

BMS 통신 센싱 데이터 고도화를 위한 RLS 기반 파라미터 추정 및 GASF/MTF 부호화를 이용한 CNN 고장 진단

이동철, 장우혁, 박수빈, 안태건, 장준영, 김종훈*
충남대학교, *충남대학교

cheol9883@naver.com, wkssntjr99@naver.com, callimorphous333@naver.com,
atg0402@naver.com, juns0926@naver.com, *whdgns0422@cnu.ac.kr

RLS-Based Parameter Estimation and CNN Fault Diagnosis Using GASF/MTF Coding for BMS Communication Sensing Data Advancement

Lee Dong Cheol, Jang Woo Hyeok, Park Su bin, Aan Tae Geon,
Jang June young, Kim Jong Hoon*
Chungnam National Univ., * Chungnam National Univ.

요약

본 논문은 기존 배터리 관리 시스템(Battery management system; BMS)은 전압, 전류, 온도 기반 보호 로직에 최적화되어 있으나, 실제 운용에서 빈도가 높은 State-of-charge(SOC) 20~80% 구간에서는 경미한 결합 셀이 존재해도 전압 극값(min/max)이나 단순 편차만으로 조기 진단이 어렵다. 본 논문은 통신 기반 실운용 환경에서도 적용 가능한 데이터 고도화 기반의 진단 프레임워크를 제안한다. 제안 방법은 1 차 RC Thevenin 등가회로(Electrical equivalent circuit model; EECM)와 재귀적 최소제곱(Recursive least squares; RLS)을 결합해 내부 모델 파라미터(음 저항, 확산 저항, 확산 커페시턴스)를 실시간 추정한다. 사이클에 따른 시계열 차이를 정규화한 뒤, 전압 및 내부 파라미터 시계열을 Gramian angular summation field(GASF)와 Markov transition field(MTF)로 2D 이미지로 입력 데이터를 재구성하여 2D-Convolutional neural networks(CNN) 분류기로 정상/과충전/과방전 상태를 판별한다. 과충전, 과방전 1 사이클 전기적 남용으로 제작한 경미 이상 셀을 포함한 6S2P 모듈(25°C, 100 사이클, 4.1~2.9V) 실험 결과, 전압 기반 이미지보다 RLS 기반 내부 파라미터 이미지가 일관되게 높은 분류 성능을 보였으며, 특히 GASF 변환은 MTF 보다 안정적인 성능을 보였다. 본 연구는 원시 전압 신호의 한계를 보완하기 위해 추정 가능한 내부 상태 특징을 생성하고 이를 2D 표현으로 변환하여 CNN이 학습 가능한 형태로 정규화했다는 점에서 실용적 기여를 제공한다.

I. 서 론

현재 배터리 관리 시스템(Battery management system; BMS)은 전압 상/하한 및 전압 불균형 임계값 기반의 보호 로직 중심으로 설계되어 중간 State-of-charge(SOC) 20~80%에서 서서히 진행되는 내부 열화나 경미 불균형을 조기에 식별하는 데 한계가 있다[1]. 실제 운용 환경에서는 경미한 과충전/과방전 스트레스를 한두 차례 받은 셀도 초기 운용에서는 정상 셀과 전압 거동이 중첩되는 경우가 빈번하다. 이때 전압 기반 min/max 호출이나 단순 편차 모니터링은 극값이 충분히 발현되지 않는 구간에서 조기 경보가 어렵고, 대형 팩에서는 온도 센서 밀도가 제한되어 국소 열 이상도 가려질 수 있다. 이러한 배경에서 Differential voltage analysis(DVA), Incremental capacity analysis(ICA), 확장 칼만 필터(Extended Kalman filter; EKF), 데이터 기반 Convolutional neural network(CNN) 등 다양한 진단 방법이 연구되어 왔으나, 실무 적용에서는 운용 조건 의존성, 장비·운영 및 계산 복잡도 등 다수의 문제가 동시에 존재한다. 본 연구는 실제 운용 적용성에 초점을 맞춰, BMS 가 제공 가능한 기본

신호로부터 내부 상태 정보를 재귀적 최소제곱(Recursive least squares; RLS)을 통해 실시간 추정하고, 이를 CNN 이 학습 가능한 2D Gramian angular summation field(GASF)와 Markov transition field(MTF)으로 부호화하는 데이터 고도화 기반 진단 프레임워크를 제안한다.

II. 본론

2.1 경미한 비정상 모듈 제작 및 전기적 특성 실험

제조사 입고 불균형 팩 사례 분석에서, 보호 로직이 적용된 상태에서도 특정 직렬 셀의 이상이 초기에는 명확히 드러나지 않는 문제가 확인되었다. 중간 SOC 구간에서 정상/비정상 전압 범위가 겹쳐, 전압 불균형 임계값을 지속 충족하지 못하고 시스템이 정상으로 분류되는 현상이 발생했다. 전압 편차 기반 보호 로직이 열화 누적과 극심한 고장 상황에서는 민감하게 반응할 수 있지만, 조기 진단 지표로는 부족함을 시사한다. 이에 극심한 팩 고장이 아닌 경미 이상 재현을 위해 정상 상/하한 전압을 한 사이클만 초과하도록 프로파일을 설계하였다. 과충전은 5.0V 까지 충전, 과방전은 0.2V 까지 방전하여 비정상 셀 샘플을 확보하였다.

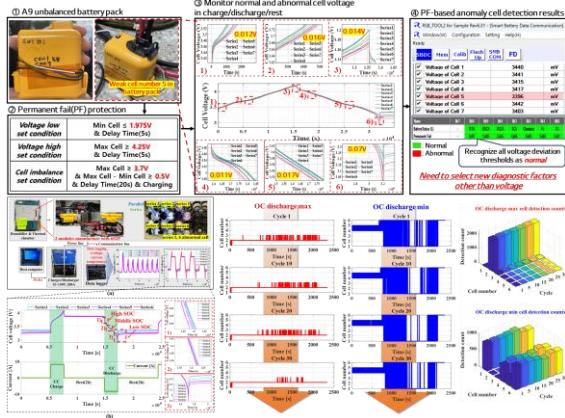


그림 1. 전압 기반 진단 구조적 한계 및 경미 비정상 모듈 전기적 특성 실험 결과

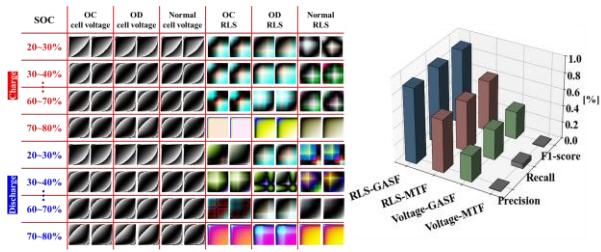


그림 2. GASF, MTF 이미지 데이터셋 구성 및 분류 성능 평가 결과

이후 비정상 셀을 포함한 6S2P 모듈을 구성하여 보수적 운용 범위(4.1~2.9V, 1C)로 전기적 특성 실험을 수행하였다. 실험 결과는 그림 1에 나타내었으며 비정상 셀(1, 6 번 직렬 셀)은 사이클이 진행될수록 열화가 가속되었으나, 초기 사이클 및 중간 SOC 에서는 전압 저동이 정상 셀과 유사한 구간이 존재하여 전압 기반 조기 진단이 제한되었다.

2.2 RLS 기반 내부 모델 파라미터 추정 및 이미지 데이터셋 구성

배터리 내부 상태를 간접적으로 해석 가능한 1 차 RC 전기적 등가회로 모델을 사용하였다. 단자전압과 Open circuit voltage(OCV) 차이를 과전위로 정의하고, 확산 거동을 RC 네트워크로 표현한 후, 연속 방정식을 순방향 오일러로 이산화한다. RLS 는 오차 계산, Gain 산출, 공분산 개선, 파라미터 업데이트를 반복하며, 추정된 이산 파라미터로부터 직렬 저항(Internal resistance; R_i), 확산 저항(Diffusion resistance; R_{diff}), 확산 커패시터(Diffusion capacitance; C_{diff})을 추정한다. 단일 전압 신호로는 드러나지 않는 내부 저항 상승 및 확산 시상수 변화를 확인할 수 있다. 사이클 진행에 따라 충/방전 시간이 단축되어 동일 SOC 구간의 시계열 길이가 달라지는 문제가 발생한다. 이는 고정 입력 크기를 요구하는 CNN 학습에 불리하므로, 본 연구는 SOC 20~80%를 10% 간격으로 세분화하고 각 구간별 시계열을 piecewise aggregate approximation(PAA)로 동일 길이로 정규화하였다. 또한 정상/비정상 분리가 유의미한 SOC 구간 설계를 위해 Fisher 분리도 기반 분석을 수행하였으며, 10% 세분화가 전반적으로 높은 분리도를 보였다. 정규화된 1D 시계열은 두 가지 방식으로 2D 이미지로 변환한다. 이미지 재구성 기법은 GASF, MTF 을 사용하였으며 GASF 는 정규화된

시계열을 극좌표로 매핑 후 Gramian 행렬을 구성하여 시점 간 상관과 전역 패턴을 이미지로 표현한다. MTF 는 값을 구간 양자화한 뒤 상태 전이 확률을 행렬로 만들어 전이 패턴을 이미지로 표현한다.

2.3 2D-CNN 분류기 및 성능 평가

CNN 은 컨볼루션-풀링 블록을 반복하여 특징을 추출하고, Flatten 및 Dense 레이어를 통해 최종 분류를 수행한다. SOC 10% 구간(6 개)×상태(정상/과충/과방)로 총 18 개 클래스를 구성하여 지도학습으로 학습하였다. 성능 평가는 정확도뿐 아니라 정밀도(Precision), 재현율(Recall), F1 을 함께 사용해 오탐/미탐 특성을 점검하였다. 이미지 데이터셋 구성과 분류 성능 평가 결과는 그림 2 와 표 1 에 나타내었으며 RLS-GASF(F1-score 0.9) 기법의 분류 성능이 가장 높았다.

표 1. RLS 및 Voltage 기반 이미지 별 분류 성능 평가

	Precision	Recall	F1-score
RLS-GASF	0.9	0.91	0.9
RLS-MTF	0.63	0.6	0.61
Voltage-GASF	0.31	0.36	0.33
Voltage-MTF	0.003	0.057	0.006

III. 결론

본 논문은 전압 기반 보호 로직이 취약한 중간 SOC 구간에서 경미 이상 셀을 조기에 구분하기 위해, RLS 기반 내부 파라미터 추정- PAA 정규화- GASF/MTF 2D 부호화- CNN 분류로 이루어지는 데이터 고도화 기반 진단 프레임워크를 제안하였다. 과충전/과방전 1 사이클 전기적 남용으로 제작한 경미 이상 셀을 포함한 6S2P 모듈 실험에서, 전압 단일 신호로부터 생성된 이미지 데이터셋은 낮은 진단 성능을 보였으나, RLS 로 추정한 내부 파라미터를 RGB 로 융합한 이미지 입력은 CNN 분류 성능(0.9)을 크게 향상시켰다. 이는 단순 임계값/극값 감시를 넘어 내부 상태를 반영하는 특징을 학습 가능핚 형태로 부호화하는 과정이 중요함을 보여준다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단(RS-2025-00562934, EV 하재 및 폭발사고 예측을 위한 이미지 기반 운용 이력/고장 패턴 인식 및 통합 관리 Open-Platform 구축)과 2024년도 정부(산업통상자원부)의 지원으로 한국에너지기술평화원(RS-2024-00398346, ESS 배터리 기반 O&M 및 자산관리 기술인력 양성)의 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Gou, Bin, et al. "Understanding the voltage inconsistency features in lithium-ion battery module." Journal of Energy Storage 115 (2025): 116007.