

Cost-optimizing ESS Environmental Control Based on Internal Resistance and Time-Series Forecasting of External Conditions

배터리 내부 저항 및 외부 온도와 전력 수요 예측에 기반한 ESS 운영 환경 제어 최적화

SangJoon Lee · HyunYong Lee · Seok-Kap Ko

이상준[†] · 이현용* · 고석갑*

Abstract

Energy storage system(ESS) based on rechargeable battery have varying energy efficiency depending on its internal resistance. Among the many factors that affect the internal resistance, temperature is one of the major factor. The external temperature of ESS operating environment can be controlled to improve the energy efficiency, however such control comes with its own cost. The recent development of internet of things(IoT) technology and time-series forecasting allows the ESS operator to monitor and predict the short-term external environment. In this paper we model a scenario which low outside temperature may affect the battery internal resistance, and compare the net cost under various temperature control scheme. We show that adequate temperature control based on short-term forecast is more beneficial than the baseline scheme of no control.

Key Words

Energy storage system, Temperature control, Cost optimization, Time-series prediction, Numerical model

1. 서론

에너지 저장 체계(ESS)는 현재 전기차, 일반가정, 상업빌딩 등 다양한 분야에서 발전기와 전력망 운영에 있어 발생하는 여러 변수에 대응하기 위한 전력 저장 및 공급 장치로 사용되고 있다. 2차전지 방식 ESS 내부 부품 중 핵심적 요소인 배터리는 사용 방식, 사용 환경, 사용 이력 등에 따라 에너지 효율이 변화한다. 이 중 사용 환경에 따른 에너지 효율 변화는 환경 제어를 통해 사용자가 조절할 수 있다. 이때 변화하는 에너지 효율은 온도에 따른 배터리 내부 저항 변화에 가장 크게 기인한다.

기존의 배터리 온도 관리 관련 연구는 고정된 위치에서 시설에 전력을 공급하는 ESS보다는 주로 이동하면서 주변 환경에 영향을 많이 받는 전기차 배터리를 대상으로 이루어졌다 [1~2]. 이동 용도로 사용되는 전기차 특성상 미래의 전력 소비 패턴을 예측하기 어렵기 때문에, 기존 연구들은 주로 배터리 난방 자체의 효율에 대한 방법론에 집중되어 있다. 이러한 방

법들은 배터리 내부의 화학적, 물리적 요소들에 의한 난방 방법과 외부 장치들에 의한 난방 방법으로 나뉜다[3]. 내부 요소에 의한 난방 방법은 화학적 특성을 이용한 난방 방식이거나 [4], 배터리 자체 전원을 직류 혹은 교류로 활용한 난방 방식이다[5~7]. 외부 요소에 의한 난방 방법은 대기 난방에 의한 방식[8], 액체를 이용한 열전도 방식[9], 그리고 기타 소재를 이용한 방식들이 있다[10~13]. 시설형 ESS 온도 관리에 관해서는 기존의 단열재가 아닌 상변화물질(PCM)을 이용하여 온도 유지 비용을 절약하는 연구가 이루어졌다[14]. 이와 같은 다양한 난방 방식들은 저마다의 장단점이 있으나, 본 논문에서는 일반적인 환경에서 가장 간단하게 설치와 유지를 할 수 있고 다양한 종류의 배터리에 활용될 수 있는 대기 난방 방식을 사용한다고 가정한다.

ESS 시스템의 온도는 운영시설 내부와 외부 온도의 변화에 영향을 받는데, 이러한 변화는 센서를 통해 감지할 수 있고, ARIMA와 같은 통계 기반 시계열 분석 기법이나 순환 신경망(RNN), 장단기 기억 신경망(LSTM), 트랜스포머 등 여러 인공

[†] Corresponding Author : Energy Intelligence Research Section, Electronics and Telecommunications Research Institute, Korea
E-mail:sjlee85@etri.re.kr
<https://orcid.org/0000-0003-0870-8639>

* Energy Intelligence Research Section, Electronics and Telecommunications Research Institute, Korea

Received: Jun. 17, 2024 Revised: Jul. 08, 2024 Accepted: Jul. 17, 2024

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.

지능 기반 시계열 분석을 통해 향후 온도 변화를 예측할 수 있다[15]. 이러한 기술들은 ESS 사용자의 전력 소비 및 생산 패턴 예측 분석에도 사용될 수 있으며 [16~17], 상기한 온도 변화 예측 및 그에 따른 배터리 내부 저항 변화 예측과 결합하여 실제로 발생할 에너지 및 비용 손실을 예측할 수 있게 된다.

ESS 운영시설 내부의 온도는 ESS가 설치된 곳의 공조 및 냉난방 시스템으로 조절할 수 있고, 따라서 배터리 내부 저항을 제어할 수 있다. 이를 통해 ESS에서 발생하는 에너지 및 비용 손실을 줄일 수 있으나, 냉난방 시스템을 가동하기 위한 에너지 및 비용이 필요하게 된다.

본 논문에서는 주로 건물에서 사용하는 ESS의 사용 환경에 따른 효율 변화 및 해당 환경을 제어하기 위한 비용을 정량화하는 모델을 제시한다. 그리고 ESS 운영시설 주변 환경 및 전력 소모에 대한 시계열 예측 데이터가 주어지는 상황에서 둘을 비교해 최적의 비용 효율을 보이는 ESS 제어 방식을 모색한다.

2. ESS 배터리 및 냉난방 모델

ESS 운영비용 분석을 위해서는 운영 과정에서 손실되는 에너지에 대한 비용과, 손실 비용을 보전하기 위해 취해지는 조치에 필요한 에너지 비용을 고려해야 한다. 본 논문에서는 단기적인 비용분석만 하고 장비 열화와 같은 장기적인 요소는 고려하지 않는다.

ESS 배터리 모델은 배터리 관리체계(BMS)에서 실험을 통해 산출하는 저항값을 기반으로 에너지 손실을 계산한다. ESS 운영시설 냉난방 모델은 대기 난방 방식을 사용한다고 가정하고 기초 열역학 공식을 사용하여 필요 에너지를 계산한다.

2.1 ESS 배터리 모델

현재 2차전지 ESS 시장에서 주로 사용되는 리튬이온배터리와 인산철 배터리는 모두 현재 충전 상태(SOC), 현재 수명 상태(SOH), 현재 사용 부하 등 다양한 요소에 의해 내부 저항값이 변하게 되는데, 특히 일반적으로 권장되는 배터리 충전 구간인 80~20% 구간에서는 그중에서도 배터리 작동환경 온도에 따른 내부 저항 변화가 큰 편이다. 일반적으로 상온 이상의 온도에서는 내부 저항 변화가 크지 않으나, 저온으로 내려갈수록 내부 저항이 많이 증가한다[18~21]. 그림 1은 다양한 재

료와 용량에 따른 2차전지의 온도별 내부 저항 실험치에 대한 그래프이다.

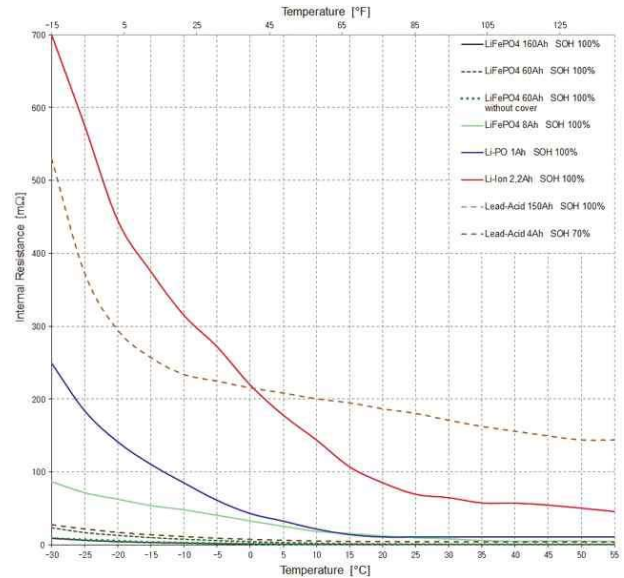


Fig. 1 Internal resistance profile of various Lithium-Ion battery [20]

시간 t 시점에 ESS 운영시설 온도를 $x(t)$, ESS 배터리의 SOC 수치를 $y(t)$ 라 한다. $R(x, y)$ 를 온도 x , SOC레벨 y 상태에서의 배터리 내부 저항이라고 하고, 해당 시점에 $I(t)$ 만큼의 전류 부하가 걸릴 때 내부 저항에 의한 전력손실은 다음과 같다.

$$W_{BLoss}(t) = I(t)^2 R(x(t), y(t)) \quad (1)$$

일반적인 배터리 가동 영역인 SOC 0.2-0.8 구간에서 SOC 변화에 의한 내부 저항값 변화는 크지 않으므로 [22], 본 논문에서는 내부 저항값을 외부 온도에만 의존하는 함수 $R(x(t))$ 라 가정한다.

2.2 ESS 운영시설 온도조절 모델

ESS 장비가 설치된 공간과 외부 사이에 온도 차이가 존재하면 열전도가 일어나게 된다. 이때 ESS 운영시설의 온도가 상승하는 방향으로 열전도가 일어나게 되면 배터리 내부 저항에 큰 영향이 없으나, 하락하는 방향으로 열전도가 일어나게 되면 시설 내부 온도를 조절하여 배터리 내부 저항을 유지하는 것이 에너지 및 비용이 절감될 수 있다.

ESS 운영시설 내부와 외부 간 열전도율을 계산하기 위해서는 먼저 시설 외벽의 K-value가 필요하다. 시설 외벽을 각각 맞닿은 구역이 다르거나 재질이 다른 N 개의 하위 부분으로 나누고, 각 부분의 면적을 A_i , 개별 K-value를 K_i , 맞닿은 부분의 외부 온도를 T_i 라고 했을 때, 현재 온도가 x 인 운영시설의 총 관류 열 손실은 다음과 같다.

$$W_{HLoss} = \sum_{i=1}^N K_i A_i (T_i - x) \quad (2)$$

위와 같은 시설에 출력 W 의 전열 장치를 작동하였을 때, 시간에 따른 온도 $x(t)$ 에 대해 다음이 성립한다.

$$cm\dot{x} = \sum_{i=1}^N K_i A_i (T_i - x) + W \quad (3)$$

c 는 ESS 시설 내부 공기의 비열, m 은 시설 내부 공기의 총중량이며, 시설에서 가동되는 센서가 다양할 경우 시설 내 습도 등의 추가적인 정보를 통해 실시간 변수로 계산하거나 사전 데이터를 통해 상수로 계산할 수 있다.

3. ESS 에너지 및 비용 효율 분석 기초 모델

본 문단에서는 ESS 운영시설이 외부와 맞닿은 부분의 외부 온도 및 열전도율이 균일하다고 가정하고, 시뮬레이션 시간 동안 외부 온도 및 전력 소비가 일정한 기초적인 모델을 가정한다.

이때 출력 W 의 전열 장치를 작동하고 초기 온도를 T_0 라고 하면 시간에 따른 온도 변화 $x_W(t)$ 는 다음과 같다.

$$x_W(t) = \left(T_0 - T - \frac{W}{KA} \right) \exp\left(-\frac{KA}{cm}t \right) + T + \frac{W}{KA} \quad (4)$$

전열 장치를 t_r 시간 동안 작동할 때 소모되는 에너지는 $W_h(W, t_r) = Wt_r$ 이다. 한편, 같은 시간 동안 절약되는 ESS 배터리 내부 저항 전력손실은 다음과 같다.

$$W_s(W, t_r) = \int_0^{t_r} I^2 (R(x_0(t)) - R(x_W(t))) dt \quad (5)$$

ESS 배터리를 충전하기 위한 전기요금이 에너지 단위당 p_e , 전열 장치에 의한 난방 요금이 p_h 라고 했을 때, ESS 운영시설 난방에 의한 순수익은 다음과 같다.

$$P(W, t_r) = p_e W_s(W, t_r) - p_h W_h(W, t_r) \quad (6)$$

가상의 ESS 구동 환경으로 표 1의 상수 조건들을 가정한다.

Table 1 ESS basic model virtual environment constant

K	$1 (W/m^2\text{ }^\circ\text{C})$	T	$-10 (^\circ\text{C})$
A	$10 (m^2)$	T_0	$0 (^\circ\text{C})$
m	$12.5 (\text{kg})$	I	$20 (A)$
c	$1012 (J/\text{kg }^\circ\text{C})$	p_e	$130 (\text{₩}/\text{kWh})$
		p_h	$350 (\text{₩}/\text{kWh})$

또한 ESS 시설 온도에 따른 ESS 배터리 시스템의 총 내부 저항이 그림 2와 같다고 가정한다.

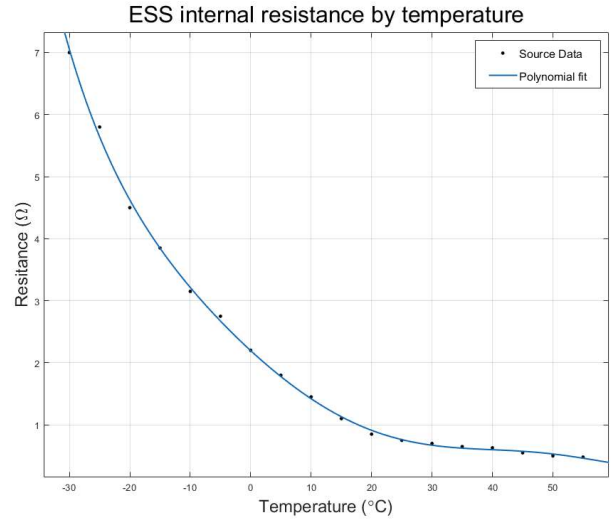


Fig. 2 ESS internal resistance by facility temperature

그림 3은 위와 같이 기술된 환경에서 난방 장치를 각각 0, 100, 200, 300, 400 W 출력으로 6시간 동안 가동했을 시 발생하는 순수익의 변화 그래프이다. 난방 장치를 가동하지 않는 시나리오와 비교해 ESS를 1시간 이상 2.5시간 미만 가동할 경우 100 W 출력으로 현재 온도를 유지하는 것이 최선이며, 2.5시간 이상 가동할 경우 200 W 출력으로 실내 온도를 10°C 까지 올리는 것이 최선임을 알 수 있다.

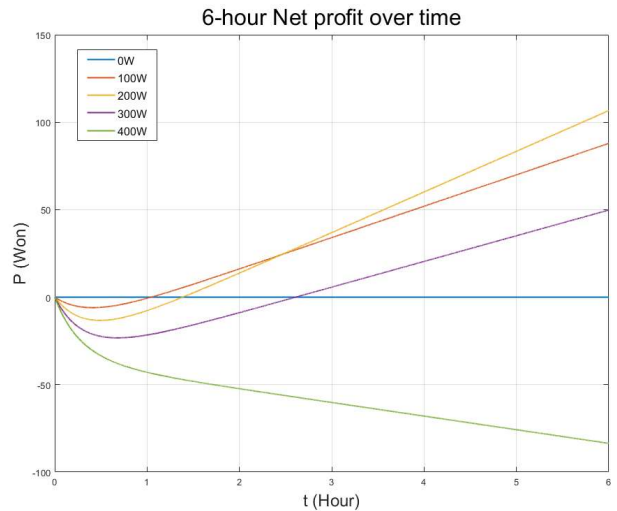


Fig. 3 Net profit time evolution by constant heating power

4. ESS 에너지 및 비용 효율 분석 시계열 모델

ESS를 운영하는 실제 상황에서는 시간에 따라 전력 부하와 외부 온도가 변하게 된다. 그러므로 시간에 따른 ESS 운영시설 온도 공식(4)을 사용할 수 없다. 또한 그림 3에서 알 수 있듯이 장기적으로 비용 효율이 극대화되는 난방 전략이 단기적

으로는 난방을 하지 않는 전략보다 효율이 낮으므로 탐욕 알고리즘은 최선의 제어에 부적합하다는 것을 알 수 있다. 따라서 (3)을 이용한 시계열 수치해석을 활용해야 한다.

앞선 실험에서 난방 장치를 고정된 출력으로 가동한 것과 달리, 본 실험에서는 난방 장치 출력을 실시간으로 제어하여 ESS 시설 내부 온도를 일정하게 유지한다고 가정한다.

4.1 시계열 입력 데이터

그림 4는 2023년 1월 23일 서울시 시간대별 전력 수요량 데이터에 비례한 가상의 전류 수요량 변화이다[23]. 그림 5는 같은 시간대의 서울시 시간대별 외부 온도 변화이다[24].

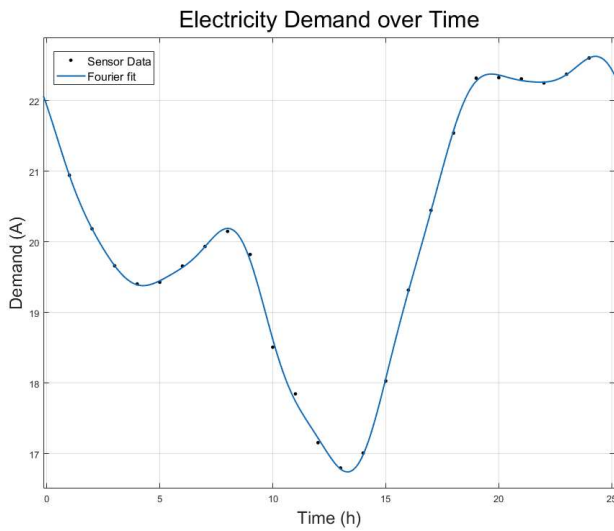


Fig. 4 Electricity demand over time

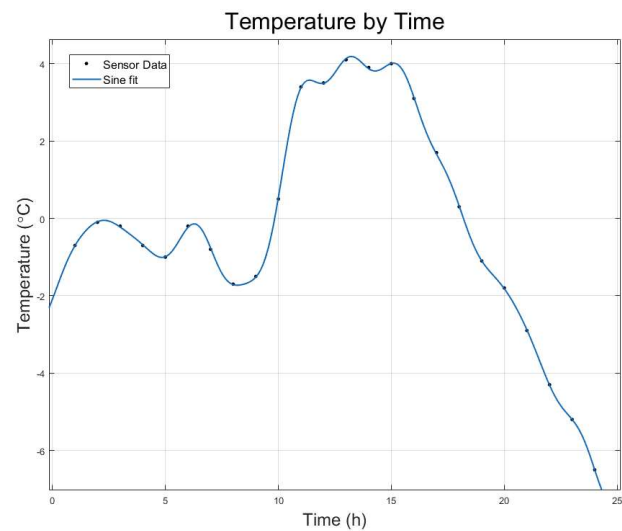


Fig. 5 Outside temperature over time

4.2 기온 유지 모델

외부의 기온 변화를 $T(t)$ 라고 가정하였을 때, 실내 온도를 $x^{\circ}\text{C}$ 이상으로 유지하기 위해서는 시간대별 전열 장치 출력 $W_x(t)$ 가 다음을 만족하여야 한다.

$$W_x(t) = \max\left(\sum_{i=1}^N K_i A_i (x - T_i(t)), 0\right) \quad (7)$$

이와 같은 조건에서 전열 장치를 t_r 시간 동안 작동할 때 소모되는 에너지는 다음과 같다.

$$W_h(x, t_r) = \int_0^{t_r} W_x(t) dt \quad (8)$$

한편, 같은 시간 동안 절약되는 ESS 배터리 내부 저항 전력 손실은 다음과 같다.

$$W_s(x, t_r) = \int_0^{t_r} I(t)^2 (R(x_0(t)) - R(x(t))) dt \quad (9)$$

ESS 배터리를 충전하기 위한 전기요금이 에너지 단위당 p_e , 전열 장치에 의한 난방 요금이 p_h 라고 했을 때, ESS 운영시설 난방으로 절약되는 비용은 다음과 같다.

$$P(x, t_r) = p_e W_s(x, t_r) - p_h W_h(x, t_r) \quad (10)$$

4.3 시계열 모델 시뮬레이션

기초 모델 시뮬레이션에서 사용한 가상의 ESS 구동 환경에서 시계열 예측 데이터가 따로 입력되는 외부 온도와 전력 수요를 제외하고 표 2의 상수 조건들을 가정한다.

Table 2 ESS time-series virtual model environmental constant

K	$1 (W/m^2\text{°C})$	c	$1012 (J/kg\text{°C})$
A	$10 (m^2)$	p_e	$130 (\text{₩}/\text{Wh})$
m	$12.5 (\text{kg})$	p_h	$350 (\text{₩}/\text{Wh})$

또한 ESS 시설 온도에 따른 ESS 배터리 시스템의 총 내부 저항이 그림 2와 같으며, 시간대별 전력 수요와 외부 온도 변화가 각각 그림 4, 그림 5와 같다고 가정한다.

위와 같이 기술된 환경에서 ESS 운영시설 내부 온도를 각각 $0, 2, 4, 6, 8, 10^{\circ}\text{C}$ 이상으로 유지하도록 난방 장치를 제어

한다고 가정할 때, 24시간 동안의 ESS 운영시설 내부 온도 변화는 그림 6과 같다.

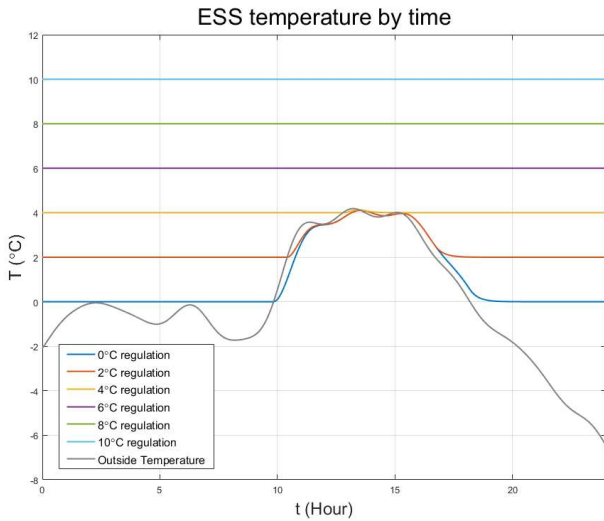


Fig. 6 ESS facility temperature time evolution by minimum temperature constraint

24시간 동안의 ESS 운영시설 난방 시설 전력 소모 변화는 그림 7과 같다.

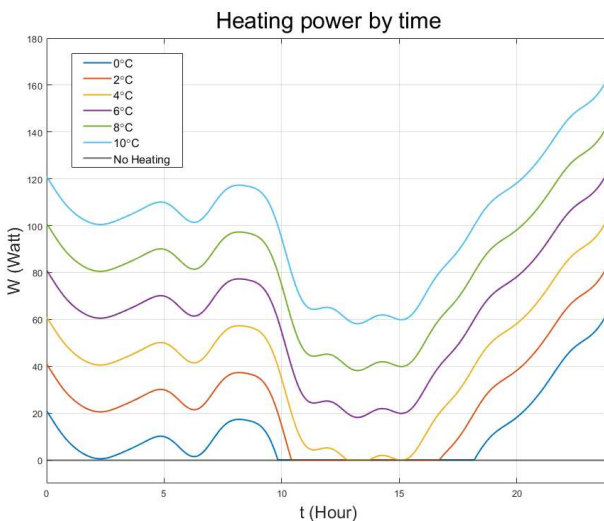


Fig. 7 ESS heating power time evolution by minimum temperature constraint

그림 8은 각 온도 유지 프로파일별 6시간 동안의 누적 순수의 변화 그래프, 그림 9는 24시간 동안의 누적 순수의 변화 그래프이다. 단기적으로는 난방 시설 가동에 의한 비용이 발생하지만 2시간 이내에 ESS 내부 저항 억제에 의한 비용 절감 효과가 난방 시설 가동 비용을 웃돌게 되며, ESS를 총 몇 시간

가동하느냐에 따라 ESS 운영시설 내부 온도를 6°C 혹은 8°C 이상으로 유지하는 것이 최선임을 알 수 있다.

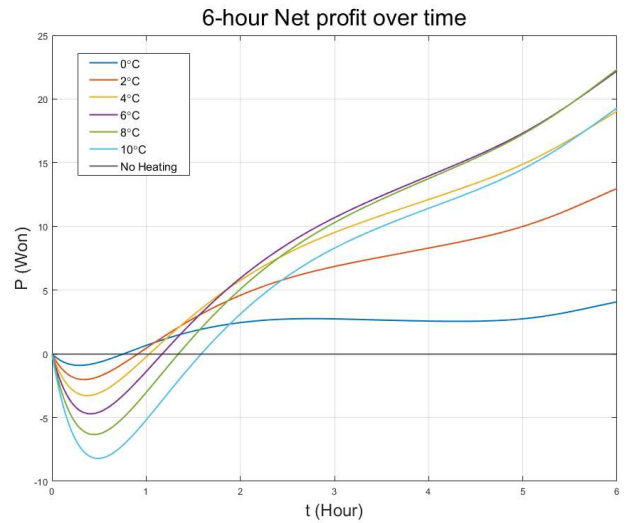


Fig. 8 6-hour net profit time evolution by minimum temperature constraint

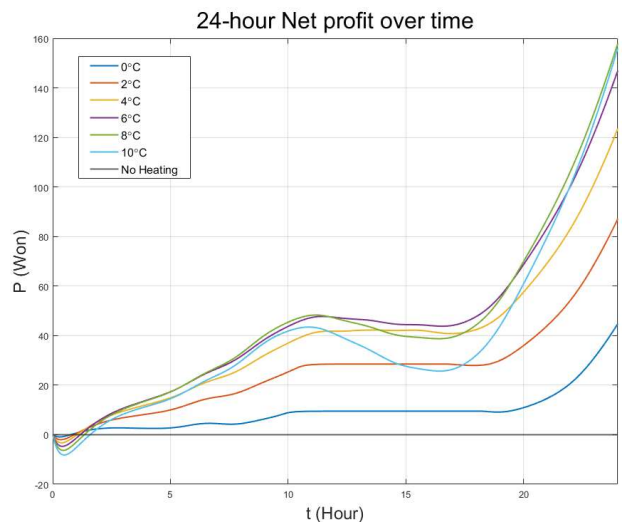


Fig. 9 24-hour net profit time evolution by minimum temperature constraint

5. 결론

본 논문에서는 ESS 가동 시설 환경에 대한 기본 정보가 있고 시설의 센서 데이터에 의해 향후 전력 수요 및 기온에 대한 시계열 예측이 이뤄졌을 때, 정해진 난방 장치 출력 혹은 최저 유지 온도에 대해 시간에 따라 변하는 누적 비용 절감을 정량화하여 계산하고 최선의 비용 절감을 위한 난방 계획을 수립하는 방법론을 제시하였다. 단기적으로 전열 장치의 난방에 의한 ESS 내부 저항 억제 효과를 예측하기 어려운 탐욕 알고리즘에 비해, 2시간 이상 미래를 예측하고 이에 기반해 ESS 시설 운영을 시뮬레이션하면 일정한 시설 온도를 유지하는 것이 장기적인 비용 절감으로 이어진다는 것을 확인할 수 있다.

향후 본 논문에서 제시된 방식을 기반으로 ESS 시설이 속한 본 시설의 구조, ESS 사용에 따라 변하는 배터리 SOC에 의한 내부 저항 변화, 에너지 그리드에서의 전력 단계 변화, 실제 환경에서 사용되는 현실적인 난방 제어 방식 등을 적용하여 더욱 정확하게 현실이 반영된 비용분석이 가능한 수리 모델을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 ‘차세대 AC/DC Hybrid 배전 네트워크 기술개발사업’으로 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2023-00281219)

References

- [1] A. Khan, S. Yaqub, M. Ali, A. W. Ahmad, H. Nazir, H. A. Khalid, N. Iqbal, Z. Said, and K. Sopian, "A state-of-the-art review on heating and cooling of lithium-ion batteries for electric vehicle," *Journal of Energy Storage*, vol. 76, 109852, 2024.
- [2] X. Zhang, Z. Li, L. Luo, Y. Fan, and Z. Du, "A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles," *Energy*, vol. 238, pt. A, 121652, 2022.
- [3] S. Wu, R. Xiong, H. Li, V. Nian, and S. Ma, "The state of the art on preheating lithium-ion batteries in cold weather," *Journal of Energy Storage*, vol. 27, 101059, 2020.
- [4] C.-Y. Wang, G. Zhang, S. Ge, T. Xu, Y. Ji, X.-G. Yang, and Y. Leng, "Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures," *Nature*, vol. 529, pp. 515-518, 2016.
- [5] Z. G. Qu, Z. Y. Jiang, and Q. Wang, "Experimental study on pulse self-heating of lithium-ion battery at low temperature," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 135, pp. 696-705, 2019.
- [6] S. Guo, R. Xiong, K. Wang, and F. Sun, "A novel echelon internal heating strategy of cold batteries for all-climate electric vehicles application," *Applied Energy*, vol. 219, pp. 256-263, 2018.
- [7] J. Zhu, Z. Sun, X. Wei, H. Dai, and W. Gu, "Experimental investigations of an AC pulse heating method for vehicular high power lithium-ion batteries at subzero temperatures," *Journal of power sources*, vol. 367, pp. 145-157, 2017.
- [8] Y. Ji, and C. Y. Wang, "Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures," *Electrochimica Acta*, vol. 107, pp. 664-674, 2013.
- [9] Y. Wang, Z. Rao, S. Liu, X. Li, H. Li, and R. Xiong, "Evaluating the performance of liquid immersing preheating system for lithium-ion battery pack," *Applied Thermal Engineering*, vol. 190, 116811, 2021.
- [10] Z. Ling, X. Wen, Z. Zhang, X. Fang, and T. Xu, "Warming-up effects of phase change materials on lithium-ion batteries operated at low temperatures," *Energy Technology*, vol. 4, no. 9, pp. 1071-1076, 2016.
- [11] C. Alaoui, and Z. M. Salameh, "A novel thermal management for electric and hybrid vehicles," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 54, no. 2, pp. 468-476, 2005.
- [12] X. Jin, J. Q. Li, C. N. Zhang, and P. E. Wu, "Researches on modeling and experiment of Li-ion battery PTC self-heating in electric vehicles," *Energy Procedia*, vol. 104, pp. 62-67, 2016.
- [13] Z. Lei, C. Zhang, J. Li, G. Fan, and Z. Lin, "Preheating method of lithium-ion batteries in an electric vehicle," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 289-296, 2015.
- [14] H. Ji, J. H. Peck, and C. D. Gang, "Experimental Study on the Power Consumption Reduction of ESS Constant Temperature System with Phase Change Material," *SAREK Summer Conference Proceedings*, pp. 417-421, 2022.
- [15] S. Hong, J. H. Kim, D. S. Choi, and K. Baek, "Development of surface weather forecast model by using LSTM machine learning method," *Atmosphere*, vol. 31, no. 1, pp. 73-83, 2021.
- [16] J. Son, J. Cha, and S. Lee, "Transformer Model Architecture for Short-Term Load Forecasting," *KICS Winter Conference Proceedings*, 2020.
- [17] J. M. Park, D. W. Lee, K. Joe, and H. S. Yoon, "Transformer-Based Photovoltaic Power Prediction Model Utilizing Multiple Weather Forecasts," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, vol. 43, no. 6, pp. 87-95, 2023.
- [18] L. Liao, P. Zuo, Y. Ma, X. Chen, Y. An, Y. Gao, and G. Yin, "Effects of temperature on charge/discharge behaviors of LiFePO₄ cathode for Li-ion batteries," *Electrochimica Acta*, vol. 60, pp. 269-273, 2012.
- [19] T. T. Lou, W. G. Zhang, H. Y. Guo, and J. S. Wang, "The internal resistance characteristics of lithium-ion battery based on HPPC method," *Advanced materials research*, vol. 455, pp. 246-251, 2012.
- [20] A. Łebkowski, "Temperature, overcharge and short-circuit studies of batteries used in electric vehicles," *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 69-75, 2017.
- [21] M. Razi, Z. Daud, Z. Asus, I. Mazali, M. Ardani, and M. Hamid, "A review of internal resistance and temperature relationship, state of health and thermal runaway for lithium-ion battery beyond normal operating condition," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 88, no. 2, pp. 123-132, 2021.
- [22] Q. Chen, J. Jiang, H. Ruan, and C. Zhang, "Simply designed and universal sliding mode observer for the SOC estimation of lithium-ion batteries," *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 6, pp. 697-705, 2017.
- [23] MOIS Public Data Portal, KPX hourly electricity demand

data, <https://www.data.go.kr/data/15065266/fileData.do>, 2024.

- [24] Korea Meteorological Administration, Automatic Weather System data, https://www.weather.go.kr/weather/observation/aws_table_popup.jsp, 2024.

저자소개



이상준 (SangJoon Lee)

Sangjoon Lee received the B.S. degrees in computer science and mathematics, and the M.S. degree in mathematics from the University of Illinois Urbana-Champaign, Champaign, IL, USA, in 2007 and 2009, respectively, and the Ph.D. degree in mathematics from the University of Connecticut, Mansfield, CT, USA, in 2019. He is currently a Postdoctoral Researcher with Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), South Korea. His current research interests include physics-based machine learning, algorithm design, and system optimization.



이현용 (Hyunyong Lee)

Hyunyong Lee received the B.S. degree in computer science from Chonnam National University, South Korea, in 2003, and the M.S. and Ph.D. degrees in computer science from Gwangju Institute of Science and Technology, South Korea, in 2005 and 2010, respectively. He is currently a Principal Researcher with the Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), South Korea. His research interests include diagnosis, anomaly detection, deep learning, and uncertainty.



고석갑 (Seok-Kap Ko)

Seok-Kap Ko received the B.S. degree, and the M.S. and Ph.D. degrees in information telecommunication engineering from Soongsil University, Seoul, South Korea, in 1997, 2002, and 2009, respectively.

He is currently a Principal Researcher with Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), South Korea. His research interests include machine learning for energy management systems.