

A Study on the Efficient ESS Charging/Discharging Operation Algorithm in LVDC Microgrid Environment

LVDC 마이크로그리드 환경에서 효율적인 ESS 충방전 운영 알고리즘 연구

Sang-Woo Jung · Yoon-Young An · Ki-Il Kim

정상우* · 안윤영** · 김기일†

Abstract

Modern power systems are developing in a sustainable and energy-efficient direction, and research on intelligent power grids that accommodate new and renewable energy is being actively conducted. Since new and renewable energy-based distributed power generation systems and ESS are output as DC power, the DC microgrid reduces the power conversion step and improves the stability and efficiency of the power distribution network. The core of this study is to compare and analyze the performance of the three charge/discharge operation algorithms based on AI prediction in the LVDC microgrid environment. The AI server learns real-time data through interworking with the EMS to predict future load usage and solar power generation, and performs the charge/discharge operation algorithm of ESS based on the collected ESS state data. This paper presents the configuration of the LVDC microgrid testbed, the integration method between EMS and electrical facilities, and analyzes the performance of the developed ESS charge/discharge operation algorithm. It also evaluates the effectiveness of each operation algorithm through actual operation data and simulation, analyzes how these strategies contribute to system load reduction and energy efficiency improvement, and provides guidelines for selecting the optimal ESS charge/discharge operation algorithm under specific conditions.

Key Words

LVDC, LSTM, Load Forecasting, Machine Learning, ESS, Neural Networks

1. 서론

현대의 전력 시스템에서는 지속 가능성 및 에너지 효율화에 대한 중요성을 강조하는 방향으로 빠르게 진화하고 있다. 이에 따라 태양광 발전 및 풍력 발전과 같은 신재생 에너지를 수용하는 지능형 전력망(Smart-grid)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 신재생 에너지를 기반으로 발전하는 분산 발전 시스템들은 날씨 및 환경에 따라 간헐적으로 발전되므로 전력 수요에 맞춰 운용하기 어렵다. 그러므로 에너지 사용을 효율화하고 계통망의 정전 및 사고에 대비하기 위해 에너지 저장 시스템(ESS, Energy Saving System)의 필요성이 증가하고 있다. 계통 전원뿐 아니라 분산 전원을 이용하여 수용가에 전력 공급을 하는 소규모 전력망인 마이크로그리드는 ESS를 연계하여 보다 효율적으로 운용할 수 있다[1].

본 논문에서는 DC 배전망으로 구성된 DC 마이크로그리드의 효율적 운용에 대해 연구한다. 신재생 에너지 기반의 분산 발전 시스템과 ESS는 DC 전력으로 출력되므로 DC 마이크로그리드로 구축 시 컨버터의 전력 변환 단계를 줄여 AC 마이크로그리드와 비교해 변환 손실을 5% 이상 감소시킬 수 있다[2-4].

마이크로그리드의 안정적 및 효율적 운영을 위해서 ESS 충방전 운영 알고리즘은 매우 중요한 역할을 한다. 충방전 운영 알고리즘은 ESS가 어떻게 전력을 충전하고 방전하는지를 결정하므로 이는 마이크로그리드 운영에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 실제 운영 환경에서 최적의 성능을 확보하기 위해서는 다양한 운영 전략을 실험적으로 평가하고 검증하는 것이 필수적이다.

이 연구의 목적은 LVDC 마이크로그리드 EMS에서 수행하는 ESS 충방전 운영 알고리즘의 효율성과 성능을 평가하고, 다양한 운영 전략의 특징을 분석한다.

† Corresponding Author : Dept. of Computer Science and Engineering, Chungnam National University, Korea.

<https://orcid.org/0000-0002-8366-3533>

* ICT Convergence Standards Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute, Korea.

<https://orcid.org/0000-0002-6349-7515>

** ICT Convergence Standards Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute, Korea.

E-mail: jsw256@etri.re.kr

<https://orcid.org/0000-0001-9109-7220>

Received: Apr. 02, 2024 Revised: Apr. 15, 2024 Accepted: Apr. 24, 2024

본 논문은 다음과 같은 구조로 진행된다. 2장에서는 LVDC 마이크로그리드 테스트베드의 구조를 설명하고 EMS와 전기 설비 간 통합 방법에 대해 살펴본다. 3장에서는 ESS 충방전 운영 알고리즘을 계산하기 위해 부하 사용량과 태양광 발전량을 예측하는 방법에 대해 설명한다. 4장에서는 개발된 ESS 충방전 운영 알고리즘에 대한 상세한 분석과 비교를 제시하고, 5장에서는 실험 결과에 대한 분석을 진행한다. 마지막으로, 6장에서는 연구 결과를 종합하고 미래 연구 방향에 대한 제언을 제시한다.

2. LVDC 마이크로그리드

2.1 LVDC 마이크로그리드 구성

LVDC 마이크로그리드는 1500V 이하의 저전압을 사용하는 소규모 전력망으로 ESS를 포함한 분산형 에너지 자원과 수용가를 효율적으로 통합하여 지능적으로 운영하는 직류 전력 시스템이다. 분산형 에너지 자원을 이용해 전체 전력 계통과 독립적으로 운용할 수 있으며, 일반적으로 계통과 연계되어 동작한다. 본 연구의 LVDC 마이크로그리드 테스트베드에서는 배전망에 전력을 공급하는 계통(Grid)과 분산형 전원인 ESS, PV를 보유하고 있으며 부하의 종류는 DC 수용가, AC 수용가로 구성된다.

본 연구의 LVDC 마이크로그리드 테스트베드는 계통으로부터 전력을 공급받는 계통연계 방식과 계통에 문제 발생 시 마이크로그리드 내부 분산형 에너지 자원들만으로 마이크로그리드를 운영하는 독립운영 방식을 지원하며 상황에 따라 전환이 가능하다. LVDC 마이크로그리드 테스트베드의 구성은 배전망에 전력을 공급하는 계통(Grid)과 분산형 전원인 ESS, PV를 보유하고 있으며 부하의 종류는 DC 수용가, AC 수용가로 구성되며 그림 1과 같다.

때에 방전하여 에너지의 효율적인 관리를 지원하는 에너지 저장 시스템(ESS)이 있다. 또한 에너지 저장 시스템은 신재생 에너지의 불규칙한 에너지 수요를 보완하여 마이크로그리드에 안정적으로 전력을 공급한다.

마이크로그리드 내에서 전력 변환을 위한 컨버터는 DC 마이크로그리드가 AC 계통(Grid)으로부터 전력을 공급받기 위해 AC를 DC 전력으로 변환하는 AC/DC 컨버터와 신재생 설비, ESS, DC 수용가의 입출력 전압을 계통 전압과 맞추기 위한 DC/DC 컨버터가 있으며, DC 마이크로그리드내에 있는 기존의 AC 수용가에게 AC 전력을 공급하기 위해 DC 전력을 AC 전력으로 변환하는 DC/AC 컨버터로 구성된다.

최종적으로 에너지 관리 시스템(EMS, Energy Management System)이 마이크로그리드의 전체 전기 설비를 통합하여 지능적으로 운영 관리한다.

2.2 LVDC 마이크로그리드 EMS

EMS는 마이크로그리드를 지능적으로 운영하여 에너지 효율을 최적화하기 위한 시스템이다. 이를 위해 EMS는 모든 설비로부터 실시간 미터 데이터를 수집하여 분석하고 최적화를 위한 의사 결정 기능을 수행하기 위해 마이크로그리드를 구성하는 설비들과 통신하여 설비 상태 정보, 미터 정보 등을 관리자에게 실시간으로 보여주는 모니터링 서비스를 제공한다. 또한 마이크로그리드의 유지 보수 기능을 제공하기 위해 전기 설비의 이상 상황 및 고장을 감지하고 설비 간 통신 상태를 확인하여 알람 기능을 지원한다.

에너지 측면에서 EMS는 과거의 신재생 에너지 발전과 부하 사용량 패턴을 AI 모델로 분석하여 미래 에너지 패턴을 예측하며, 마이크로그리드 내의 전력 관리를 효과적으로 수행하기 위해 ESS 충방전 알고리즘을 통한 부하의 최적 분배를 실현한다. 그러므로 피크 부하 발생 및 잉여 전력 발생에도 마이크로그리드의 안정성을 보장한다.

LVDC 환경에서의 EMS는 AC 마이크로그리드에서 사용되는 기법과는 다른 여러 우수성과 차별성을 지니고 있다. LVDC 시스템은 에너지 전송과 변환 과정에서 발생하는 손실을 줄이며 전체 시스템의 효율을 향상시킨다. 또한, DC 전력은 AC 전력보다 더 안정적인 전압 공급을 가능하게 하고 전력 품질 문제에 강한 특성을 지녀 안정성과 신뢰성이 뛰어나다. 이러한 LVDC 마이크로그리드는 스위칭 속도가 빠르고 전력 조정이 신속하게 이루어지는 등 빠른 동적 반응을 가능하게 하며, 신재생 에너지원의 변동성을 효과적으로 관리한다. 더욱이, LVDC 환경은 전력 변환 및 조절 장치가 더 단순하고 경제적이어서 인프라 구축 및 유지 보수 비용을 절감할 수 있다. 이처럼 LVDC에서의 EMS는 특히 분산된 전원과 수용가 간의 효율적인 전력 분배를 최적화하며, 소규모 전력망이나 독립형 시스템에서 맞춤형 전력 관리를 가능하게 한다.

전기 설비에서 사용하고 있는 Modbus 프로토콜은 전통적으로

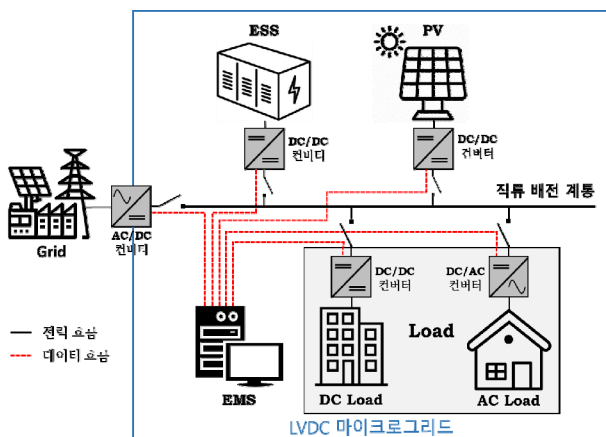


그림 1 LVDC 마이크로그리드 구성도
Fig. 1 LVDC microgrid configuration diagram

태양광 패널을 사용하여 태양 에너지를 DC 전력으로 변환하는 태양광 발전 시스템(PV)이 있으며, 전력을 저장하고 필요한

산업 자동화 분야에 널리 사용되었으나, EMS에서 실시간으로 대용량의 전기 설비 데이터를 수집하기에는 제한사항이 있다. OPC-UA(Open Platform Communications-Unified Architecture)는 산업 IoT 프로토콜로 각광 받고 있으며 기존의 Modbus가 제공하지 못했던 보안성, 상호 운용성, 확장성 및 유연성, 신뢰성, 표준화를 통한 호환성 등을 모두 만족한다. 본 연구의 마이크로그리드 테스트베드는 기존 전기 설비들과 EMS 사이에 Modbus 데이터를 OPC-UA 데이터로 변환해주는 IoT Gateway를 설치하여 EMS가 설비들의 데이터를 효율적으로 수집하게 해준다.

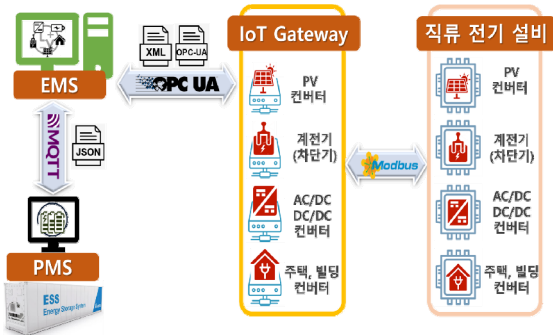


그림 2 마이크로그리드 - EMS 연동 프로토콜
Fig. 2 Microgrid - EMS Interworking Protocols

충방전 운영 제어를 하는 EMS가 ESS를 관리하는 PMS(Power Management System)와 연동하는 경우 신뢰성이 높고 반응성이 빠른 프로토콜이 요구되므로 OPC-UA 보다 신뢰성이 높은 MQTT(Message Queuing Telemetry Transport) 프로토콜을 사용한다. 그림 2는 마이크로그리드를 관리하는 EMS가 설비들과 연동하기 위한 프로토콜을 보여준다.

2.3 충방전 제어를 위한 AI 서버

AI 서버는 부하 사용량과 태양광 발전량을 예측하여 ESS 충방전 운영 스케줄링 기능을 수행한다. 스케줄링을 위해 AI 서버는 주기적으로 전기 설비의 미터 데이터를 사용하여 기계학습을 수행한다. AI 서버는 예측을 위해 고성능의 프로세스가 필요하므로 별도의 서버로 개발하였다.

AI 서버가 충방전 알고리즘을 수행하기 위해 EMS 및 PMS와 연동하는 과정은 그림 3과 같다.

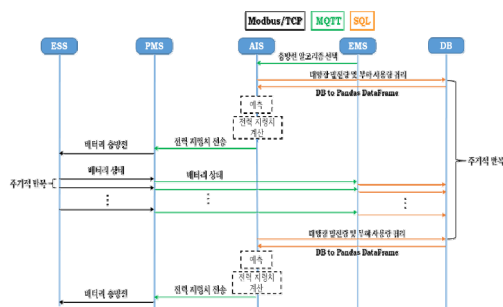


그림 3 EMS - AIS - ESS 연동 과정
Fig. 3 EMS - AIS - ESS Interworking Process

EMS가 ESS 충방전 운영 알고리즘을 선택하면 AI 서버는 측정된 미터 데이터를 기반으로 부하 사용량, 태양광 발전량을 예측하고 예측한 값을 기반으로 충방전 알고리즘에 맞는 전력 지령치를 계산하여 PMS에 전송한다. 이러한 연동 과정들은 MQTT 프로토콜을 통해 이루어진다.

3. 부하 사용량, 태양광 발전량 예측

EMS의 ESS 충방전 운영 알고리즘은 부하 사용량과 태양광 발전량의 예측이 정밀할수록 높은 에너지 소비 효율을 보장한다. 3장에서는 부하 사용량과 태양광 발전량을 예측하기 위해 전력 분야에서 사용한 통계 기반 예측 모델과 AI 기반 예측 모델에 대해 분석하고 모델별로 예측 오차율을 비교한다. 부하 사용량과 태양광 발전량 예측은 ESS 충방전 관리 및 운영에 필수적인 기능으로 마이크로그리드의 효율성과 신뢰성을 보장하는 데 중요한 역할을 한다.

과거에는 통계 기반의 방법론을 이용하여 시계열 데이터를 예측하였으며, 그중 선형 시계열 데이터의 특성을 모델링 하는 자기회귀 통합 이동 평균 모델인 ARIMA(Autoregressive Integrated Moving average Model) 모델이 널리 사용되었다. 그러나 부하 사용량 및 태양광 발전량과 같은 시계열 데이터는 날씨, 계절, 휴일, 공휴일 등과 같은 요소들로 변동성이 발생하므로 불규칙한 패턴을 포함하고 있어 ARIMA 모델과 같은 전통적인 통계 기반 모델들은 정확도와 신뢰성 면에서 제한적이다[5].

최근에는 통계 기반 모델의 단점을 해결하기 위해 딥러닝 기술을 활용한 다양한 시계열 데이터 예측 기법이 연구되고 있다 [6]. 이 중 RNN(Recurrent Neural Networks)은 시퀀스 데이터 처리에 특화된 신경망으로, 과거의 정보를 현재의 결정에 활용할 수 있으며 내부 메모리를 통해 시퀀스의 이전 상태를 기억한다. 이는 부하 사용량 및 태양광 발전량 예측에 유용하게 사용된다. SVM(Support Vector Machine)은 데이터를 분류하기 위한 최적의 경계를 찾아내며, 고차원 데이터에서도 잘 작동하고 복잡한 비선형 관계를 모델링할 수 있는 커널 트릭을 사용한다. LSTM(Long Short-Term Memory)은 특정 정보를 장기간 동안 기억할 수 있는 게이트 메커니즘을 포함하여, 시계열 데이터에서 중요한 정보를 유지하고 불필요한 정보를 잊어버린다. GRU(Gate Recurrent Unit)는 LSTM의 단순화된 버전으로 더 적은 파라미터를 가지며, 학습이 빠르다. 마지막으로, Transformer는 자연어 처리에서 주로 사용되며, RNN과 달리 전체 입력 데이터를 한 번에 처리할 수 있는 Attention 메커니즘을 사용하여 처리 속도와 효율성을 향상시킨다.

표 1은 소개한 시계열 예측 모델별 오차율을 보여준다. MAE(Mean Absolute Error)는 평균 절대 오차로 실제 값과 예측값의 차이를 절댓값으로 변환한 뒤 합산하여 평균으로 나타낸다. RMSE(Root Mean Squared Error)는 평균 제곱근 오차로 실제값과 예측값의 차이를 제곱한 뒤 평균을 구하고 루트를 씌워서 나타낸다.

RMSE는 오차를 제공해서 생기는 값의 왜곡을 줄인다.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y - \hat{y}|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}$$

표 1 모델별 예측 성능

Table 1 Model-specific prediction performance

	ARIMA	RNN	SVM	LSTM	GRU
MAE	11.8	2.015	2.693	1.472	1.633
RMSE	20.86	2.461	3.301	1.833	2.018

표 1에서 기존의 통계 기반 예측 모델과 AI 기반의 예측 모델 간 오차율은 큰 편이며 AI 기반 예측 모델 중 LSTM과 GRU가 오차율이 낮은걸 볼 수 있다. 본 연구에서 사용한 AI 예측 모델은 LSTM으로써 표 1에서 비교한 예측 모델 중 오차율이 가장 낮다. 또한 Transformer의 경우 LSTM보다 좋은 예측 성능을 보여주는 모델이나 단일 모델로 사용 시 단기 예측의 성능이 LSTM과 GRU보다 낮고 개발 복잡도가 높은 연구 결과를 보여준다[7].

AI 서버에서 태양광 발전량과 부하 사용량 예측은 미래 24시간을 예측하는 단기 예측이기 때문에 LSTM을 사용하도록 설계되었다. LSTM은 전력 분야에서 신재생 에너지, 전력 사용량 등을 예측하는 데 자주 사용되는 예측 모델이다[8][9].

그림 4는 AI 서버가 LSTM 모델을 사용하여 부하 사용량과 태양광 발전량을 예측하는 과정을 나타낸다.

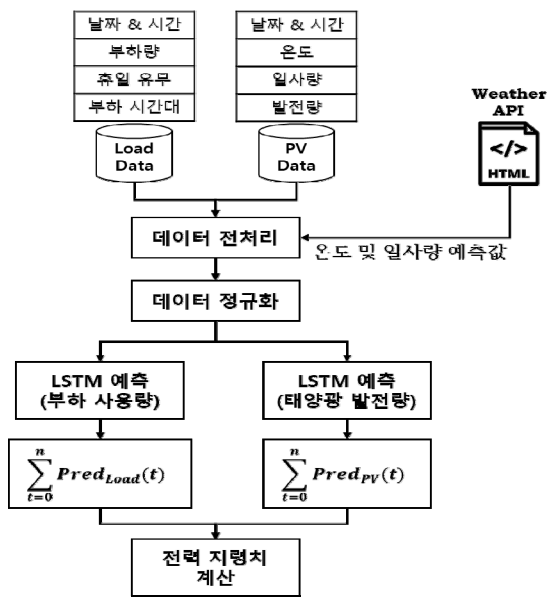


그림 4 EMS의 부하 사용량, 태양광 발전량 예측 과정
Fig. 4 EMS load usage and solar power generation prediction process

EMS는 마이크로그리드 미터 데이터를 주기적으로 DB에 저장하고 AI 서버는 DB로부터 예측을 위한 과거 미터 데이터를 가져와서 전처리 및 정규화하여 LSTM 모델로 학습시켜 미래 24시간 동안의 부하 사용량과 태양광 발전량을 예측한다.

태양광 발전량 예측은 태양광 발전 시스템에서 수집한 과거 온도, 일사량 데이터와 발전량을 기준으로 예측을 진행하며 예측의 정확도를 높이기 위해 외부에서 날씨 데이터(온도, 일사량)를 가져와 마이크로그리드의 데이터와 조합하여 예측한다.

부하 사용량 예측의 경우 시간과 휴일 유무에 따라 전력 소비 패턴이 반복되는 특성을 보이기 때문에 EMS에서 수집된 미터 데이터들을 기반으로 LSTM 예측 모델을 적용하여 미래 24시간 동안의 부하 사용량을 예측한다. 그림 5는 마이크로그리드 테스트베드의 부하 사용량을 LSTM으로 예측한 그래프이다.

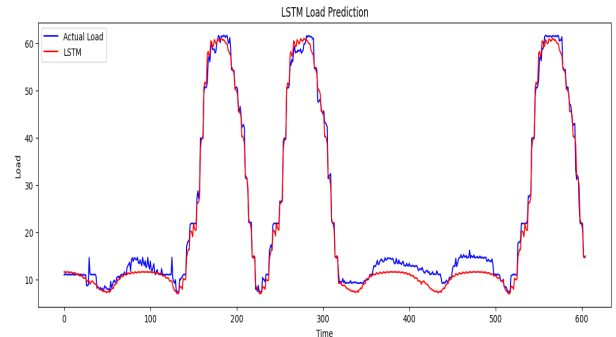


그림 5 LSTM 부하 사용량 예측
Fig. 5 LSTM Load Prediction

4. ESS 충방전 운영 알고리즘

4장에서는 다양한 ESS 충방전 운영 알고리즘에 대해 다루고, 각 알고리즘의 특징과 운영 방식에 대해 상세히 설명한다. 또한, 각 알고리즘의 장단점과 적용 가능한 시나리오를 고려한 운영 전략을 제시한다.

본 연구는 국내에서 진행된 마이크로그리드 연구로 전력 수요 환경을 국내의 환경에 맞춰 진행하며, 표 2, 표 3의 전기 요금 계산표 및 시간대별 부하 시간을 사용한다. 표 4는 ESS 충방전 운영 알고리즘에서 사용하는 변수를 설명한다.

표 2 계시별 부하 시간대

Table 2 Electricity usage for season and time zone

	봄·여름·가을 (3월~10월)	겨울 (11월~2월)
경부하 시간대 (off Peak)	22:00~08:00	22:00~08:00
중간부하 시간대 (mid Peak)	08:00~11:00	08:00~09:00
	12:00~13:00	12:00~16:00
	18:00~22:00	19:00~22:00
최대부하 시간대 (on Peak)	11:00~12:00	09:00~12:00
	13:00~18:00	16:00~19:00

표 3 계시별 전기 요금표

Table 3 Electricity bills table for season and time zone

기본요금 (원/kWh)	시간대	여름철 (6~8월)	봄, 가을철 (3~5월, 9~10월)	겨울철 (11~2월)
8,320	경부하	94.0	94.0	101.0
	중간부하	146.9	116.5	147.1
	최대부하	229.0	147.2	204.6

표 4 충방전 운영 알고리즘 변수

Table 4 Charge/discharge operation algorithm variable

변수명	설명
C_{ESS}	배터리 전체 용량 (kWh)
C_{Conv}	컨버터 최대 출력 전력 (kW)
SoC	ESS State of Charge (%)
SoC_{min}	ESS 충방전 하한치 (%)
SoC_{max}	ESS 충방전 상한치 (%)
W_{SoC}	배터리 전력량 (kWh) $W_{SoC} = C_{Bat} \times SoC$
$period$	충방전 시간 주기 (hour)
N_{period}	배터리 충방전할 시간 (hour)
W_{Grid}	계통 사용량 (kWh) $W_{Grid} = W_{Load} - W_{PV}$
W_{Load}	부하 사용량 (kWh)
W_{PV}	태양광 발전량 (kWh)
$Peak$	피크 제한치 (kW)
$pred_{Load}$	예측한 부하 사용량 (kWh)
$pred_{PV}$	예측한 태양광 발전량 (kWh)
P_{Ref}	충방전 전력 지령값 (kW) (양수=충전, 음수=방전, 0=대기)
T_{work}	근무 시간대 (hours)
T_{onPeak}	최대부하 시간대 (hours)
$T_{midPeak}$	중간부하 시간대 (hours)
$T_{offPeak}$	경부하 시간대 (hours)

4.1 기본 제어 운영 알고리즘

기본 제어 운영 알고리즘은 ESS의 사용을 가장 최소화한 운영 알고리즘이다.

ESS의 충전은 신재생 에너지원이나 다른 분산 전원들에 의해 부하량보다 발전량이 높을 경우 계통측으로 전력이 역송되는 잉여전력이 발생하는 경우에 이루어진다. 역송을 방지하기 위해 EMS에서 발전량이 부하량보다 높게 예측되었을 경우 ESS에 충전한다. 이 경우 보통 평일에는 잉여전력이 발생하지 않아 ESS에 충전이 되지 않고 휴일 및 주말에 잉여전력으로 인해 ESS가 충전된다.

기본 제어 운영 알고리즘은 평일 간 근무 시간에 균일하게 방전하도록 설계한다. 결론적으로 기본 제어 모드는 주말에 잉여전력으로 충전된 ESS를 평일 근무 시간에 일정한 전력으로 방전하는 패턴을 보인다.

기본 제어 운영 알고리즘의 흐름은 그림 6과 같고 Algorithm 1에서 자세히 설명한다.

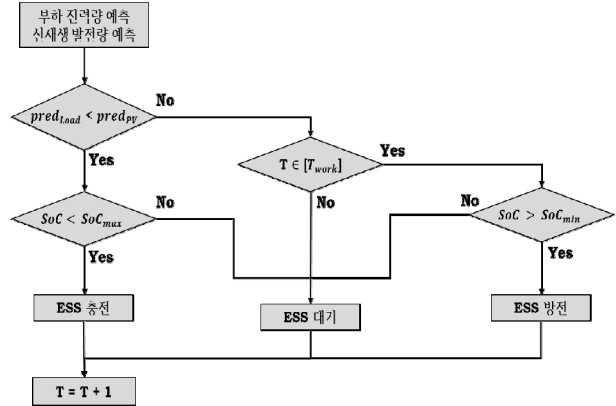


그림 6 기본 제어 운영 알고리즘 흐름도

Fig. 6 Basic Control Operation Algorithm Flowchart

Algorithm 1 - 기본 제어 알고리즘

- 1: $W_{Grid}(t) = pred_{PV}(t+1) - pred_{Load}(t+1)$
- 2: if $W_{Grid}(t) < 0$
- 3: if $W_{SoC}(t) \geq C_{ESS} \times SoC_{min}$
- 4: if $t \in [T_{work}]$
- 5: if $C_{ESS} \times SoC_{min} > W_{SoC}(t) + W_{Grid}(t)$
- 6: $P_{Ref} = -\frac{C_{ESS} \times (SoC_{max} - SoC_{min})}{100 \times \leq n(T_{work})}$
- 7: else
- 8: $P_{Ref} = -(W_{SoC}(t) - C_{ESS} \times SoC_{min})$
- 9: else
- 10: $P_{Ref} = 0$
- 11: else
- 12: $P_{Ref} = 0$
- 13: else
- 14: if $C_{ESS} \times SoC_{max} < W_{SoC}(t) + W_{Grid}(t)$
- 15: $P_{Ref} = C_{ESS} \times SoC_{max} - W_{SoC}(t)$
- 16: else
- 17: $P_{Ref} = W_{Grid}(t)$
- 18: $t = t + 1$

4.2 피크 제어 운영 알고리즘

피크 제어 모드는 전기 요금이 가장 비싼 최대부하 시간대에 계통 사용량의 피크치를 설정하여 예측된 부하 사용량을 기반으로 설정된 피크치를 초과하지 않도록 ESS를 방전하여 계통 사용량을 피크치 미만으로 저감 하여 마이크로그리드의 경제성을 향상시킨다.

피크 제어 모드의 충방전 운영은 예측된 태양광 발전량과 부하 사용량을 기반으로 계통 사용량을 계산한다. 계산된 계통 사용량은 피크치 이상으로 예측되면 피크치를 넘지 않도록 ESS를 방전한다. 충전은 경부하 시간대에 피크치를 초과하지 않는 선에서 ESS를 충전한다.

피크 제어 운영 알고리즘의 흐름은 그림 7과 같고 Algorithm 2에서 자세히 설명한다.

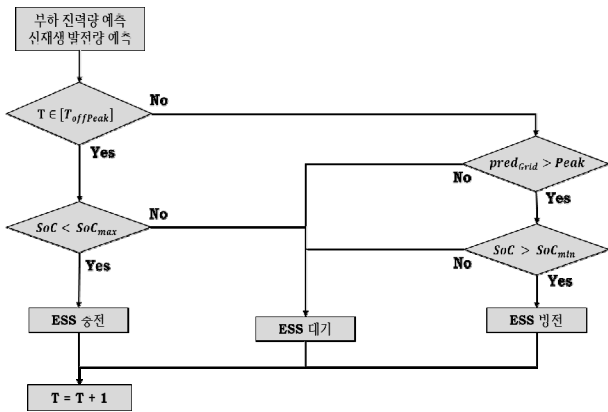


그림 7 피크 제어 운영 알고리즘 흐름도
Fig. 7 Peak Control Operation Algorithm Flowchart

Algorithm 2 - 피크 제어 알고리즘

- 1: $W_{Grid}(t) = pred_{PV}(t+1) - pred_{Load}(t+1)$
- 2: if $t \in [T_{onPeak}]$
- 3: if $W_{Grid}(t) \geq Peak$
- 4: if $W_{SoC}(t) \geq C_{ESS} \times SoC_{min}$
- 5: if $C_{ESS} \times SoC_{min} > W_{SoC}(t) + W_{Grid}(t)$
- 6: $P_{Ref} = W_{SoC}(t) - C_{ESS} \times SoC_{min}$
- 7: else
- 8: $P_{Ref} = W_{Grid}(t) - Peak$
- 9: else
- 10: $P_{Ref} = 0$
- 11: else
- 12: $P_{Ref} = 0$
- 13: else
- 14: if $C_{ESS} \times SoC_{max} \geq W_{SoC}(t)$
- 15: $P_{Ref} = C_{ESS} \times SoC_{max} - W_{SoC}(t)$
- 16: else
- 17: $P_{Ref} = Peak - W_{Grid}(t)$
- 18: $t = t + 1$

4.3 수요 관리 운영 알고리즘

수요 관리 운영 알고리즘은 표 1, 표 2을 활용하여 계산한 전기 요금을 최소화하기 위해 ESS의 충방전을 결정한다. 수요 관리 운영 모드의 핵심은 전기 요금이 가장 적은 경부하 시간대에 충전하여 요금이 가장 비싼 최대부하 시간대에 방전하는 것이다. 수요 관리 운영 알고리즘은 최대부하 시간대에 계통 사용량을 가장 적게 사용하도록 ESS를 방전한다. 충전은 경부하 시간대에 피크 전력을 넘지 않을 정도로 충전하며, 중간부하 시간대에는 ESS의 충방전 운영을 대기한다. 수요 관리 운영 알고리즘의 흐름은 그림 8과 같고 Algorithm 3에서 자세히 설명한다.

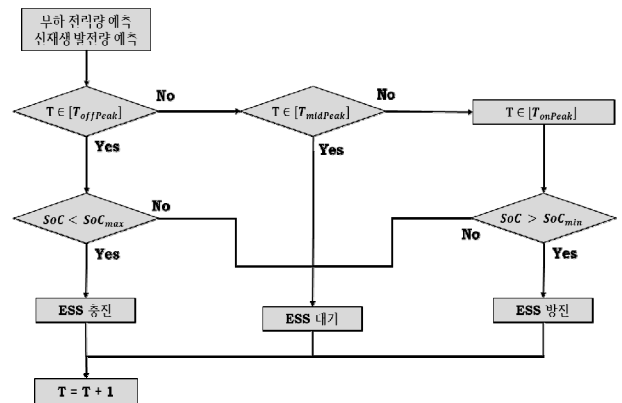


그림 8 수요 관리 운영 알고리즘 흐름도
Fig. 8 Demand Management Operation Algorithm Flowchart

Algorithm 3 - 수요 관리 알고리즘

- 1: $W_{Grid}(t) = pred_{PV}(t+1) - pred_{Load}(t+1)$
- 2: if $t \in [T_{offPeak}]$
- 3: if $C_{ESS} \times SoC_{max} > W_{SoC}(t)$
- 4: $P_{Ref} = Peak - W_{Grid}(t)$
- 5: else
- 6: $P_{Ref} = 0$
- 7:
- 8: elif $t \in [T_{midPeak}]$
- 9: $P_{Ref} = 0$
- 10:
- 11: else
- 12: if $W_{SoC}(t) \geq C_{ESS} \times SoC_{min}$
- 13: if $C_{ESS} \times SoC_{min} > W_{SoC}(t) + W_{Grid}(t)$
- 14: $P_{Ref} = W_{SoC}(t) - C_{ESS} \times SoC_{min}$
- 15: else
- 16: $P_{Ref} = W_{Grid}(t)$
- 17: else
- 18: $P_{Ref} = 0$
- 19: $t = t + 1$

5. 성능 분석

LVDC 마이크로그리드 테스트베드에 세 가지 충방전 운영 알고리즘을 적용하여 실험하고 각 실험 결과를 기반으로 성능을 분석한다.

5.1 LVDC 마이크로그리드 테스트베드

본 연구에서 진행한 LVDC 마이크로그리드 테스트베드의 실험 환경은 표 5와 같다.

표 5 LVDC 마이크로그리드 실험 환경

Table 5 Test Environment for LVDC Microgrid Operation

설비 환경 요소	설정 값
ESS 배터리 최대 용량	1000 kWh
ESS 배터리 가용 용량	800 kWh
ESS SoC 하한치	10 %
ESS SoC 상한치	90 %
ESS 컨버터 최대 용량	250 kW
PV 컨버터 최대 용량	250 kW
미터 데이터 수집 주기	15 Minute
전력 피크치	170 kW
주중 총 근무 시간	40 hour

사용된 ESS 배터리의 최대 용량은 1,000 kWh이지만, 최저 SoC(State of Charge) 제한치 10%, 최대 SoC 제한치 90%를 적용하여 실제 가용 용량은 800 kWh로 설정되어 있다. 이는 배터리 수명 관리 및 안전을 고려한 조치이다. ESS 컨버터의 최대 용량은 250 kW로, 이는 시스템이 전력을 변환할 수 있는 최대 용량이다. PV 컨버터도 250 kW로 태양광 패널에서 생성된 DC 전력을 배전망에서 사용하는 DC 전압으로 변환하는 데 사용된다. 마이크로그리드 내의 태양광 발전량, 부하 사용량, ESS 충방전량에 대한 미터 데이터는 15분 간격으로 수집된다. 설정된 전력 피크치는 170 kW이며, 이는 시설에서 동시에 사용된 최대 전력을 나타낸다. 실험 환경에서는 주 5일, 하루 8시간, 총 40시간의 근무 시간이 설정되어 있으며, 이는 기본 제어 운영 알고리즘에서 전력 사용 패턴 분석 및 에너지 소비 최적화 전략 수립에 활용된다.

5.2 실험 과정 및 방법

충방전 알고리즘 실험을 위해 1개월 동안 마이크로그리드 테스트베드를 운영하여 미터 데이터(태양광 발전량, 부하 사용량, 계통 사용량)를 수집하였다. 본 연구에서 제시한 알고리즘 실험을 위해 1개월 데이터 중 그림 9의 휴일 미터 데이터와 그림 10의 평일 미터 데이터를 결합하여 그림 11과 같은 테스트용 미터 데이터를 생성하여 실험에 적용하였다.

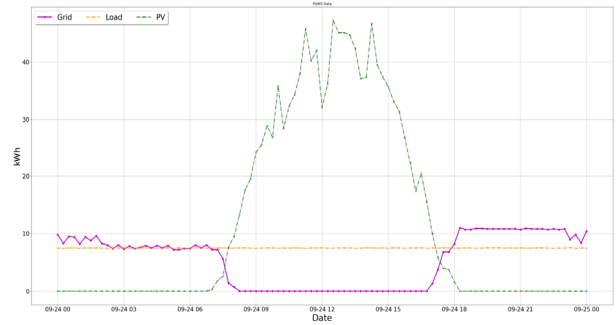


그림 9 마이크로그리드 미터 데이터 (휴일)
Fig. 9 Microgrid Power Meter Data (Holidays)

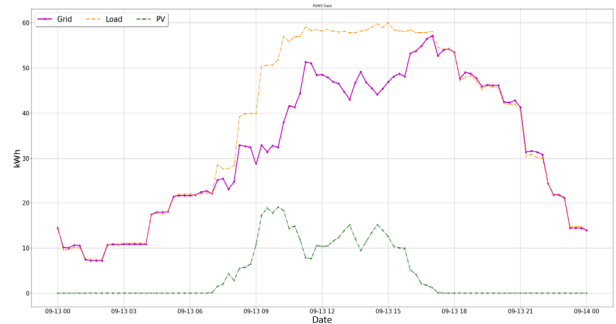


그림 10 마이크로그리드 미터 데이터 (평일)
Fig. 10 Microgrid Power Meter Data (Weekdays)

그림 9는 EMS에서 휴일에 수집된 계통 사용량(Grid), 부하 사용량(Load), 태양광 발전량(PV) 미터 데이터로 휴일 동안 근무를 하지 않으므로 부하 사용량은 전체적으로 일정한 패턴을 보인다. 또한 태양광 발전이 이루어지는 시간에는 발전량이 부하량보다 높아져 역송 현상이 발생한다.

그림 10은 평일에 수집된 미터 데이터로 출근 시간대부터 부하량이 증가하고 태양광 발전이 이루어지는 시간에는 계통 사용량이 부하량에서 발전량을 뺀 만큼 사용된 걸 확인할 수 있다.

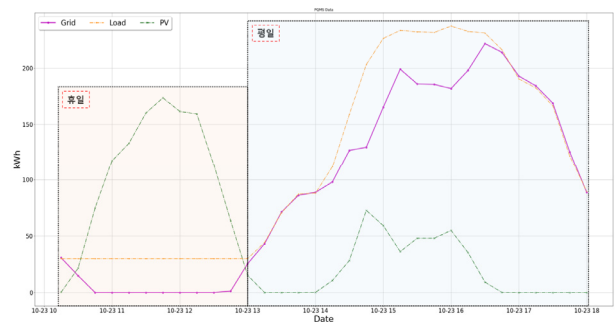


그림 11 마이크로그리드 테스트 데이터 (휴일 & 평일)
Fig. 11 Microgrid Test Data (Holidays & Weekdays)

충방전 알고리즘 실험을 위해 휴일과 평일 부하 패턴을 모두 포함하도록 만든 테스트용 미터 데이터는 그림 11에 나타낸다. AI 서버는 부하 사용량 및 태양광 발전량을 예측하기 위해 수집된 1개월 실험데이터를 학습하고 학습된 결과를 ESS 충방전

알고리즘 실험에 사용한다.

5.3 운영 알고리즘 실험

실험은 그림 11의 테스트용 미터 데이터를 사용하여 알고리즘별로 진행되며, 알고리즘의 성능은 요금을 지불하는 계통 사용량의 변화에 중점을 두어 분석한다.

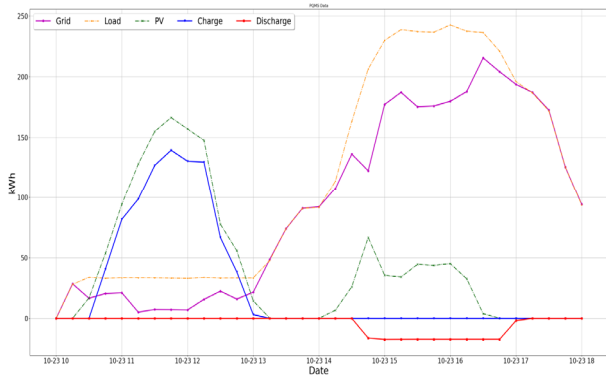


그림 12 기본 제어 운영 알고리즘 미터 데이터
Fig. 12 Default Control Operational Algorithm Meter Data

그림 12는 기본 제어 운영 알고리즘을 적용한 미터 데이터로 태양광 발전량이 부하 사용량보다 높을 경우 잉여전력으로 ESS 충전이 이루어진다. 휴일에는 일반적으로 부하 사용량이 적으므로 ESS는 잉여전력만큼 충전하고 평일 근무 시간 동안에는 일정량을 방전한다. 방전량은 ESS 가용 용량인 800kWh에서 주중 근무 시간인 40시간을 나눈 값(20 kW)으로 일정하게 방전한다.

기본 제어 운영 알고리즘은 휴일에 충전되고 평일에 방전되기 때문에 ESS의 사용 빈도가 적고, 태양광 발전량은 날씨의 영향을 많이 받기 때문에 휴일에 날씨에 따라 ESS의 충전량이 충분하지 않을 수 있다. 그러므로 기본 제어 운영 알고리즘은 평일에도 부하가 많지 않거나 잉여전력이 자주 발생하는 환경에 적합하며, ESS 사용 빈도에 따른 배터리 수명이 다른 알고리즘에 비해 길다.

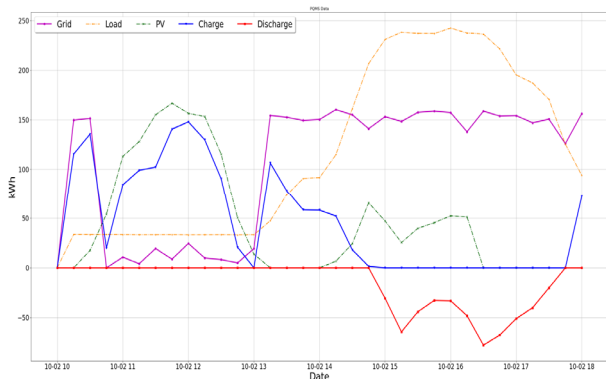


그림 13 피크 제어 운영 알고리즘 미터 데이터
Fig. 13 Peak Control Operation Algorithm Meter Data

그림 13은 피크 제어 운영 알고리즘을 적용한 미터 데이터로 경부하 시간대에 ESS를 충전하고 계통 사용량이 피크치를 넘어갈 경우 ESS를 방전하여 피크 전력을 저감한다.

피크 제어 운영 알고리즘은 계통 사용량이 설정된 전력 피크 제한값을 넘지 않도록 ESS를 운영하여 계약 전력의 초과 과금을 방지한다. 그러나 ESS가 충전된 이후에 계통 사용량이 피크치를 넘지 않을 경우 ESS가 방전되지 않아 사용 빈도 감소로 인한 효율성이 떨어진다.

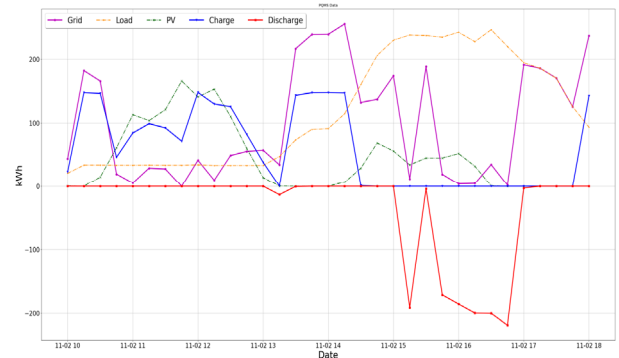


그림 14 수요 관리 운영 알고리즘 미터 데이터
Fig. 14 Demand Management Operations Algorithm Meter Data

수요 관리 운영 알고리즘은 계시별 요금제를 반영하여 ESS 충방전을 진행하기 때문에 휴일 및 평일 모두 충전, 방전이 발생한다. 그림 14는 수요 관리 운영 알고리즘을 적용한 미터 데이터이다. 휴일 영역에서는 경부하 시간대에 태양광 발전으로 인한 역송 방지를 위해 ESS가 충전되며 방전은 발생하지 않는다. 평일 영역에서는 경부하 시간대에 충전하고 중간부하 시간대에 대기, 최대부하 시간대에 부하 사용량 만큼 방전하는 패턴을 보여준다. 수요 관리 운영 알고리즘의 순환 주기는 하루 단위로 계시별 시간표에 따라 충방전을 하기에 ESS의 사용 빈도가 높아 에너지 효율성이 높다. 그러나 부하 피크를 고려하지 않음으로 충전 시 피크 전력을 초과하는 현상이 발생할 수 있고 최대 부하 시간대에 방전 시 균일하게 방전하는 것이 아니라 계통 사용량 만큼 방전하기 때문에 최대부하 시간대의 후반부로 갈수록 피크 전력을 초과할 확률이 높아진다.

5.4 운영 알고리즘 비교

표 6은 ESS를 운용하지 않을 때와 충방전 운영 알고리즘을 적용할 때의 마이크로그리드 겨울철 전력 미터 및 전기 요금 데이터이다.

ESS가 미적용된 전체 시간대의 계통 사용량을 보면 부하 사용량과 태양광 발전량과 값이 맞지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 휴일 기간에 태양광 발전량이 부하 사용량 보다 높아 계통측으로 역송 현상이 발생한 걸 의미한다. 휴일 역송되는 전력량을 보면 약 726kWh로 마이크로그리드 테스트베드에서 사용하는 ESS의 전체 용량이 1,000kWh인걸 감안하면 약 73%에 해당하

표 6 운영 알고리즘별 미터 데이터 및 ESS 미적용 미터 데이터

Table 6 Power Meter Data Not Applied to ESS & Power Meter Data by Operation Algorithm

	운영 알고리즘	계통 사용량 (kWh)	부하 사용량 (kWh)	태양광 발전량 (kWh)	전기 요금 (KRW)
경부하 시간대	ESS 미적용	552.41	574.04	23.86	51,920
	기본 제어	552.41	574.06	23.86	51,920
	피크 제어	1224.35	579.77	24.45	115,080
	수요 관리	1567.98	578.02	21.84	147,390
중간부하 시간대	ESS 미적용	1,343.06	1,650.52	615.57	156,460
	기본 제어	1344	1650.52	615.57	156,570
	피크 제어	1208.35	1647.41	638.98	140,770
	수요 관리	1358.92	1644.24	642.67	158,310
최대부하 시간대	ESS 미적용	1,262.04	1,613.39	767.15	185,770
	기본 제어	1240	1613.39	767.15	182,520
	피크 제어	1001.64	1611.92	819.41	147,440
	수요 관리	236.83	1609.56	763.66	34,860
근무 시간대	ESS 미적용	1,780.48	2,086.17	306.54	245,930
	기본 제어	1625	2086.17	306.54	224,620
	피크 제어	1366.78	2087.27	327.33	187,320
	수요 관리	575.38	2080.75	333.93	69,360
전체 시간대	ESS 미적용	3,157.51	3,837.97	1,406.58	394,160
	기본 제어	3136.42	3837.97	1406.58	391,030
	피크 제어	3434.34	3839.1	1482.84	403,300
	수요 관리	3163.73	3831.82	1428.17	340,560

는 양이다. 특히 태양광 발전이 주로 발생하는 중간부하, 최대 부하 시간대는 전기 요금이 높은 시간대에 해당한다. 이러한 상황에서 ESS를 운용하지 않을 경우, 전체 전기 요금에서 약 30%의 추가 비용이 발생하는 것으로 분석되며, ESS의 전략적인 운용이 전기 요금 절감에 중요한 역할을 할 수 있음을 보여 준다.

표 7 운영 알고리즘 시간대별 충전전량 (kWh)

Table 7 Operating Algorithm Charging/Discharging by Time Zone (kWh)

	충방전	기본 제어	피크 제어	수요 관리
경부하 시간대	충전량	0	376.6	1022.83
	방전량	0	0	13.84
중간부하 시간대	충전량	360.59	365.16	302.23
	방전량	53	185.69	7.11
최대부하 시간대	충전량	495	491.43	525.97
	방전량	104.31	323.15	1166.33
근무 시간대	충전량	0	0	0
	방전량	155.45	397.73	1170.44
전체 시간대	충전량	855.62	1231.69	1851.03
	방전량	157.32	508.85	1187.28

표 6에서 기본 제어 운영 알고리즘을 적용한 미터 데이터를

ESS를 적용하지 않은 데이터와 비교해보면 전력량 및 전기 요금의 차이가 적은 걸 볼 수 있다. 그 이유는 기본 제어 운영 알고리즘은 휴일에 충전한 ESS를 평일에 균일하게 방전하는데 실험에 사용된 테스트 데이터는 휴일 하루, 평일 하루 데이터 이기에 방전된 전력량은 ESS의 전체 용량 중 약 16%에 해당한다. 이때 ESS의 SoC는 80% 이상이며 평일이 연속될수록 ESS를 적용하지 않을 때와 비교 시 계통 사용량과 전기 요금이 감소한다. 또한 ESS를 적용하지 않을 때 휴일 동안 잉여전력 발생으로 계통 사용량은 0이 되지만 기본 제어 운영 알고리즘을 적용하면 잉여전력 예측량의 오차로 ESS 충전에 계통 사용량을 사용하기 때문에 전체 계통 사용량의 차이가 작은 이유로 볼 수 있다.

피크 제어 운영 알고리즘을 적용한 미터 데이터를 보면 ESS의 사용 빈도가 높을수록 마이크로그리드의 경제성은 높지만 기본 제어 운영 알고리즘을 적용한 미터 데이터와 비교해보면 전체 계통 사용량과 전기 요금이 높은 걸 볼 수 있다. 이는 피크 제어 운영의 경우 ESS의 초기 SoC에 따라 경부하 시간대에 ESS 충전량이 달라지기 때문이다. 실험에선 ESS의 SoC를 10% 미만에서 시작하였으며 경부하 시간대에 ESS를 완충하기에 기본 제어 운영보다 계통 사용량과 전기 요금이 높게 나온다.

표 7은 운영 알고리즘의 시간대별 ESS 충전전량을 보여준다. 표 6의 피크 제어 운영 알고리즘을 적용한 미터 데이터와 표 7을 보면 전체 계통 사용량의 평균 15%에 해당하는 전력량을

피크 저감을 위해 방전하며, 장기적으로 마이크로그리드를 운영할 시 ESS에 하루 평균 약 40%~50%의 SoC가 남게 된다. 이를 반영하여 피크 제어 운영 알고리즘의 전기 요금을 계산하면 기본 제어 운영 알고리즘보다 전기 요금이 적어진다.

표 6의 수요 관리 운영 알고리즘을 적용한 데이터와 표 7을 보면 수요 관리 운영은 알고리즘 중 ESS의 사용 빈도가 가장 높은 알고리즘으로 하루 주기로 부하 시간대에 따라 충방전이 발생해 계통 사용량이 가장 적고 요금이 비싼 최대부하 시간대에 방전하여 전체 전기 요금이 가장 적다. 그러한 이유로 계통 사용량이 경부하 시간대에 ESS 충전을 위해 가장 많이 사용되고 최대부하 시간대에 완충된 ESS를 방전하여 계통 사용량이 가장 적을 것 볼 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 마이크로그리드를 구성하는 전기 설비들과 마이크로그리드 EMS 간에 연동 방법과 EMS의 핵심 기능들에 대해 설명하였다.

또한 EMS가 마이크로그리드를 지능적으로 운영하는데 필요한 ESS 충방전 운영 알고리즘을 제안하고 성능을 비교 분석한다. 제안된 알고리즘은 목적에 따라 ESS의 최적 충방전 시점과 마이크로그리드의 경제성 및 안정성을 고려하여 설계되었다. 실험 결과, 특정 환경과 전력 부하 시간대에 따라 각 알고리즘의 효율성과 경제성이 달라지는 것을 관찰할 수 있었다.

기본 제어 운영 알고리즘은 주말 태양광 발전의 역송 현상 방지를 위해 사용되므로, 다른 알고리즘에 비해 ESS 사용 빈도가 낮으므로 경제성이 떨어진다. 피크 제어 운영 알고리즘은 계약된 부하 피크치를 넘지 않도록 ESS를 충방전하여 피크치를 초과하여 발생하는 전기 부가 요금을 방지한다. 마지막으로 수요 관리 운영 알고리즘은 요금을 최소화하기 위해 경부하 시간대에 충전하고 최대부하 시간대에 방전한다. 그러나 알고리즘 운영에 있어서 부하 피크치를 넘을 수도 있으며 특정 시간대에선 피크 제어 운영보다 경제성이 낮은 것 볼 수 있었다.

결론적으로 운영자가 마이크로그리드의 효율성을 극대화하고 비용을 최소화하기 위해 적절한 알고리즘 선택이 중요함을 시사한다. 향후 연구에서는 강화학습을 기반으로 ESS의 충방전 시점 결정을 통해 에너지 효율을 최적화하는 알고리즘에 대해 연구한다.

Acknowledgements

본 연구는 산업기술평가관리원 에너지기술개발사업 “시스템 자율제어 및 보호협조가 가능한 직류수용가용 DC마이크로그리드 시스템 기기 기술 개발”의 일환으로 수행하였음.
(과제번호 2019381010001B)

References

- [1] F. Gao, R. Kang, J. Cao, and T. Yang, “Primary and Secondary Control in DC Microgrids: A Review,” in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, Issue 2, pp. 227-242, March 2019.
- [2] I. Chung, W. Liu, D. Cartes, E. Collins, and S. Moon, “Control Methods for Multiple Distributed Generators in a Microgrid System,” *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 46, no. 3, May 2010.
- [3] K. Moslehi, and R. Kumar, “A Reliability Perspective of the Smart Grid,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, pp. 57-64, 2010.
- [4] D. Kodaira, B. Yu, W. Jung, and S. Han, “Optimized ESS Operation for Peak Shaving based on Probabilistic Load Prediction,” In *Proceedings of the 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*, vol. 22, pp. 1199-1203, May 2018.
- [5] S. Jimeng, J. Mahek, and N. Giri, “Time Series Forecasting (TSF) Using Various Deep Learning Models,” arXiv:2204.11115, 2024.
- [6] A. Jorge, M. Hugo, and P. Lucas, “Benchmark of Electricity Consumption Forecasting Methodologies Applied to Industrial Kitchens,” *MDPI Buildings*, Dec. 2022.
- [7] K. Jonghwa, C. Jongwho, and K. changwan, “Time Series Prediction Using Recurrent Neural Network,” *Journal of The Korean Data Analysis Society*, vol. 21, pp. 1771-1779, Feb. 2019.
- [8] CL. Chinnadurai, S. Ravindran, and S. Udaiyakumar, “Energy Management of a Microgrid based on LSTM Deep Learning Prediction Model,” *2021 Smart Technologies Communication and Robotics (STCR)*, pp. 1-6, Nov. 2021.
- [9] D. Ayda, G. F. Luis, B. Stephen, and B. Argenis, “Temperature Prediction in Microgrids Using LSTMs: A Case Study,” *2022 IEEE 46th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, pp. 1237-1242, Aug. 2022.

저자소개



정상우 (Sang-woo Jung)

2018년 2월 목원대학교 컴퓨터공학과 학사
2021년 8월 충남대학교 컴퓨터공학과 석사
2021년 9월~현재:
충남대학교 컴퓨터공학과 박사과정
ETRI 표준연구본부 위촉연구원
(관심분야)
- ICT 기반 전기안전 기술 분야
스마트그리드/마이크로그리드 기술 분야
IIoT 센서 네트워크 기술 분야
[ORCID:0000-0001-9109-7220]



안윤영 (Yoon-Young An)

1991년 2월 경북대학교 전자공학과 학사
1993년 2월 경북대학교 전자공학과 석사
2006년 8월 경북대학교 전자공학과 박사
1993년 3월~현재: ETRI 표준연구본부 책임연구원
(관심분야)
ICT 기반 전기안전 기술 분야
스마트그리드/마이크로그리드 기술 분야
BEMS/FEMS 기술 분야
[ORCID:0000-0002-6349-7515]



김기일 (Ki-II Kim)

2000년 2월 충남대학교 컴퓨터공학과 학사
2002년 2월 충남대학교 컴퓨터공학과 석사
2005년 2월 충남대학교 컴퓨터공학과 박사
2019년 9월~현재: 충남대학교 컴퓨터공학과 교수
(관심분야)
WSN, WBAN 기술 분야
Mobile Ad-Hoc Network 기술 분야
Smart IoT 기술 분야
[ORCID:0000-0002-8366-3533]