

에너지저장장치 적용을 위한 리튬이온 기반 전기차 사용 후 배터리 특성 분석

김주희¹ · 양동철² · 김지현³ · 박종성⁴⁺ · 김창현¹⁺

¹한국광기술원 시에너지연구센터, 선임연구원

²한국배터리연구조합 나주분원팀, 선임연구원

³녹색에너지연구원 태양에너지연구실, 선임연구원

⁴경상국립대학교 에너지공학과, 교수

Characteristics Analysis of Electric Vehicle Used Li-ion Battery for Application to Energy Storage System

Kim Ju-Hee¹ · Yang Dong Cheol² · Kim Ji Hyun³ · Park Jongsung⁴⁺ · Kim Changheon¹⁺

¹Senior Researcher, Artificial Intelligence & Energy Research Center, Korea Photonics Technology Institute

²Senior Researcher, Naju Branch, Battery R&D Association of Korea

³Senior Researcher, Solar Energy R&D Department, Green Energy Institute

⁴Professor, Department of Energy Engineering, Gyeongsang National University

[†]Corresponding author: chkim@kopti.re.kr, j.park@gnu.ac.kr

Abstract

Ecofriendly policies have led to a continuous increase in the supply of electric vehicles (EVs) and energy storage systems (ESSs). Therefore, technologies for reusing and remanufacturing used EV batteries must be developed. Although the lifespan characteristics of EV battery packs may vary according to the conditions of use, their range of use is usually 100%–80%, considering the performance output based on EV standards. When used as ESSs, they may be used for an additional 5–10 years. In this study, we analyzed the electrical characteristics of used battery modules to classify the reuse of used EV batteries. The used battery modules of an electric bus with operation records were utilized in this study. For the electrical characteristics, used battery module's voltage, internal resistance, and charge-discharge tests were conducted.

Keywords: 사용 후 배터리(Used battery), 전기차(Electric vehicle), 리튬이온 배터리(Li-ion battery)

1. 서론

현재 전세계적인 기후변화의 위기로 탄소저감에 많은 노력을 기울이고 있으며, 탄소 중립, CO₂ 넷제로(Net Zero)를 달성해야만 하는 기로에 서 있다. 국제에너지기구 IEA (International Energy Agency)는 2100년을 기준으로 지구의 연간 온도 상승을 1.5°C 이



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.44, No.2, pp.65-72, April 2024
<https://doi.org/10.7836/kSES.2024.44.2.065>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 16 February 2024

Revised: 25 March 2024

Accepted: 31 March 2024

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하로 낮추기 위해서는 전 세계가 함께 넷제로를 달성해야 한다는 시나리오를 발표하였다¹⁾. 이에 따라, 기존의 화석연료에서 재생에너지로의 에너지 전환이 이루어지고 있으며, 기존 화석연료를 전기에너지로 대체하고자 많은 노력을 기울이고 있다. 이에 따라, 산업의 전기화(Electrification) 및 운송의 전기화가 탄소중립을 달성하는데 핵심이 될 것이다. 이 중 전기차 보급의 활성화 및 배터리 자원 순환체계는 이러한 탄소중립의 목표 달성을 위한 전략의 중심에 서 있다²⁾.

2022년 상반기 전 세계의 전기차 신규 판매량은 430만 대로 조사되며 지속적으로 성장할 것으로 예측된다³⁾. 전세계 많은 나라에서 전기차의 확대보급을 위하여 보조금을 지급하고 있으며, 우리나라에서도 「환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률」 및 「환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률 시행령」에 따라 보조금을 지급하고 있다. 전기차의 확대 보급에 따라, 전기차의 수명이 다하기전에 발생하는 전기차 사용 후 배터리가 지속적으로 발생되고 있다. 해당 배터리들은 잔존수명이 있거나, 배터리에 포함되어 있는 유가금속의 재활용 가치가 상승함에 따라, 전기차 사용 후 배터리 시장 또한 급성장하고 있다³⁾. 전기차 사용 후 배터리의 세계 시장 규모는 2030년 187 GWh, 55억 5,800만 달러(약 6조 원)이며 2040년 1,849 GWh에 달하며, 이는 573억 9,500만 달러(약 66조 원)의 규모로 추정된다⁴⁾. 전기차 사용 후 배터리는 전기차에서 사용이 종료된 후 발생된 배터리의 잔존가치 및 안정성을 평가하고, 이에 따라, 재사용(Reuse), 재제조(Refabricate), 재활용(Recycle)으로 분류될 수 있다. 재사용(Reuse)은 전기차로부터 발생된 배터리를 다시 전기차에 사용하거나, 발생된 형태로 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS)에 활용하는 것을 의미한다. 재제조(Refabricate)는 전기차에서 발생된 배터리 팩을 해체하고, 성능 및 안정성 평가 후 새로운 팩 단위로 제조하여 사용하는 것을 의미한다. 재활용(Recycle)은 배터리를 분해, 파쇄 및 회수공정을 거쳐 배터리에 포함되어 있는 유가금속을 회수하는 방법을 의미한다. 이 중 재사용(Reuse)은 전기차로부터 발생된 사용 후 배터리를 분해, 재조립 등의 공정을 거치지 않고 성능 및 안정성 평가 후 다른 용도로 사용이 가능하므로, 경제적이며, 효율적인 방법이라고 할 수 있다. 효율적인 재사용을 위해서는 해당 배터리의 이력 및 특성을 면밀하게 분석할 필요가 있으며, 이러한 분석에 따라 향후 활용처를 결정할 수 있다.

이에 따라, 본 연구에서는 전기차로부터 발생된 사용 후 배터리의 재사용 평가를 위하여, 주행 이력이 남아있는 전기버스를 기반으로 배터리의 이력 특성 분석 및 전기 버스에서 탈거된 사용 후 배터리 모듈의 전기적 특성을 분석하였다. 전기버스 운행 이력 분석 시 일정 이상의 전기버스를 운행함에 따라 State of Charge (SoC) 상에서 큰 차이는 나타내지 않지만, 전기버스 운행구간을 1회 운영하였을 때 초기시점인 2018년도 대비 후반 시점인 2020년도에는 배터리의 평균 SoC 감소율이 35.5%에서 39.6%로 초기보다 약 4.1% 증가하였고, 이를 통하여 배터리의 방전속도가 초기와 비교하여 빨라 졌음을 확인할 수 있었다. 또한, 사용 후 배터리 모듈의 open circuit voltage (OCV)에 따른 비교 분석 시, 내부저항 및 절연저항에서는 큰 차이가 없었으나 배터리 모듈의 용량 측정 진행 시 일부 배터리 모듈을 제외하고 대부분의 모듈의 용량이 165 ~ 170 Ah로 초기 용량(188 Ah) 대비 약 88 ~ 90%로 감소하였다.

2. 실험

본 실험을 위하여 사용된 사용 후 배터리 모듈 사진 및 모듈의 사양은 Fig. 1 및 Table 1과 같다. 연구의 신뢰성 향상을 위해서 전기차 배터리 모듈은 주행 이력 정보가 남아있는 전기버스를 선정하였으며, 신뢰성 확보를 위하여 운행 기간이 2018년에서 2020년인 전기버스 중에서 배터리 최종 탈거 시점을 기준으로 운행 거리가 260,000 ~ 290,000 km인 전기버스 2대의 배터리 운행 이력 특성 분석 및 사용 후 배터리 모듈의 전기적 특성 분석을 진행하였다. 전기버스의 배터리 수명에 영향을 미칠 수 있는 충전 스케줄링 및 버스 노선, 충전소 위치 등의 운행 정보⁵⁾는 본 연구에서는 적용되지 않았다. 탈거된 사용 후 배터리 모듈은 초기 사양으로 188 Ah의 capacity와, 3.46 kWh의 nominal energy 및 18.4 V의 nominal voltage 특성을 가지고 있었다.



Fig. 1 Image of electric bus used battery module

Table 1 Specification of electric bus used battery module

Nominal Capacity [Ah]	188
Nominal Energy [kWh]	3.46
Nominal Voltage [V]	18.4 (cell 3.68)
Max. Voltage [V]	20.75 (cell 4.15)
Min. Voltage [V]	13.5 (cell 2.70)
Size [mm]	(W) 499.8
	(L) 180.2
	(H) 168.8
Weight [Kg]	24.5

2.1 전기버스 배터리 이력 특성 분석

전기버스 배터리는 총 34개의 모듈로 구성되어 있으며, 모듈의 경우 10개의 셀이 5직렬/2병렬로 구성되어 있다. 운영데이터는 2018년 운행 초기부터 탈거 전까지의 계측데이터를 보유하고 있으며, 배터리 구성 단위 별 보유 데이터는 Table 2와 같다. 셀 단위에서는 전압을 계측하고, 모듈 단위에서는 SoC와 온도 정보가 측정되었다.

셀 전압의 경우에는 개별 셀에 대한 전압이 아닌 2개의 병렬 연결된 셀 전압의 평균값이며, 모듈 온도의 경우에는 모듈을 구성하는 임의의 지점에서 측정된 값이다. 팩 단위에서는 평균 전압 및 전류의 정보를 계측하고 있다.

Table 2 Measurement data for each electric bus

Data	Cell	Module	Pack
Average SOC		○	
Average Voltage	○		○
Current			○
Max. temperature		○	
Min. temperature		○	

2.2 사용 후 배터리 모듈 특성 분석

전기버스에서 탈거 된 사용 후 리튬 이온배터리 모듈은 재사용 분류를 위하여 단체표준인 전기자동차용 리튬 이온배터리 재사용 분류 방법(SPS-C KBIA-10702-01-7416:2021)에 따라 진행하였으며, 전기적 검사는 개방회로전압 OCV, 절연저항, 내부저항 및 완전 충·방전 시험을 측정하였다. 배터리 모듈 내부의 누전전류 및 이상상태 확인을 위하여 아래 Fig. 2와 같이 내구성 시험기(LBT22013, Arbin Korea)를 사용하여 배터리를 충·방전 시험을 하였으며, 배터리 모듈의 온도를 지속적으로 측정할 수 있도록 구성하였다.

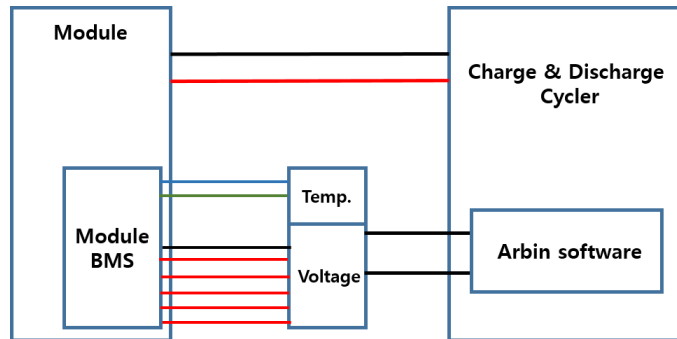


Fig. 2 Configuration diagram of full charge/discharge test in battery module

충·방전 시험 절차는 단체표준인 리튬 이차 전지를 적용한 보조 배터리-성능 시험방법(SPS-C KBIA-10100-01-7309:2018)에 따라 진행하였으며, Table 3과 같이 진행하였다. 충·방전 시험은 주변온도($25 \pm 5^\circ\text{C}$)에서 수행되며, 표준 충전 및 표준 방전으로 구성된다. 방전 절차는 제조사가 제시하는 방전종료전압까지 방전 하며, 방전 후 안정상태에 도달하기까지의 휴지시간은 30분으로 하였다. 충전 절차는 제조사가 제시하는 방법으로 충전종료 전압으로 충전하였으며, 충전 후 안정상태에 도달하기까지의 휴지시간은 2시간으로 하였다.

Table 3 Test procedure of full charge/discharge test in battery module

Step	Mode	Condition	Cut-off condition	Time
1	Rest	-	-	5 min
2	CC discharge	I = 62.7 A (1/3 C)	-	30 sec
3	CC discharge	I = 62.7 A (1/3 C)	15.5 V (3.10 V_Cell)	180 min
4	Rest	-	-	30 min
5	CC charge	I = 62.7 A (1/3 C)	20.7 V (4.15 V_Cell)	180 min
	CC charge	20.7 V (4.15 V_Cell)	3.76 A (1/50 C)	
6	Rest	-	-	120 min
7	CC discharge	I = 62.7 A (1/3 C)	-	30 sec
8	CC discharge	I = 62.7 A (1/3 C)	17.5 V (3.50 V_Cell)	150 min
9	Rest	-	-	30 min
10	CC charge	I = 62.7 A (1/3 C)	17.9 V (3.58 V_Cell)	30 min
	CV charge	17.9 V (3.58 V_Cell)	3.76A (1/50 C)	

3. 결과 및 고찰

3.1 전기버스 배터리 이력 특성

전기차의 리튬 이온 배터리는 SoC의 80% 이상으로 충전이 계속되면 배터리의 성능 저하뿐만 아니라 에너지 소비 또한 증가하게 된다⁶⁾. 과충전은 전지전압의 상승과 음극표면에서 리튬이 금속 리튬으로 석출되기 시작하며, 과방전은 구리의 용출이 일어나게 된다⁷⁾. 따라서 과충전과 과방전은 리튬이온 배터리의 특성 중 전지용량을 크게 저하시키는 요인으로 과충전 및 과방전을 방지하기 위해 SoC 100% 충전 및 0% 방전을 수행하지 않는다. Fig. 3은 전기버스 운영 기간 동안의 평균 SoC를 나타낸다. Fig. 3(a)는 전체 운영 기간 동안의 평균 SoC이며, Fig. 3(b)는 임의로 선별한 날짜(2018년 9월 9일(in the begin)와 2020년 9월 19일(in the end))에서의 평균 SoC이다. 전체 평균 SoC 데이터를 확인하면, 일부 구간에서 데이터가 유실되었으나 전체적으로 초기에는 평균 SoC가 10%에서 90% 운영되었으나, 일부 구간에서 데이터가 유실된 후인 2020년 6월 21일에는 평균 SoC가 96.2%까지 충전되는 등 초기 대비하여 전체적으로 평균 SoC 값이 불규칙적으로 운영됨을 확인할 수 있다(Fig. 3(a)). 정확한 분석을 위하여 Fig. 3(b)와 같이 초기 시점인 2018년도와 후반 시점인 2020년도에서의 하루 동안의 평균 SoC 데이터를 분석하였다. 전기버스가 운행구간을 1회 운영하였을 때, 2018년도에는 50 ~ 90%의 평균 SoC를 나타냈으나 2020년도에는 40 ~ 90%의 평균 SoC를 나타냈다. 이를 통하여 동일구간 1회 운영하였을 때, 배터리의 평균 SoC 감소율이 초기보다 증가하였음을 확인할 수 있다. 리튬 이온 배터리는 충·방전 사이클이 많아질수록 전해질의 분해 반응으로 음극 표면에 고체 전해질 계면이 점차 두꺼워져 전해질 소모로 리튬 이온원의 고갈이 발생하는 LLI (loss of lithium inventory), 활물질의 손실 LAM (loss of active material), 전극이 집전체로부터 전극이 집전체로부터 떨어져 나가 전극의 크랙 발생으로 이온 및 전하이동이 저하되는 전도도 손실 CL (conductivity loss) 등 다양한 열화 원인이 존재할 수 있다⁸⁻¹⁰⁾. 따라서 이러한 배터리 열화현상은 지난

연구결과들을 통해 예기할 수 있는 현상이라고 판단될 수 있다.

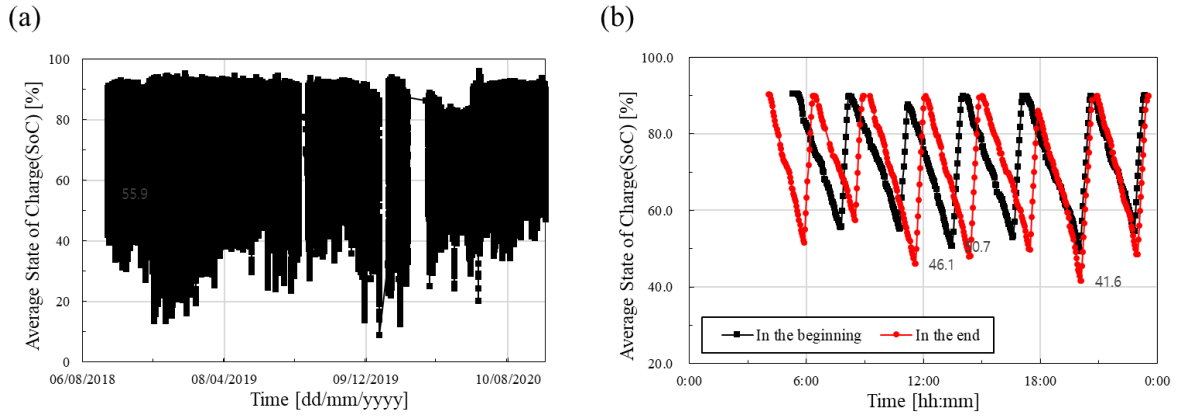


Fig. 3 (a) Average SoC during the electric bus operation period and (b) average SoC for one day at the beginning (Sept. 19, 2018) and at the end (Sept. 19, 2020) of operation

배터리 모듈의 초기시점과 후반 시점에서의 모듈 특성 변화를 확인하기 위하여 배터리 모듈의 최고온도, 최저온도 및 배터리 팩의 평균 전압 측정을 진행하였다(Fig. 4). Fig. 4(a)와 (b)는 초기시점인 2018년도와 후반 시점인 2020년도에서의 하루 동안의 최고온도와 최저온도를 비교한 그래프이며, Fig. 4(c)는 배터리 팩의 평균 전압을 측정한 결과이다. 초기시점인 2018년도에는 모듈의 온도가 30°C에서 최대 42°C까지 12°C 상승하였고, 후반 시점인 2020년도에는 모듈의 온도가 31°C에서 최대 45°C까지 14°C 상승함을 확인하였다. 배터리 모듈의 최고 온도가 3°C 차이로 큰 차이로 나지는 않지만, 고온인 상태에서 발열량에 의해 SoC의 감소율 증가, 배터리의 OCV와 용량이 저하^{11,12)} 되기 때문에 배터리의 온도관리가 필요함을 판단할 수 있다.

배터리 팩의 평균 전압의 경우(Fig. 4(c)), 전기버스가 운행구간을 1회 운영하였을 때, 운영 초기에는 없었으나 나중에는 배터리 팩의 평균 전압이 방전되거나 운영에 따라 초기보다 낮아짐을 확인할 수 있었다. Fig. 3(b) 및 Fig. 4의 결과를 기반으로 전기버스 배터리 모듈의 열화를 추측할 수 있으며, 정확한 분석을 위하여 탈거후 개별 모듈의 전기적 특성을 분석하였다.

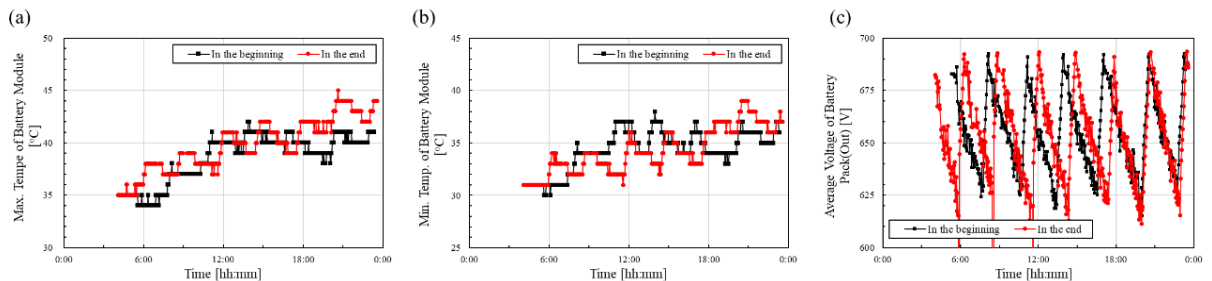


Fig. 4 (a) Max. temperature of battery module, (b) min. temperature of battery module and (c) average voltage of battery pack(out) for one day at the beginning (Sept. 19, 2018) and at the end (Sept. 19, 2020) of operation

3.2 사용 후 배터리 모듈 전기적 특성

전기버스에서 탈거된 사용 후 배터리 모듈의 이상 여부를 확인하기 위해 OCV, 내부저항, 절연저항 및 충·방전 테스트(배터리 용량) 등의 전기적 특성을 분석하였다. Fig. 5는 충·방전 테스트 결과에 따라 OCV에 따른 사용 후 배터리 모듈의 용량(Fig. 5(a))과 내부저항(Fig. 5(b)) 및 절연저항(Fig. 5(c))의 분포를 분석한 결과이다.

그래프를 분석한 결과에 따르면 전체적으로 충·방전 테스트 결과에 따른 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다. 하지만 OCV에 따른 사용 후 배터리의 모듈의 용량 분석 결과(Fig. 5(a)), 34개의 배터리 모듈에서 3개를 제외한 31개의 모듈의 용량이 165 ~ 170 Ah 사이로 초기 용량인 188 Ah 대비 약 88 ~ 90%로 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 3.1절 전기버스 배터리 이력 특성에서 설명한 것과 같이 충·방전 사이클 증가에 따라 전해질의 분해 반응으로 배터리 모듈의 열화 현상이 발생할 것으로 판단된다. 반면, OCV에 따른 내부저항 및 절연저항 분석 결과(Fig. 5(b), (c)), 배터리 용량과 달리 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다.

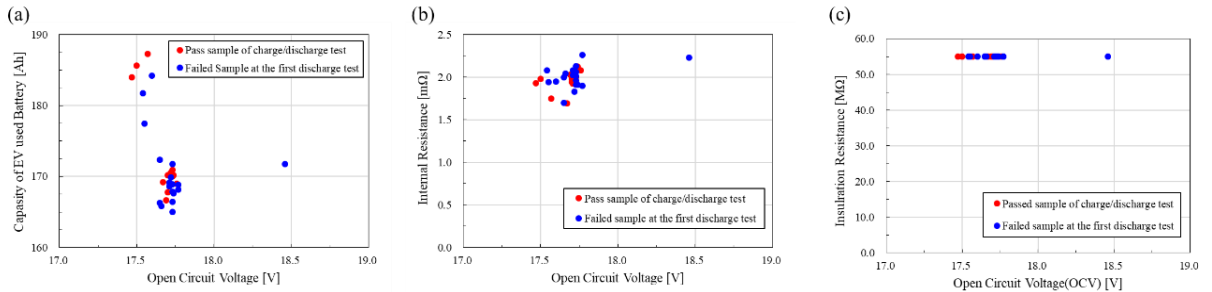


Fig. 5 Distribution graph of (a) capacity and (b) internal resistance and (c) insulation resistance according to open-circuit voltage

4. 결론

본 연구에서는 사용 후 배터리를 활용하여 에너지저장장치로 적용하기 위하여 전기버스의 운행 이력을 이용하여 배터리 모듈의 특성을 분석하였다. 또한 전기버스에서 배터리 모듈을 탈거 진행 후, 사용 후 배터리 모듈의 전기적 특성 분석을 진행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 전기버스 운행 이력 분석 시 일정 이상의 전기버스를 운행함에 따라 큰 차이는 나타내지 않지만, 전기버스 운행구간을 1회 운영하였을 때 초기시점인 2018년도 대비 후반 시점인 2020년도에는 배터리의 평균 SoC 감소율이 35.5%에서 39.6%로 초기보다 약 4.1% 증가하였다.
- (2) 사용 후 배터리 모듈의 용량 측정 진행 시 34개의 배터리 모듈에서 3개를 제외한 31개의 모듈의 용량이 165 ~ 170 Ah 사이로 초기 용량인 188 Ah 대비 약 88 ~ 90%로 감소하였다. 이는 통상 초기 대비 80%까지 저하된 리튬이온 배터리를 second-life 배터리로 구분¹³⁾하는 시장에서는 8 ~ 10%를 상회하는 성능으로, 재사용 배터리로 사용이 적합하다고 판단된다.

후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지기술개발사업(No. 20215710100310) 및 중소벤처기업부의 지역특화산업육성+(R&D)사업(No. S3260942)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

REFERENCES

1. International Energy Agency, World Energy Outlook, 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. last accessed on the 7th January 2024.
2. Choi, H. K., Prediction of Demand for Photovoltaic Power Plants for Electric Vehicle Operation, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 40, No. 1, pp. 35-44, 2020, <https://doi.org/10.7836/kses.2020.40.4.035>.
3. Korea Transport Institute, Mobility Transfer Brief, Vol. 1, No. 3, September 2022, https://www.koti.re.kr/user/bbs/briefView.do?bbs_no=1797. last accessed on the 16th February 2024.
4. Samjong KPMG Economic Research Institute Inc., Business Focus: Battery Circular Economy, EV Battery Market Rising and Its Responding Business Strategy (translated from Korean), Research Report in March 2022. https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/kr/pdf/2022/business-focus/kr-bf-recycling-battery-20220311_Final.pdf. last accessed on the 16th November 2023.
5. Jiang, M., Zhang, Y., Zhang, C., Zhang, K., Zhang, G., and Zhao, Z., Operation and Scheduling of Pure Electric Buses Under Regular Charging Mode, 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 1894-1899, November 2018, Maui, HI, USA, <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569667>.
6. Kostopoulos, E. D., Spyropoulos, G. C., and Kaldellis, J. K., Real-world Study for the Optimal Charging of Electric Vehicles, Energy Reports, Vol. 6, pp. 418-426, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.008>.
7. Ahn, J. H., Ha, J. H., and Seo, M. S., Battery Management System for 4kWh Class Lithium Ion Battery Pack, Proceedings of the KIPE Conference, pp. 152-153, July 2012, Pyeongchang, Republic of Korea. <https://korea-science.kr/article/CFKO201233469094269.pdf>. last accessed on the 16th February 2024.
8. Yang, Z., Tanim, T. R., Liu, H., Bloom, I., Dufek, E. J., Key, B., and Ingram, B. J., Quantitative Analysis of Origin of Lithium Inventory Loss and Interface Evolution over Extended Fast Charge Aging in Li Ion Batteries, ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 15, No. 31, pp. 37410-37421, 2023, <https://doi.org/10.1021/acsami.3c06084>.
9. Seo, G., Ha, J., Kim, M., Park, J., Lee, J., Park, E., Bong, S., Lee, K., Kwon, S. J., Moon, S-p., Choi, J., and Lee, J., Rapid Determination of Lithium-Ion Battery Degradation: High C-rate LAM and Calculated Limiting LLI, Journal of Energy Chemistry, Vol. 67, pp. 663-671, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.11.009>.
10. Schmidt, A. P., Bitzer, M., Imre, Á. W., and Guzzella, L., Model-based Distinction and Quantification of Capacity Loss and Rate Capability Fade in Li-Ion Batteries, Journal of Power Sources, Vol. 195, No. 22, pp. 7634-7638, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.06.011>.
11. Park, K. S., Kim, S. K., Kang, Y. S., and Kim, K. C., A Study on the Heating and Efficiency Characteristics of Lithium-ion Battery Modules for the Vessel, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 72, No. 12, pp. 1657-1662, 2023, <https://doi.org/10.5370/KIEE2023.72.12.1657>.
12. Park, C. E., Yoo, S. W., Jeong, Y. H., and Kim, K., Effect of Thermal Management of Lithium-Ion Battery on Driving Range of Electric Vehicle, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, No. 5, pp. 22-28, 2017, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.5.22>.
13. Hesse, H. C., Martins, R., Musilek, P., Naumann, M., Truong, C. N., and Jossen A., Economic Optimization of Component Sizing for Residential Battery Storage Systems, Energies, Vol. 10, No. 7, 835, 2017.