

직병렬조합 배터리팩의 안전운용을 위한 Z-score 기반 이상 동작 검출 방법

강덕훈¹, 이평연¹, 김덕한¹, 김성근², 김종훈[†]

Z-score Based Abnormal Detection for Stable Operation of the Series/Parallel-cell Configured Battery Pack

Deokhun Kang¹, Pyeong-Yeon Lee¹, Deokhan Kim¹, Seung-Keun Kim², and Jonghoon Kim[†]

Abstract

Lithium-ion batteries have been designed and used as battery packs with series and parallel combinations that are suitable for use. However, due to its internal electrochemical properties, producing the battery's condition at the same value is impossible for individual cells. In addition, the management of characteristic deviations between individual cells is essential for the safe and efficient use of batteries as aging progresses with the use of batteries. In this work, we propose a method to manage deviation properties and detect abnormal behavior in the configuration of a combined battery pack of these multiple battery cells. The proposed method can separate and detect probabilistic low-frequency information according to statistical information based on Z-score. The verification of the proposed algorithm was validated using experimental results from 10S3P battery packs, and the implemented algorithm based on Z-score was validated as a way to effectively manage multiple individual cell information.

Key words: BMS (Battery Management System), Z-score, Statistical method, Abnormal detection

1. 서 론

리튬이온 배터리는 충전과 방전을 반복하여 사용하는 대표적인 이차전지이다. 또한, 에너지 밀도, 출력 특성, 충전-방전 효율, 자가 방전 특성 등이 우수하여 기존 이차전지를 대체하며 적용 분야가 확장되고 있다^[1]. 하지만 최근 에너지저장장치(Energy storage system, ESS), 전기자동차(Electric vehicle, EV) 등 리튬이온 배터리가 적용된 시스템에서의 화재와 안전성 문제가 대두되면서 리튬이온 배터리의 상태 관리 기술과 화재 예방 기술

개발에 관한 관심이 고조되고 있다^[2]. 특히, 배터리는 내부의 소재, 제조 공정상의 한계로 인하여 서로 다른 특성을 가질 수 있는 것으로 알려져 있으며 이는 노화에 대한 특성이 연구되면서 점점 확실해지고 있다^{[3],[4]}. 또한, 리튬이온 배터리의 온도, 부하 조건과 같은 동작 환경은 배터리의 성능과 노화(Aging)에 직접 영향을 준다^[5]. 이러한 배터리의 제조 및 운영상 영향들로 인해 배터리 팩 내부 단일 셀마다 다른 성능을 나타낼 수 있는 가능성을 증가시킨다. 게다가, 리튬이온 배터리는 사용 목적에 부합하는 에너지 저장 및 출력을 위해서 다수 개의 배터리 셀 직·병렬 조합으로 구성된다. 최근에는 EV, ESS의 고용량·고출력 성능이 요구되면서 수백 - 수천 개의 배터리 개별 셀이 연결되면서 배터리 시스템 내부의 개별 셀 상태 불균형 문제의 가능성 증가는 물론 이를 모니터링 하는 방법이 점점 어려운 문제가 되고 있다. 이러한 문제는 시스템의 효율적 운영과 안전성 확보를 위해 배터리 상태를 모니터링하고 관리하는 것에 대한 중요성 및 고도화가 더욱 강조되고 있다^{[6],[7]}.

리튬이온 배터리의 상태 관리를 수행하는 배터리관리 시스템(Battery management system, BMS)은 배터리의

Paper number: TKPE-2021-26-6-2

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: whdgns0422@cnu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea

Tel: +82-42-821-5657 Fax: +82-42-821-7606

¹ Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea

² Plant Engineering Team, Production Development Division, Automotive, Hyundai Motor Group, Korea

Manuscript received May 3, 2021; revised May 31, 2021; accepted Aug. 5, 2021

— 본 논문은 2020년 추계학술대회 우수추천논문임

전압, 전류, 온도 등 측정 정보를 이용하여 배터리 충전 상태(State-of-charge, SOC), 배터리 건강 상태(State-of-health, SOH) 등 다양한 배터리의 상태 정보를 추정하고 이 정보를 활용하여 제어를 수행한다. 따라서 BMS에 탑재되는 상태 정보를 추정하는 알고리즘의 정확도와 신뢰성은 매우 중요하기 때문에 다양한 상태에 대한 정보와 많은 연구가 수행되고 있다^{[8],[9]}. 특히, EV, ESS 등 대용량 고효율 배터리 시스템에 대한 수요가 증가하면서 다수 배터리 셀에 대한 측정 정보를 관리하고 배터리 상태를 모니터링 하는 BMS 고도화에 대한 연구가 중요해지고 있다. 특히, 리튬이온 배터리가 탑재된 다양한 애플리케이션에서의 빈번한 화재 사고 발생으로 원인 분석과 화재 예방을 위한 다양한 방법에 대해 연구가 수행되고 있다^{[10]-[13]}.

배터리의 화재는 다양한 원인에 의해 발생할 수 있으며, 가장 직접적인 원인으로 열 폭주(Thermal runaway, TR)에 의한 배터리 셀의 발화·폭발이 있다. TR은 배터리 내부 에너지가 열로 방출되는 현상으로 급격한 온도 증가가 나타나면서 배터리 셀 내부 전해질(Electrolyte)의 연쇄적인 부반응과 분리막(Separator) 손상으로 인해 가스 분출, 연기 발생, 화재·폭발이 연쇄적으로 발생한다. TR에 대한 정확한 원인과 대책이 마련되지 않았지만, 배터리 손상에 의한 내부 구조물 파손, 부반응 등으로 인한 온도 상승으로 TR이 유발될 가능성이 있음을 연구 결과에서 제시되고 있다^{[14],[15]}. 배터리 손상의 원인을 기계적·전기적·열적 요인으로 분류할 수 있으며, 이러한 요인들은 배터리 셀의 내부단락을 유발하여 TR이 발생하는 원인이 될 수 있다^[16]. 따라서 TR을 예방하고 화재를 예방하는 방법으로 배터리의 손상에 의한 내부 단락 등 배터리의 이상 동작을 효과적으로 검출하고 관리하는 모니터링 방법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다^{[17],[18]}.

배터리의 이상 상태를 검출하는 방법으로 모델 기반 방법(Model-based methods)^{[19],[20]}과 데이터 기반 방법(Data-driven methods)^[21]이 대표적이다^{[22],[23]}. 모델 기반 방법은 상태 추정(State estimation) 정보 혹은 파라미터 추정(Parameter estimation) 정보를 기반으로 이상 상태를 검출할 수 있다. 또한, 데이터 기반 방법은 데이터를 기반으로 신호 처리(Signal processing) 혹은 인공지능(Artificial intelligence methods) 방법을 활용하여 신호의 정상과 비정상을 판단하고 이를 이용하여 배터리의 이상 동작을 검출한다. 하지만, 배터리의 비선형적인 응답 특성으로 이상 여부를 모니터링하고 검출하는 데 한계가 발생한다. 특히, 동작 환경 변화 혹은 노화 상태에 따라 배터리 응답 특성의 변화로 나타날 수 있으며, 이러한 상태 변화를 반영하여 배터리의 이상 신호를 탐지하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 다수개의 배터리 셀 구성에서 배터리의 이상 동작 검출을 위하여 통계적인 정보를 활용하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 10S3P 배터리 모듈의

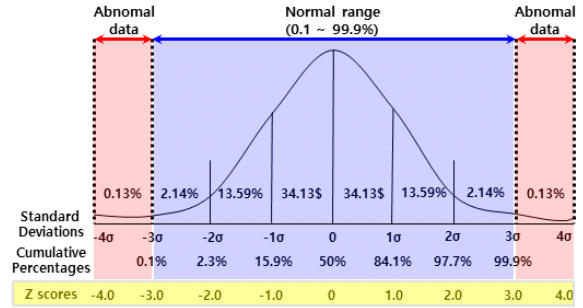


Fig. 1. Characteristics of normal distribution data.

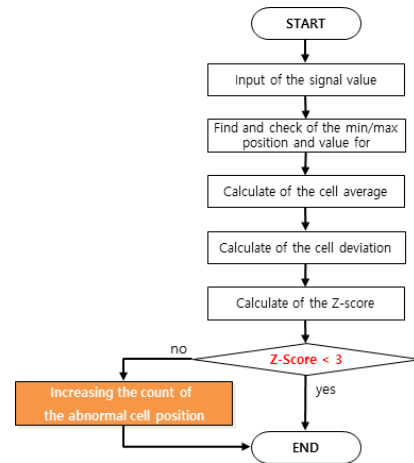


Fig. 2. Box plot for Z-score.

노화 실험 데이터를 이용하여 시뮬레이션 기반으로 성능을 검증하여 제안 방법의 활용 가능성을 제시하였다.

2. Z-score 기반 이상 동작 검출

2.1 Z-score와 확률 밀도

Z-score는 측정 지표 간의 단위가 상이한 경우 상호 비교가 어렵다는 문제점을 최소화하고 확률적인 접근을 통해 이상 값을 효과적으로 검출할 수 있다. 확률변수 X 의 평균이 μ 이고 표준 편차가 σ 일 때, 확률변수 X 가 평균 μ 와 표준 편차와의 거리로 정의되며 다음의 식 (1)을 이용하여 산출할 수 있다.

$$Z\text{-score} = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

Z-score는 측정값을 평균이 0이고 표준 편차가 1인 표준정규분포로 환산하여 비교한 값으로, 측정값이 정규 분포라는 가정으로 Z-score를 활용할 수 있으며, 이를 적용하면 확률적으로 측정 가능성이 낮은 값을 효과적으로 검출할 수 있다. 정규분포의 경우 대부분의 데이터가 표준 편차의 3배의 값 이내에 분포(99.8%)하기 때문에 이의 특징을 활용하여 특정 임계값에 대한 지정 없이 이상치를 효과적으로 검출할 수 있다.

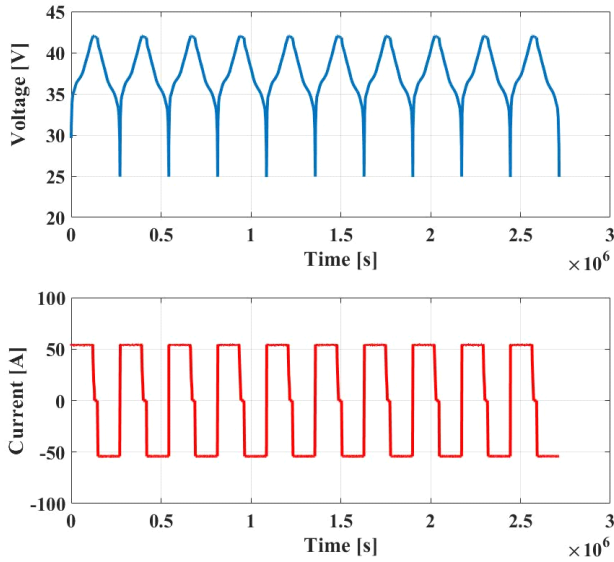


Fig. 3. Cycle life test profile for 10S3P battery pack.

2.2 이상 동작 검출 구현 방법

배터리의 과전압, 저전압, 연결 불량, 절연, 단락 등 다양한 배터리 고장 중에서도 과전압, 저전압, 단락은 배터리의 내부 부반응에 의해 노화를 가속하거나 위험을 발생시키는 고장으로 분류된다. 따라서 배터리팩 내부 단일 셀의 비정상적인 변화를 감지하는 것은 치명적 결함을 사전에 찾아 분석할 수 있는 정보이며^[24], 개별 셀의 상태를 가장 직접적으로 모니터링할 수 있다. 배터리가 동작하는 충전/방전 구간은 물론, 동작하지 않는 휴지 구간에서도 배터리의 팩을 구성하는 모든 배터리 셀의 측정값은 유사한 셀 상태를 가정하면 측정된 전압값은 정규분포를 만족해야 한다. 따라서 정규분포의 유의확률 99.8%인 표준 편차의 ±3배 이상을 나타내는 전압 신호를 이상 신호로 구분할 수 있으며, 이를 바탕으로 알고리즘을 구현하였다.

3. 시뮬레이션을 위한 시험

3.1 노화 시험 수행 방법

본 논문에서 제안된 이상 동작 검출방법에 대한 시뮬레이션 수행을 위해 10S3P 배터리 팩에 대한 노화 시험(Cycle life test)을 수행하였다. 배터리 팩은 3개의 병렬 연결로 구성된 파워치 배터리가 10개의 직렬 연결된 배터리 팩이다. 배터리 개별 셀의 공칭 전압은 3.63V, 용량은 60Ah이다. 리튬이온 배터리는 환경 온도에 따라 성능이 변화되기 때문에, 시험이 수행되는 동안 배터리 팩을 챔버 내부에 놓아 환경 온도를 동일한 상온(25°C)으로 유지하였다. 데이터 로거는 3개의 병렬로 구성된 배터리 셀 10개의 전압과 전체 배터리 팩의 전압, 전류를 기록하였으며, 전류는 션트 저항(Shunt resistor)으로 배터리 팩에 인가되는 전류 값을 측정하였다.

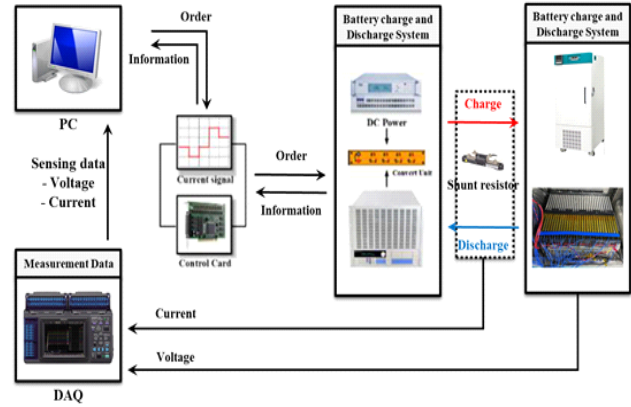


Fig. 4. Experimental setup for battery cycle life test.

TABLE I
EXPERIMENTAL SETUP

Equipment	Purpose	Specification
Battery system (AN8075)	Battery charge and discharge system	120 V, 75 A
DAQ (HIOKI)	Voltage measurement data acquisition	Resolution: 500 μV Interval: 10 - 50 ms
Chamber (JEIO TECH)	Environment Temp. control chamber	Temp. range: -20 - 100°C

배터리 팩은 배터리 충·방전기에 연결되어 설정된 프로파일에 따라 사이클을 반복한다. 프로파일은 완전 충전(Full charge)과 완전 방전(Full discharge)을 반복하는 사이클로, 휴지 시간은 30분으로 설정하였다. 충전과 방전 시 인가되는 전류의 크기는 0.3 C-rate로 하였으며, 충전 구간에서는 CC-CV(Constant current-constant voltage) 방법으로, 방전 구간에서는 CC(Constant current) 방법으로 충전과 방전이 수행되었다. 배터리 팩은 완전 충전-완전 방전을 1 사이클로 약 200 사이클 동안 실험을 수행하고 데이터가 수집되었다.

3.2 노화 시험 데이터의 검토

그림 5-10에 첫 번째 사이클과 224 사이클의 시험에서 확보된 각각의 데이터를 제시하였다. 측정 전압 정보(그림 5와 그림 8)에서 노화가 진행됨에 따라 특정 셀의 전압이 충전 과정에서 최대 전압을, 방전 구간에서 최소 전압을 나타내고 있음이 확인되었다. 이 정보는 전압 편차 정보에서 더 명확하게 확인할 수 있다. 전압 편차는 10개의 셀에서 측정된 전압값의 평균값과의 편차로 산출하였으며, 그 결과 그림 6과 9와 같다. 사이클 시작 지점에서 전압 편차가 확인되고 이후 편차가 줄어들다가 사이클이 끝나는 지점에서 크게 증가하는 경향의 첫 번째 사이클(그림 6)과는 다르게, 마지막 사이클(그림 9)에서는 특정 셀의 전압 편차가 지속적으로 발생하고

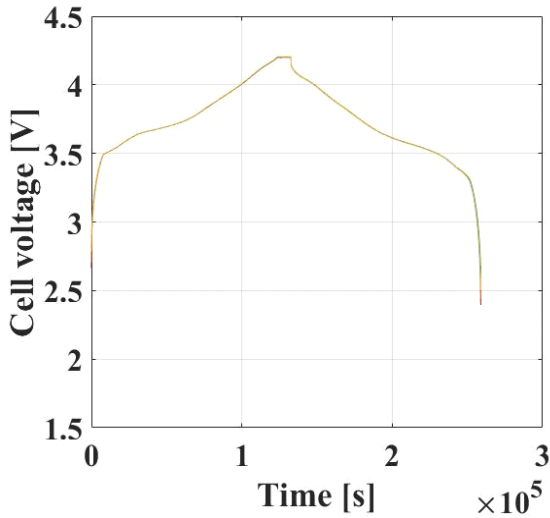


Fig. 5. The terminal cell voltage measurement result for 10 cells in the first cycle.

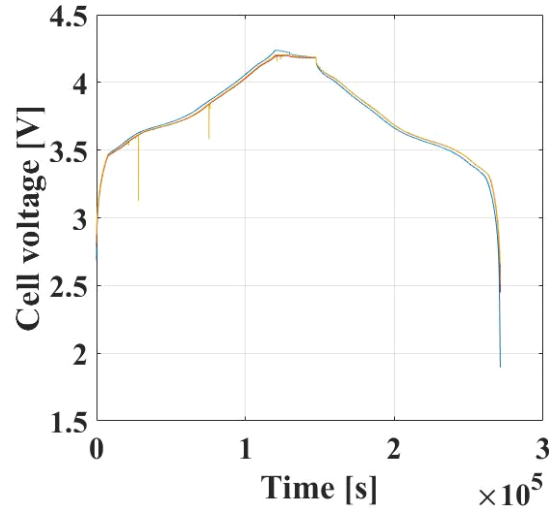


Fig. 8. The terminal cell voltage measurement result for 10 cells in the 224th cycle.

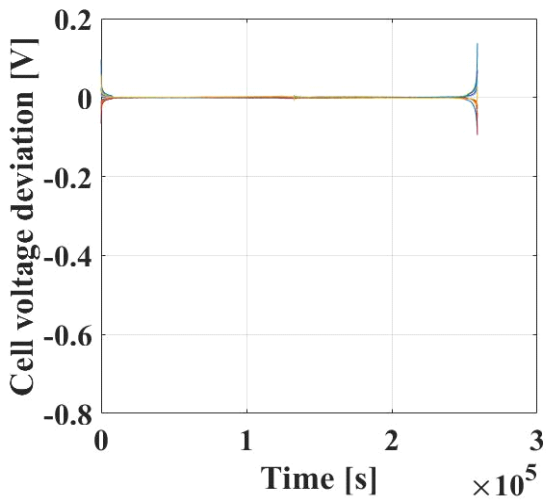


Fig. 6. The terminal cell voltage deviation result for 10 cells in the first cycle.

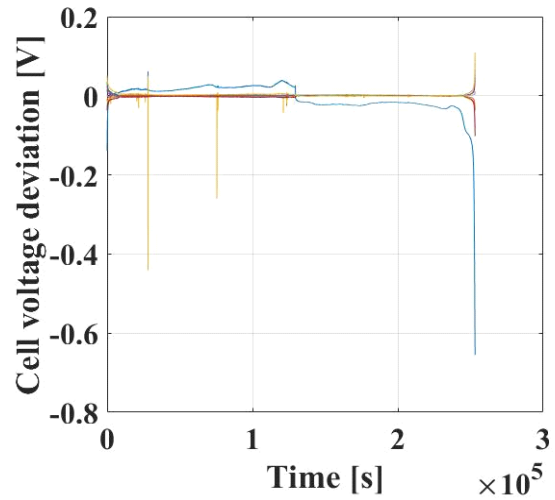


Fig. 9. The terminal cell voltage deviation result for 10 cells in the 224th cycle.

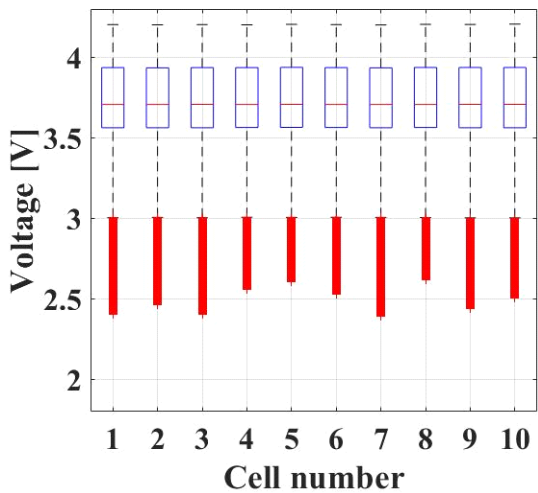


Fig. 7. The terminal cell voltage distributions result for 10 cells in the first cycle.

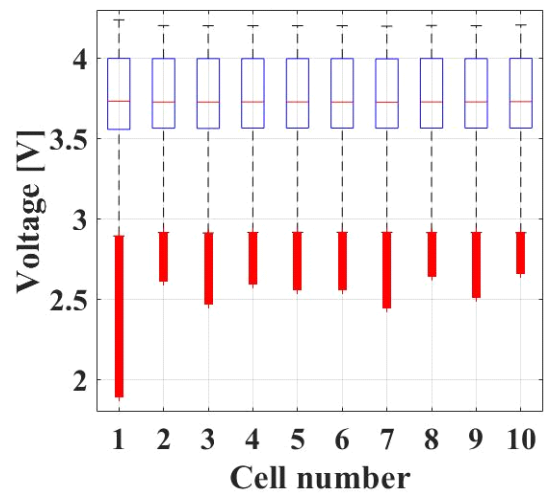


Fig. 10. The terminal cell voltage distributions result for 10 cells in the 224th cycle.

있음을 확인할 수 있다. 이때, 방전 끝단에서 최대 편차는 0.6[V]이다. 그림 7과 그림 10의 상자 그림(Box plot)을 통해서 노화에 따라 동작하는 전압 범위가 상승했음을 알 수 있고, 상한 전압(4.2V) 영역보다 하한 전압(2.5V) 영역에 이상점(Outlier)이 많이 나타남을 알 수 있다. 특히, 1번 위치 셀의 경우 최소 전압이 1.89V로 동작 범위를 크게 벗어나고 있음이 확인되었다. 최종적으로, 노화 사이클 시험이 224회 수행되는 동안에 1번 위치 셀에서 최대/최소 전압값이 나타내고 있음이 확인되었으며, 운영 전압 범위(2.5 - 4.2V)를 벗어난 범위(1.89 - 4.24V)에서 동작하고 있음이 확인되었다. 이러한 이상 동작 검출 방법을 연구하기 위하여 측정된 사이클 시험데이터의 전압 정보를 이용하여 해당 셀의 이상 동작을 효과적으로 검출하기 위한 방법으로 Z-score 기반의 이상 셀 검출 방법을 제안하고, 시뮬레이션 결과를 통해 그 결과를 검증하였다. 본 연구에서는 직렬연결에서 측정할 수 있는 전압 정보를 인자로 사용하였기 때문에, 병렬연결된 3개의 셀은 1개의 전압 정보로 대표되어 알고리즘 검증이 수행되었다.

그림 11은 노화 시험 전체 224 사이클 동안의 10개의 배터리 셀에 대한 표준편차의 변화 추이를 나타낸다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^k (X_n - \mu)^2}{n}} \quad (2)$$

여기서, n 은 셀의 개수를 말한다. 제시된 표준 편차는 10개의 배터리 셀의 측정 전압 값의 평균과의 편차에 대한 평균을 나타낸다. 각 사이클마다 표준 편차의 평균을 산출한 결과이며 이는 해당 사이클에서 데이터의 평균 산포도를 보여주는 지표이다. 산출된 표준 편차는 132 사이클에서 기울기가 변화함을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 결과 분석

4.1 이상 탐지 시뮬레이션 수행 방법

이상 탐지 시뮬레이션을 수행하기 위하여 그림 2의 순서도를 기반으로 알고리즘을 구현하였으며, 편차 값에 대한 정보를 더 민감하게 검출하기 위하여 매시간 평균값을 업데이트할 때, 최대/최소 전압 값을 제외한 8개의 셀에 대한 평균값을 기준으로 표준 편차와 Z-score를 산출하였다. 시뮬레이션 수행 시, 편차가 0 혹은 매우 낮은 경우 모든 셀이 근사한 전압 값으로 동작함에도 Z-score가 크게 산출될 수 있다. 이러한 오류 개선을 위해 전압 편차가 50mV 미만(기준 전압 편차)인 경우는 모든 셀이 기준 범위 내에서 동작한 것으로 간주하여 횡수 누적에서 제외하였다. 나머지 경우에 대하여, Z-score를 산출하고 그 값이 3 이상으로 산출되는 경우에는 신호를 누적하여 이상치의 누적을 확인하였다.

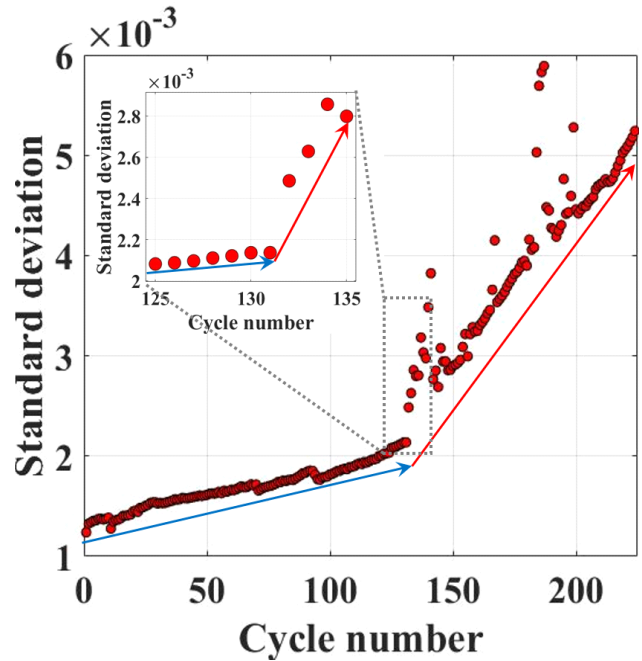


Fig. 11. Trend of standard deviation.

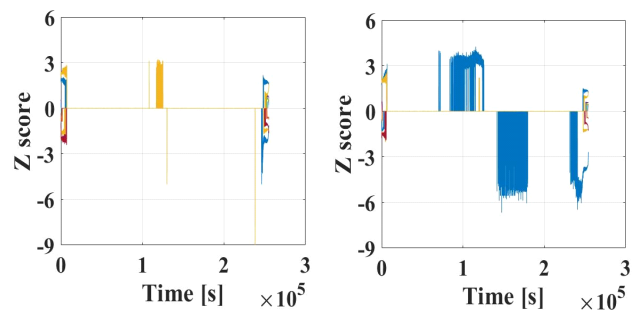


Fig. 12. Z-score value of the cycle (left: at 131 cycle, right: 132 cycle).

4.2 이상 탐지 시뮬레이션 결과

그림 12는 표준 편차의 기울기 변화가 변화되는 지점이었던 131 사이클과 132 사이클에서의 Z-score 산출 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 131 사이클의 경우, 특정 위치 지점에서만 값이 커지고 나머지 구간의 경우 거의 0에 가까운 것을 확인할 수 있다. 하지만, 132 사이클에서의 경우는 상대적으로 더 많은 영역에서 더 큰 Z-score 값이 산출됨을 확인할 수 있다. 실험에서 측정된 개별 셀의 전압 데이터 확인 결과 132 사이클부터 1번 위치의 셀이 충전 시에는 최대 전압을, 방전 시에는 최소 전압을 나타내는 현상을 확인하였으며, 이는 224번째 사이클에서의 전압 데이터가 제시된 그림 8에서도 확인할 수 있다. 즉, 132번째 사이클에서부터 개별 셀의 편차가 크게 증가하면서 그림 12에서와 같이 개별 셀의 전압에 대한 표준 편차 기울기가 변화되었으며, 그림 12에서와 같이 Z-score 산출 결과에서도 기준 값을 초과하는 결과로 확인할 수 있음을 확인하였다.

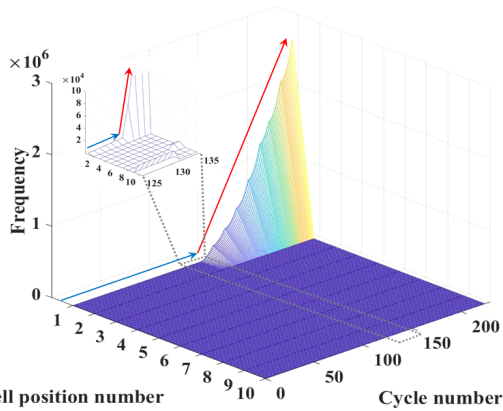


Fig. 13. Frequency of 224 cycle accumulated.

그림 13에서는 수명 시험이 수행되는 동안 기준치를 초과하는 Z-score의 횟수 누적 결과를 보여주고 있다. 표준 편차의 기울기 변화가 확인되었던 132 사이클 지점부터 1번 셀이 기준치를 초과하는 누적 산출이 확인되며, 이를 바탕으로 Z-score를 이용하여 산출된 정보는 통계적인 방법으로 측정 데이터에서 이상 데이터를 효과적으로 검출할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 직·병렬 조합된 배터리 팩에서 배터리 셀의 이상 동작을 검출하기 위하여 통계적 접근 방법을 적용하는 연구를 수행하였다. 정규 분포하는 측정값의 확률밀도를 임계 정보로 활용하여 배터리 셀의 이상 동작을 검출할 수 있다. 배터리 팩 실험 데이터를 활용하여 개별 셀의 이상 상태를 검출하는 방법으로 Z-score를 활용하였으며, 추출된 정보를 기반으로 신호의 누적을 통하여 배터리의 이상 동작을 검출하는 방법에 대한 연구를 수행하고 성능을 확인하였다.

실험 데이터 기반으로 수행된 시뮬레이션 결과에서 이상 동작을 나타내는 특정 셀 위치의 이상 신호가 누적되어 효과적으로 이상 동작 셀을 사전에 검출 가능함을 확인하였다. 시스템 수준에서도 직접 측정되는 배터리 셀의 전압 정보를 기반으로 수행되었으며, 이는 배터리 셀의 최댓값과 최솟값, 평균값에 대한 셀 정보만을 이용해서 이상 여부를 관리할 수 있는 방법으로, 실제 시스템 관리 지표로도 활용이 가능하다. 또한, 모니터링 정보에 대한 관리 임계 기준을 설정하는 방법으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 산업기술평
가관리원(KEIT) 지원을 받아 수행한 연구과제(No.
20011626) 및 한국전력공사 연구비(R21X001-3) 지
원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

References

- [1] Y. Wang, B. Liu, Q. Li, S. Cartmell, S. Ferrara, Z. D. Deng, and J. Xiao, "Lithium and lithium ion batteries for applications in microelectronic devices: A review," *Journal of Power Sources*, Vol. 286, pp. 330 - 345, 2015.
- [2] Z. Liao, S. Zhang, K. Li, G. Zhang, and T. G. Habetler, "A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, Vol. 436, 226879, 2019.
- [3] S. Wang, L. Shang, Z. Li, H. Deng, and J. Li, "Online dynamic equalization adjustment of high-power lithium-ion battery packs based on the state of balance estimation," *Applied Energy*, Vol. 166, pp. 44 - 58, 2016.
- [4] H. Heimes, A. Kampker, C. Lienemann, M. Locke, and C. Offermanns, "Lithium-ion battery cell production process," *VDMA Battery Production*, 2019.
- [5] R. Xiong, L. Li, and J. Tian, "Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods," *Journal of Power Sources*, Vol. 405, pp. 18 - 29, 2018.
- [6] S. Wang, C. Fernandez, C. Zou, C. Yu, L. Chen, and L. Zhang, "A comprehensive working state monitoring method for power battery packs considering state of balance and aging correction," *Energy*, Vol. 171, pp. 444 - 455, 2019.
- [7] U. K. Das, P. Shrivastava, K. S. Tey, M. Y. I. B. Idris, S. Mekhilef, E. Jamei, M. Seyedmahmoudian, and A. Stojcevski, "Advancement of lithium-ion battery cells voltage equalization techniques: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 134, 110227, 2020.
- [8] K. Liu, K. Li, Q. Peng, and C. Zhang, "A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles," *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 14, pp. 47 - 64, 2019.
- [9] X. Hu, F. Feng, K. Liu, L. Zhang, J. Xie, and B. Liu, "State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 114, 109334, 2019.
- [10] N. Williard, W. He, C. Hendricks, and M. Pecht, "Lessons learned from the 787 dreamliner issue on lithium-ion battery reliability," *Energies*, Vol. 6, pp. 4682 - 4695, 2013.
- [11] S. Abada, G. Marlair, A. Lecocq, M. Petit, V. Sauvante-Moynot, and F. Huet, "Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review," *Journal of Power Sources*, Vol. 306, pp. 178 - 192, 2016.
- [12] L. Kong, C. Li, J. Jiang, and M. G. Pecht, "Li-ion battery fire hazards and safety strategies," *Energies*, Vol. 11, 2191, 2018.
- [13] Q. Wang, B. Mao, S. I. Stolarov, and J. Sun, "A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 73, pp. 95 - 131, 2019.
- [14] Z. Liao, S. Zhang, K. Li, G. Zhang, and T. G. Habetler,

"A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, Vol. 436, 226879, 2019.

- [15] X. Feng, S. Zheng, D. Ren, X. He, L. Wang, H. Cui, X. Liu, C. Jin, F. Zhang, C. Xu, H. Hsu, S. Gao, T. Chen, Y. Li, T. Wang, H. Wang, M. Li, and M. Ouyang, "Investigating the thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries based on thermal analysis database," *Applied Energy*, Vol. 246, pp. 53 - 64, 2019.
- [16] X. Feng, D. Ren, X. He, and M. Ouyang, "Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries," *Joule*, Vol. 4, pp. 743 - 770, 2020.
- [17] Y. Kang, B. Duan, Z. Zhou, Y. Shang, and C. Zhang, "A multi-fault diagnostic method based on an interleaved voltage measurement topology for series connected battery packs," *Journal of Power Sources*, Vol. 417, pp. 132 - 144, 2019.
- [18] X. Lai, C. Jin, W. Yi, X. Han, X. Feng, Y. Zheng, and M. Ouyang, "Mechanism, modeling, detection, and prevention of the internal short circuit in lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives," *Energy Storage Materials*, Vol. 35, pp. 470 - 499, 2021.
- [19] S. Dey, Z. A. Biron, S. Tatipamula, N. Das, S. Mohon, B. Ayalew, and P. Pisu, "Model-based real-time thermal fault diagnosis of Lithium-ion batteries," *Control Engineering Practice*, Vol. 56, pp. 37 - 48, 2016.
- [20] Z. Chen, K. Xu, J. Wei, and G. Dong, "Voltage fault detection for lithium-ion battery pack using local outlier factor," *Measurement*, Vol. 146, pp. 554 - 556, 2019.
- [21] A. Naha, A. Khandelwal, S. Agarwal, P. Tagade, K. S. Hariharan, A. Kaushik, A. Yadu, S. M. Kolake, S. Han, B. Oh, "Internal short circuit detection in Li-ion batteries using supervised machine learning," *Scientific Reports*, Vol. 10, 1301, 2020.
- [22] Y. Kang, B. Duan, Z. Zhou, Y. Shang, and C. Zhang, "Online multi-fault detection and diagnosis for battery packs in electric vehicles," *Applied Energy*, Vol. 259, 114170, 2020.
- [23] X. Hu, K. Zhang, K. Liu, X. Lin, S. Dey, and S. Onori, "Advanced fault diagnosis for lithium-ion battery systems: A review of fault mechanisms, fault features, and diagnosis procedures," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 14, pp. 65 - 91, 2020.
- [24] Y. Shang, G. Lu, Y. Kang, Z. Zhou, B. Duan, and C. Zhang, "A multi-fault diagnosis method based on modified sample entropy for lithium-ion battery strings," *Journal of Power Sources*, Vol. 446, 227275, 2019.



강덕훈(姜惠勳)

1982년 7월 18일생. 2010년 제주대 기계시스템공학부 메카트로닉스공학전공 졸업. 2012년 군산대 기계공학과 졸업(석사). 2018년~현재 충남대 전기공학과 박사과정.



이평연(李平淵)

1992년 5월 31일생. 2017년 조선대 전기공학과 졸업. 2019년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 2019년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



김덕한(金德翰)

1985년 1월 21일생. 2013년 금오공대 전자공학부 졸업. 2020년 한국교통대 안전공학과 졸업(석사). 2020년~현재 충남대 전기공학과 박사과정. 2012년~현재 ㈜에이치스티 인증사업본부 에너지융합팀 과장.



김성근(金成根)

1979년 5월 5일생. 2002년 서울시립대 전자전기공학부 졸업. 2005년~현재 현대자동차 그룹(기아자동차 소속) 자동차부문 제조솔루션본부 생기기개발센터 책임매니저.



김종훈(金鍾勳)

1979년 4월 22일생. 2005년 충남대 정보통신공학부 전기전자전파전공 졸업. 2012년 서울대 전기컴퓨터공학부 졸업(공학; 석박 통합과정). 2012년~2013년 삼성SDI ES사업부 책임연구원. 2013년~2016년 조선대 전기공학과 조교수. 2016년~현재 충남대 전기공학과 부교수. 2018년~2020년 한국과학기술원 친환경센터 스마트자동차연구센터 겸직 교수. 2015년~현재 JPE Associate Editor. 2016년~2020년 당 학회 편집위원. 2017년 당 학회 학술위원. 2020년~현재 당 학회 연구사업이사. 2019년~현재 IEEE Senior Member.