니다.

그림 10 분산자원 설비별 단가표 입력 화면
Fig. 10 Capital cost input page

용량범위입력은 아래의 그림 11과 같이 입력하며, PV용량과 PCS정격용량, 전지용량에 대한 각각의 후보용량을 3개 이하로 입력가능하다. 입력된 후보용량의 조합은 모든 경우의 수에 대하여 모의된다. 계획하는 용량이나 설치부지, 보유 예산에 맞는 용량 범위를 선택하여 입력하여야 하고 경제성 분석 결과에 따라 증감하여 재입력하여 최적 용량 산정이 가능하다.

번호	PV 정격용량 후보	
1	50	kW
2	100	kW
3		kW

번호	PCS 정격용량 후보		전지용량 후보	
1	250	kW	500	kWh

그림 11 분산자원의 후보용량 범위 입력 화면
Fig. 11 Input page of Capacity Candidates

경제성분석에 필요한 파라미터는 할인율, 유지관리비, 전기요금단가 또는 판매단가 증가율, 분산자원 설비 용량감소율

등이 있다. 경제성분석의 실행버튼을 실행하면 PV-ESS운영을 모의하고 수익이 계산된다. 최종적으로 그림 12와 같이 후보 용량별 경제성분석 결과표를 조회하여 최적 용량을 선택할 수 있다.

경제성분석 결과조회									
조회	조회	조회	조회	조회	조회	조회	조회	조회	조회
후보	PCS	Battery	설비	유지보수비	전력요율계산	기분유급	충전유급	기본유급	후방전

그림 12 후보용량별 경제성분석 결과 화면

Fig. 12 Results page of Economic Analysis of Capacity Candidates

4. 시뮬레이션 결과 분석

제안한 프로그램의 효용성을 입증하고자 PV-ESS의 수요관리 모형과 발전판매사업 모형에 대한 설계 시뮬레이션을 각각 실행하고 이에 대한 결과를 분석하고자 한다. 설치위치는 경남 창원지역 피크부하 8.8MW의 산업용수용가를 대상으로 하였고 분산자원을 설치할 부지는 확보되었다고 가정하였다.

4.1 수요관리 모형 시뮬레이션

수요관리를 목적으로 PV-ESS를 설계하고자 하는 수용가를 대상으로 표 2와 같이 대상 수용가의 정보, 설치하고자 하는 PV와 ESS의 정보를 입력하였다.

표 2 수용가 및 분산자원 정보

Table 2 Customer & Distributed Energy Resource Information

수용가 정보	수용가 용도	산업용
	대상연도	2019년
	계약전력[kW]	25,000
	최대부하[kW]	8,807
PV 정보	요금제	Industrial Service(B) High Voltage A Option II
	PCS 효율[%]	95
	경사각[도]	40
	설치지역	경남 창원시
ESS 정보	PV종류	고정식
	전지종류	리튬이온전지
	SOC범위[%]	30~70
	Cycle 효율	3,500회 충방전시 가용용량 80%로 감소

해당수용가는 2019년 평일 근무시간대 평균부하가 3,967kWh였고 계약전력이 25MW로 매우 컸다. PV는 창원지역의 기상청 일사량 정보를 이용하여 예측하였고, ESS는 리튬이온전지를 사용한다고 가정하였다. iSmart 로그인정보를 이용하여 2019년 전력사용량을 다운받아서 월별 부하패턴을 입력하여 산정한 월별 근무일 부하패턴은 그림 13과 같았고, 창원

기상청 정보를 이용하여 산정한 PV 월별발전패턴은 그림 14와 같았다.

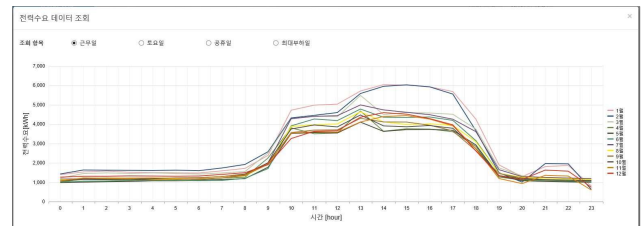


그림 13 근무일 월별 평균부하패턴 그래프

Fig. 13 Load pattern graph of work days

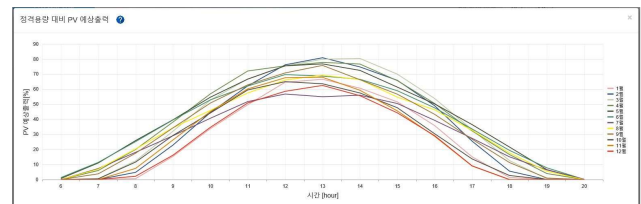


그림 14 월별 태양광발전 패턴 그래프

Fig. 14 Monthly PV generation pattern graph

경제성분석 화면에서 표 3과 같이 투자비를 입력하고, 표 4와 같이 후보용량 범위를 임의로 선정하였고, 표 5와 같이 경제성분석에 필요한 파라미터들을 입력하여 경제성분석을 실행하였다.

표 3 분산자원 투자비

Table 3 Investment cost Information

PV	설비비용[천원/kW]	1,000
	설치비용[천원/kW]	500
ESS	전지[천원/kWh]	400
	PCS[천원/kW]	230
	EMS[천원/kW]	100
	설치비용[천원/kW]	100

표 4 PV와 ESS 설비의 후보용량 범위

Table 4 Capacity Candidates of PV and ESS

No.	PV [kW]	PCS [kW]	Battery [kWh]
1	100	250	500
2	200	500	1,000
3	300		

표 5 경제성분석 정보

Table 5 Economic Analysis Information

할인율[%/년]	4.5
전기요금 인상률[%/년]	3
PV출력 저감률[%/년]	0.7
유지보수비율[%/년]	1

표 6 수요관리사업시 후보 용량별 경제성분석 결과

Table 6 Economic Analysis Results for DSM BM

Case No.	PV [kW]	PCS [kW]	Battery [kWh]	설비비 [천원]	유지보수비 [천원]	총 수익 [천원]	투자비회수기간 [년]	IRR [%]
1	300	250	500	832,500	166,500	1,335,680	12.17	8.33
2	300	250	1,000	1,032,500	206,500	1,548,464	13.06	7.43
3	300	500	500	915,000	183,000	1,334,323	14.22	6.83
4	300	500	1,000	1,115,000	223,000	1,597,733	14.05	6.73
5	200	250	500	682,500	136,500	978,840	14.30	6.67
6	200	250	1,000	882,500	176,500	1,191,624	15.52	5.81
7	200	500	1,000	965,000	193,000	1,240,893	17.09	5.03
8	200	500	500	765,000	153,000	977,483	17.70	4.89
9	100	250	500	532,500	106,500	622,000	>20	3.48
10	100	250	1,000	732,500	146,500	834,784	>20	2.98
11	100	500	1,000	815,000	163,000	884,052	>20	2.10
12	100	500	500	615,000	123,000	620,643	>20	1.25

MODDER를 이용하여 산정된 경제성분석 결과는 표 6과 같았다. 이는 후보용량별 모든 경우의 수인 12개의 케이스에 대한 경제성 결과를 이며 IRR이 높은 순서대로 정렬한 결과이다. 여기서, 총 수익, IRR, 유지보수비의 결과는 PV-ESS를 20년간 운영가능하다고 가정하여 누적된 결과이다.

4.2 발전판매사업 모형 시뮬레이션

발전판매사업을 목적으로 PV-ESS를 설계하고자 하는 발전사업자를 대상으로 발전판매사업 모형 시뮬레이션을 수행하였다. 아래의 표 7과 같이 대상 수용가의 정보를 입력하였으며, 수요관리모형과 동일하게 PV정보, ESS정보, 투자비 단가를 입력하여 발전판매사업용 PV-ESS 설계를 진행하였다. PV와 ESS 후보용량을 표 4와 같이 선정하였고 경제성분석 파라미터를 표 8과 같이 입력하여 경제성분석을 실행하였다.

표 7 수용가 및 분산자원 정보

Table 7 Customer Information

수용가 정보	대상연도	2019년
	전지종류	리튬이온전지
PV 정보	PCS 효율[%]	95
	경사각[도]	40
	설치지역	경남 창원시
	PV종류	고정식
ESS 정보	전지종류	리튬이온전지
	SOC범위[%]	30~70
	Cycle 효율	3,500회 충방전시 가용용량 80%로 감소

표 8 경제성분석 정보

Table 8 Economic Analysis Information

할인율[%/년]	4.5
SMP요금 인상율[%/년]	3
REC요금 인상율[%/년]	3
PV REC가중치	0.7
ESS REC가중치	5
유지보수비율[%/년]	1

MODDER를 이용하여 산정된 경제성분석 결과는 아래의 표 9와 같다. 분석결과는 IRR이 높은 순서대로 정렬하여 나타내었으며 용량후보에 따른 Case번호는 표 6과 동일하다.

4.3 사업모형 결과분석 및 비교

MODDER 프로그램에서, 산업용 수용가에서 수요관리 또는 발전판매사업을 목적으로 PV-ESS를 설계하는 경우를 대상으로 각각 PV-ESS 설계를 실행하였다. 수요관리모형을 시뮬레이션 한 결과, 표 6에서와 같이 대상 수용가에서 가장 경제성이 좋은 용량은 PV 300kW, ESS 250kW-500MWh이었다. 즉, PV용량이 클수록 PCS용량이 클수록, 전지 용량이 작을수록 경제성이 있었다. PV발전량보다 부하가 충분히 크므로 PV발전량은 대부분 부하로 공급될 수 있으며 PV용량이 증가함에 따라 경제성이 좋아지는 이유는 PV 투자비 대비 전기요금절감 수익이 상대적으로 높아 경제성이 있다는 의미이다. 전지 용량이 작을수록 경제성이 좋은 이유는 ESS가 투자비 대비 수익이 발생하지 않는다는 의미이며, 이는 현재 적용되고 있는 ESS 특별할인요금제와 같은 인센티브 적용기간이 더욱 연

표 9 발전판매사업시 후보용량별 경제성 분석 지수 결과

Table 9 Economic Analysis Results of Generation Power Sale BM

Case No.	PV [kW]	PCS [kW]	Battery [kWh]	설비비 [천원]	유지보수비 [천원]	총 수익 [천원]	투자비회수기간 [년]	IRR [%]
2	300	250	1,000	1,032,500	206,500	2,319,876	7.5	14.1
1	300	250	500	832,500	166,500	1,824,887	8.1	13.3
4	300	500	1,000	1,115,000	223,000	2,319,754	8.2	12.7
6	200	250	1,000	882,500	176,500	1,806,852	8.2	12.6
5	200	250	500	682,500	136,500	1,386,834	8.7	12.2
3	300	500	500	915,000	183,000	1,824,845	9.1	11.7
7	200	500	1,000	965,000	193,000	1,806,852	9.3	11.0
8	200	500	500	765,000	153,000	1,386,834	10.1	10.2
9	100	250	500	532,500	106,500	903,426	10.7	9.3
12	100	500	500	615,000	123,000	903,426	13.4	7.0
10	100	250	1,000	732,500	146,500	977,503	15.9	5.5
11	100	500	1,000	815,000	163,000	977,503	>20	4.0

장되어야 ESS의 경제성이 있을 것으로 분석된다.

다음으로 창원지역에서 신재생에너지 발전량을 판매할 목적으로 PV와 ESS를 설계하는 경우를 대상으로 발전판매사업모형을 MODDER 프로그램에서 실행하였다. 표 7과 같이 MODDER에 입력정보를 선택하고 동일한 후보용량을 입력하여 발전판매사업모형을 시뮬레이션 한 결과, 표 9의 경제성분석 결과를 얻었다. 대상 수용가에서 가장 경제성이 좋은 용량은 PV 300kW, ESS 250kW-1MWh이었다. 발전판매사업은 PV의 용량에 따라 경제성이 급격하게 차이가 났다. 발전판매사업모형은 PV 발전량으로 ESS를 충방전하고 이때 REC가중치를 2019년 기준 5배를 주기 때문에 PV용량이 커질수록 ESS수익이 급격하게 증가하기 때문인 것으로 분석된다. PCS용량은 PV용량과 비슷할수록, 전지용량은 PCS 정격의 4배일 때 경제성이 가장 높았다. 즉, PV 300kW일 때 발전량을 저장하여 REC 가중치를 많이 받을 수 있는 적합한 용량은 ESS 250kW-1MWh인 것으로 판단된다. PV-ESS를 대상으로 수요관리모형과 발전판매사업모형의 경제성을 비교하기 위하여 Case에 따른 IRR을 비교하면 그림 15와 같다.

그림 15의 그래프와 같이 현재 제도에서 해당수용가가 PV-ESS를 설치하고자 할 때 수요관리 모형보다 발전판매사업모형이 경제성이 높았다. 한편, 해당 산업용 수용가의 계약전력을 25MW에서 10MW로 낮출 경우 기본요금절감수익이 커져 수요관리모형의 경제성이 증가하였다. 발전판매사업모형의 후보용량별 경제성은 PV용량과 ESS용량의 조합이 중요하였고 PV용량과 PCS용량이 일치하면서 PCS용량대비 전지용량이 4배인 경우에 가장 경제성이 좋았다.

본 결과는 2019년 기준 인센티브제도나 판매가격제도 아래

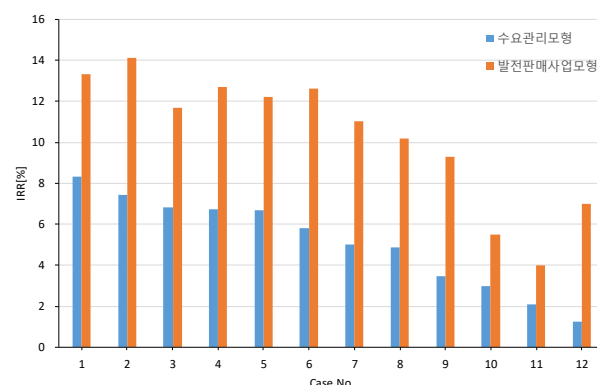


그림 15 수익모형별 IRR 비교

Fig. 15 Comparison of IRR between DSM BM and Generation Power Sale BM

에서 나온 결과이며, ESS할인요금제와 같은 인센티브가 점차 줄어들고 있고 REC 판매단가나 가중치가 계속 하락하고 있는 추세이므로 이후 경제성은 계속 떨어질 것으로 전망된다. 따라서 PV-ESS 설치를 장려하기 위해서는 ESS 특별할인요금제 연장 또는 REC단가가 증가해야할 것으로 판단된다. 이처럼 설치하고자 하는 PV-ESS에 적합한 사업모형과 가장 높은 수익의 운영용량을 찾을 수 있었으며, 제안한 프로그램을 이용하여 PV-ESS 설계시 변화하는 에너지정책에 맞추어 최적의 사업모형을 판단하는데 효용성이 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 PV-ESS를 설치하고자 할 때 최적의 사업모형과 용량을 산정할 수 있는 분산자원 설계 프로그램

MODDER를 제안하였다. 국내 사업모델별 수익모형과 설계절차를 설명하고, 제안 설계 프로그램의 개발 프로세스 및 주요 기능에 대하여 설명하였다.

실제 산업용 수용가를 대상으로 PV-ESS를 수요관리와 발전판매사업을 목적으로 설계한다고 가정하여 MODDER 프로그램을 실행하여 분석하였고 그 결과, 가장 경제성이 좋은 용량은 발전판매사업시 PV 300kW, ESS 250kW-1MWh인 경우였고 20년간 운영시 IRR은 14%이고 투자비회수기간은 7.5년이 될 것으로 계산되었다. 해당 수용가는 전체 후보용량에서 수요관리 모형보다 발전판매사업 모형의 경제성이 더 좋았는데, 그 이유는 해당 수용가가 계약전력이 커 피크저감을 하지 못해 기본요금 절감 수익이 없었던 영향이 컸을 것으로 분석된다. 현재 에너지정책의 동향을 보았을 때 ESS특별할인제도의 인센티브가 점점 줄어들고 있고 REC 단가나 가중치가 계속 하락하여 PV-ESS를 위한 지원 정책은 계속 줄어들고 있으며, 변화하는 에너지정책이나 수용가의 상황에 따라 경제성분석 결과는 계속 달라질 것으로 예상된다.

제안 프로그램은 이러한 변화하는 에너지정책에 맞추어 PV-ESS의 최적 사업모델과 최적 용량을 선정하는데 활용할 수 있으며, 투자비가 높은 PV-ESS의 투자위험을 최대한 낮추고 수익을 최대화하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 프로그램에 저장된 데이터와 구현된 기능들을 이용하여 비전문가들도 PV-ESS 설계를 편리하게 진행할 수 있어 PV-ESS 보급 확대를 통해 전력계통 출력변동성 완화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

차후 논문에서는 열부하를 고려하거나 연료전지를 추가하는 등 기능들을 확대해 나갈 계획이며, 변화하는 정책 및 시장에 맞는 사업모형을 추가하여 구현하고 분석 결과를 발표할 예정이다.

Acknowledgements

This research was supported by Korea Electrotechnology Research Institute (KERI) primary research program through the National Research Council of Science & Technology (NST) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Republic of Korea (No. 20A01057).

References

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, "The third Energy Master Plan," 2019.
- [2] K. B. Kim and H. K. Jung, "Direction of R & D investment in electric power sector based on government's energy conversion policy," KISTEP Issue Weekly, Korea, Oct. 2018.
- [3] J. H. Son, "A Study on Economic Analysis Algorithm for Energy Storage System Considering Peak Reduction and a Special Tariff," KIEE, vol. 67, no. 10, pp. 1278-1285, Oct.

2018.

- [4] S. Diaf, D. Daif, M. Belhamel, M. Haddidi, and A. Louche, "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system," *Energy Policy*, vol. 35, pp. 5708-18, 2007.
- [5] Y. Hongxing, Z. Wei, L. Chengzhi, "Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system," *Applied Energy*, 86, pp. 163-9, 2009.
- [6] S. Bahramirad, W. Reder, and A. Khodaei, "Reliability-Constrained Optimal Sizing of Energy Storage System in a Microgrid," *IEEE Transaction on Smart grid*, vol. 3, no. 4, Dec. 2012.
- [7] H. Turker and P. Favre-Perrod, "Management, optimal sizing and technical-economic analysis of batteries for constant production in photovoltaic systems," 5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, UK, Nov. 2016.
- [8] J. Hoppmann, J. Volland, T. Schmidt, and V. Hoffmann, "The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems-A review and a simulation model," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, 2014.
- [9] E. Y. Ko, J. H. Baek, T. H. Kang, D. H. Han, and S. H. Cho, "Determining the Optimal Capacities of Distributed Generators Installed in A Stand-alone Microgrid Power System", *KIEE*, vol. 65, no. 2, Feb. 2016.
- [10] K. H. Cho, S. K. Kim, and E. S. Kim, "Optimal capacity determination method of battery energy system for demand management of electricity customer," *KIEE*, vol. 62, no. 1, 2013.
- [11] K. H. Cho, S. K. Kim, E. S. Kim, and J. H. Park, "Optimal sizing of the ESS for economic advantage of PV-ESS generation," *BIONATURE*, 2017.
- [12] D. T. Nega, G. S. Tibba, A. V. Ramayya, and B. G. H. Mariam, "Software Development for Design, Simulation and Sizing of Parabolic Trough Solar Thermal Power Plant," *AFRICON* 2015, Sept. 2015.
- [13] X. Lin, N. Liu, and J. Lei, "Design and Implementation of a Visio-Based Planning-Design and Techno-Economic Evaluation Software for Microgrid," 2016 11th ICIEA, pp. 1853-1857, 2016.

저자소개



Kyeong-Hee Cho

She received the M.S. degree from the Gyeongsang National University, Jinju, South Korea in 2012. She is currently pursuing the Ph.D. degree in department of electrical and computer engineering from Pusan National University, Busan, South Korea. She is also working with Korea Electrotechnology Research Institute, Gwangju, South Korea. Her research interests include renewable energy, energy storage system, energy management system and microgrid design.



Seoul-Ki Kim

He received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from Korea University, Seoul, Korea, in 1998, 2000, and 2010, respectively. He has been working for Korea Electro-technology Research Institute (KERI), Gwangju, Korea, since 2000. Currently, he is a Director-General of Smart Grid Research Division, KERI. His research interests are modeling, control and analysis of distributed generators and microgrid design and operation.



Hyung-Chul Jo

He received B.S. and Ph.D. degrees from Korea University, Seoul, in 2011 and 2017, respectively. He is currently a Senior Researcher in Digital Energy System Research Center at Korea Electrotechnology Research Institute (KERI). His main research interests include research related to energy system operation, using optimization and artificial intelligence.



Wanbin Son

He received M.S. and Ph.D. degrees from Pohang university of science and technology, Pohang, in 2010 and 2014, respectively. He is currently a Senior Researcher in Digital Energy System Research Center at Korea Electrotechnology Research Institute (KERI). His main research interests include research related to prediction, data mining, optimizing program and artificial intelligence.



Eung-Sang Kim

He received the M.S. and PhD from the Soongsil University, Seoul, South Korea in 1991, 1997. He is also working with Korea Electrotechnology Research Institute, Gwangju, South Korea. His research interests include renewable energy, energy storage system, energy management system and microgrid design and operation.



June Ho Park

He received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees from Seoul National University, Seoul, South Korea in 1978, 1980, and 1987, respectively, all in electrical engineering. He is currently a Professor at the School of Electrical Engineering, Pusan National University, Busan, South Korea. His research interests include intelligent systems applications to power systems.