

실제 BMS 운용 환경에서 DC 및 유사 AC 인자 기반 배터리 이상 모듈 검출 성능 비교

김민혁, 안종찬, 송민우, 이희찬, Zhang Yuxin, 김종훈*
충남대학교, *충남대학교

rlaalsgur168@naver.com, jongchanan94@gmail.com, bananakick4563@naver.com,
gmlcks1016@naver.com, zyx0605@naver.com, *whdgns0422@cnu.ac.kr

Comparative Performance Analysis of DC and Pseudo-AC Based Abnormal Battery Module Detection in Practical BMS Operation

Kim Min Hyeok, An Jong Chan, Song Min Woo, Lee Hee Chan, Zhang Yuxin,
Kim Jong Hoon*
Chungnam National Univ., * Chungnam National Univ.

요 약

본 논문에서는 기존 배터리 관리 시스템(Battery management system; BMS)에서 수집되는 DC(Direct current) 전압 데이터를 기반으로, 추가적인 하드웨어 없이 배터리 내부 상태를 반영할 수 있는 유사 AC(Alternating current) 인자를 도출하고 이를 이상 진단에 적용하였다. STFT 기반 신호 변환을 통해 시간-주파수 특성을 포함한 유사 AC 인자를 구성하고, 이를 이용해 서브 모듈 단위의 이상 검출 성능을 분석하였다. DC 전압 기반 Z-score 분석에서는 이상 셀이 포함된 서브 모듈이 검출되지 않은 반면, 유사 AC 인자와 DTW(Dynamic time warping) 기반 유사도 분석을 적용한 결과 해당 모듈들이 정상 모듈 대비 유의미하게 낮은 유사도를 나타냈다. 이를 통해 제안 기법은 DC 기반 진단의 한계를 보완하며, 기존 BMS 환경에서 AC 기반 진단 수준의 강력한 이상 검출 가능성을 제시한다.

I. 서 론

리튬이온 배터리 기반 에너지 저장 시스템(Energy storage system; ESS) 및 전기차(Electric Vehicles; EVs) 배터리 팩의 안전성과 신뢰성을 확보하기 위해 배터리 관리 시스템(Battery management system; BMS)의 역할은 점차 중요해지고 있다. 특히 운용 중 발생 가능한 셀 열화, 내부 저항 증가, 국부적 고장과 같은 이상 상태를 조기에 검출하는 것은 열폭주 및 시스템 수준의 사고를 예방하기 위한 핵심 과제로 인식되고 있다. 현재 상용 BMS에서는 주로 셀 전압, 전류, 온도와 같은 DC(Direct current) 기반 신호를 활용하여 배터리 상태를 진단하고 있으며, 이러한 방식은 구현이 용이하고 실시간성이 우수하다는 장점을 가진다. 그러나 DC 전압 신호는 부하 변화나 운전 조건 변화에 대해 상대적으로 강인한 반면, 배터리 내부에서 진행되는 전기화학적 반응 변화나 계면 특성 열화와 같은 미세한 이상을 직접적으로 반영하는 데에는 한계가 존재한다 [1]. 이로 인해 실제 이상이 존재함에도 불구하고 서브 모듈 또는 팩 단위에서는 정상 상태로 판단되는 미검출 문제가 발생할 수 있으며, 반대로 일시적인 전압 변동에 의해 오검출이 유발될 가능성도 배제할 수 없다. 이러한 한계를 보완하기 위한 대안으로 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical impedance spectroscopy; EIS)과 같은 AC(Alternating current) 기반 진단 기법이

제시되어 왔으나, 별도의 여기 신호 인가 및 측정 회로가 필요하다는 점에서 기존 BMS 하드웨어에 적용하기에는 현실적인 제약이 크다. 이에 따라 추가적인 하드웨어 변경 없이, 기존 BMS에서 수집 가능한 DC 전압 데이터를 활용하여 AC 특성을 대변할 수 있는 새로운 진단 인자를 확보하려는 연구가 요구되고 있다. 본 논문에서는 DC 전압 시계열 데이터에 신호처리 기법을 적용하여 유사 AC 인자를 도출하고, 이를 기반으로 기존 DC 전압 기반 진단 방식과의 이상 검출 성능을 비교 분석한다. 특히 서브 모듈 단위에서 DC 환경에서는 관측되지 않던 이상을 유사 AC 환경에서 효과적으로 식별할 수 있음을 실험적으로 검증하고, 제안 기법의 BMS 적용 가능성을 논의한다.

II. 본론

2.1. 유사 AC 인자 확보를 위한 신호 변환

본 논문의 핵심 목적은 추가적인 하드웨어 없이 기존 BMS에서 획득 가능한 DC 전압 데이터를 활용하여 배터리 내부 상태 변화를 반영할 수 있는 유사 AC 인자를 확보하는 데 있다. 이를 위해 전압 시계열 데이터에 대해 단시간 푸리에 변환(Short-time fourier transform; STFT)을 적용하여 시간-주파수 영역의 특성을 추출하였다. STFT는 비정상 신호에 대해 국부적인 주파수 성분 변화를 분석할 수 있어, 배터리

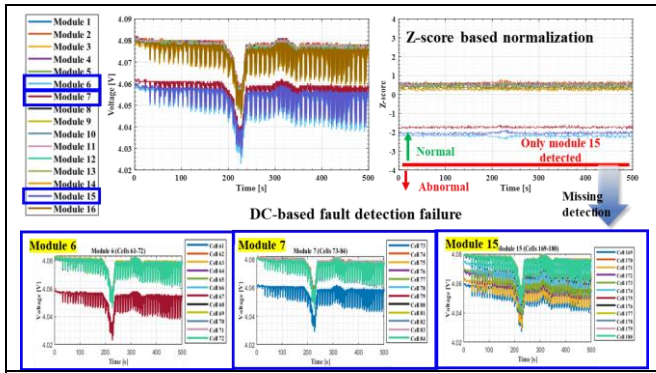


그림 1. DC 기반 이상 모듈 검출 결과

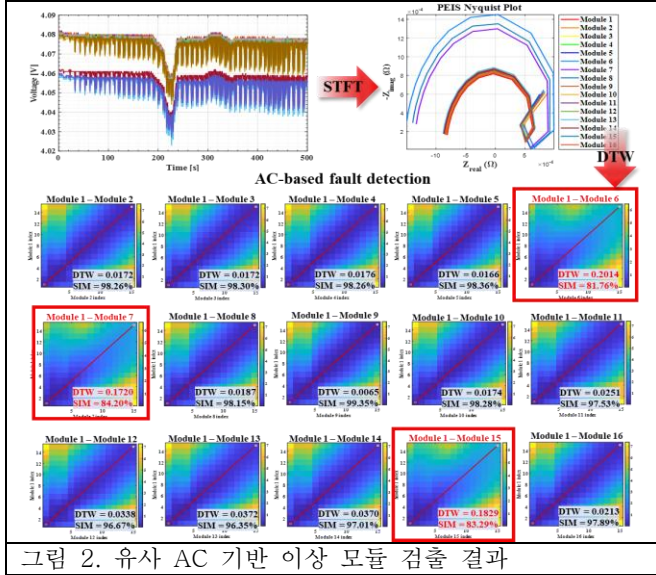


그림 2. 유사 AC 기반 이상 모듈 검출 결과

전압 신호에 내재된 미세한 변동 특성을 검출하는 데 적합하다 [2]. 본 연구에서는 500s의 윈도우 크기를 적용하여 STFT를 수행하였으며, 이를 통해 도출된 유사 AC 인자는 단일 시점의 응답이 아닌 해당 시간 구간 동안 누적된 전압 변동 특성을 반영한다. 이러한 특성은 기존 DC 전압 기반 분석에서 간과되기 쉬운 내부 저항 변화나 전기화학적 반응 불균일성을 간접적으로 나타낼 수 있다. 이에 따라 STFT 결과로부터 주파수 응답 특성을 요약한 지표로 구성하여, 유사 AC 인자로 정의하였다.

2.1. DC 및 유사 AC 기반 이상 모듈 검출 비교

본 문서의 이상 검출 성능 비교를 위해 192S2P로 구성된 배터리 팩을 대상으로 실험을 수행하였다. 해당 배터리 팩은 총 16개의 서브 모듈로 구성되어 있으며, 각 서브 모듈에는 다수의 셀이 직렬로 연결되어 있다. 서브 모듈 단위의 대표 전압으로는 각 모듈 내 셀 전압 중 최소값을 선정하였다. 이는 이상 셀이 존재할 경우 가장 먼저 전압 저하가 관측될 가능성이 높다는 점을 고려한 것이다. 먼저 DC 전압 기반 이상 검출을 수행하였다. 16개 서브 모듈의 대표 전압에 대해 Z-score 기반 정규화를 적용하였으며, $|Z\text{-score}| > 3$ 의 3σ 기준을 이상치 판별 조건으로 설정하였다. 유사 AC 인자와의 공정한 비교를 위해 DC 전압 데이터 역시 STFT 윈도우 크기와 동일한 0~500s 구간을 대상으로 분석을 수행하였다. 이는 유사 AC 인자가 해당 시간 구간의 통합 특성을 반영한다는 점을 고려하여, 분석 구간 차이에 따른 영향을 배제하기 위함이다. DC 전압 기반 분석 결과, 16개 서브 모듈 모두에서 이상이 검출되지 않았다. 그러나 개별 셀 단위의 원시 전압

데이터를 확인한 결과, 0~500s 구간 동안 6번, 7번, 15번 서브 모듈 내부에 이상 셀이 포함되어 있음을 확인하였다. 이는 서브 모듈 대표 전압으로 사용된 최소 전압조차도 모듈 단위 평균적 거동에 묻혀, DC 환경에서는 이상이 드러나지 않았음을 의미한다. 반면, STFT 기반으로 도출한 유사 AC 인자를 활용한 분석에서는 상이한 결과가 관측되었다. 기준 모듈을 설정한 후, 각 서브 모듈의 유사 AC 인자 간 유사도를 동적 시간 워핑(Dynamic time warping; DTW) 알고리즘을 통해 평가하였다. 정상 서브 모듈 간 유사도는 96% 이상의 높은 값을 나타낸 반면, 이상 셀이 포함된 6번, 7번, 15번 서브 모듈의 경우 유사도가 81~84% 수준으로 현저히 감소하였다. 이러한 결과는 DC 전압 환경에서는 식별되지 않던 서브 모듈 내부 이상이, 유사 AC 인자 기반 분석에서는 명확히 분리되어 관측될 수 있음을 보여주며 그림 1, 그림 2에 나타내었다. 특히 본 비교는 동일한 시간 구간과 동일한 원시 데이터에 기반하여 수행되었으므로, 이상 검출 성능의 차이는 분석 구간이 아닌 신호 변환 및 특징 표현 방식의 차이에 기인한 것으로 해석할 수 있다. 이를 통해 제안한 유사 AC 인자 기반 접근법이 DC 기반 진단 대비 강건한 이상 검출 성능을 제공함을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 기존 BMS 환경에서 수집되는 DC 전압 데이터를 활용하여, 추가적인 하드웨어 변경 없이 배터리 내부 상태 변화를 반영할 수 있는 유사 AC 인자를 도출하고 이를 이상 진단에 적용하였다. STFT 기반 신호 변환을 통해 확보한 유사 AC 인자는 시간-주파수 영역의 통합 특성을 포함함으로써, DC 전압 기반 분석에서 관측되지 않던 서브 모듈 내부 이상을 효과적으로 식별할 수 있었다. 이는 제안 기법이 DC 기반 진단의 한계를 보완하고, AC 기반 진단이 갖는 민감도를 기존 BMS 데이터만으로 부분적으로 구현할 수 있음을 시사한다. 향후 본 연구에서 제안한 유사 AC 인자 기반 이상 진단 기법은 셀 열화 추적 및 조기 고장 진단 측면에서 유의미한 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원(RS-2024-00398346, ESS 빅데이터 기반 O&M 및 자산관리 기술인력 양성)의 지원과 산업기술평가관리원의 재원으로 에이치디현대인프라코어(RS-2025-02316808, 1500마력급 병렬형 하이브리드 파워트레인용 엔진 용도 개발 및 배터리팩, 냉각시스템 개발)의 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Rahmani, Pegah, et al. "Driving the future: A comprehensive review of automotive battery management system technologies, and future trends." Journal of Power Sources 629 (2025): 235827.
- [2] Priyadarshini, M. S., et al. "Perception of power quality disturbances using Fourier, Short-Time Fourier, continuous and discrete wavelet transforms." scientific reports 14.1 (2024): 3443.