

전기택시 플릿 BMS 데이터 기반 배터리 내부저항 추정 및 불확실성 분석

최 태 원·황 병 도·황 정 윤*

(주)한스네트웍

Battery Internal Resistance Estimation and Uncertainty Analysis from Electric Taxi Fleet BMS Data

Taewon Choi·Byungdo Hwang·Jungwoon Hwang*

Hans Network Co., Ltd.

Key words : Electric Vehicle Battery(전기차 배터리), Internal Resistance(내부저항), Fleet Monitoring(플릿 모니터링), Mixed-Effects Model(혼합효과 모델), Uncertainty Quantification(불확실성 정량화)

교신저자, E-mail: smello@hansnetwork.co.kr

전기차 배터리의 건강 상태(SOH)를 실제 운행 중 모니터링하는 데 있어, 이벤트 기반 내부저항 추정법은 추가 계측 없이 양산 BMS 데이터만으로 작동하는 실용적 접근이다. 이 방법은 가속 시 자연 발생하는 전류 과도응답에서 $R_{int} = -\Delta V / \Delta I$ 를 산출하나, 기존 검증은 단일 차량·고분해능(0.1초) 데이터에 한정되어 이질적 플릿의 1초 분해능 양산 BMS 환경에서의 신뢰성은 불분명하였다.

본 연구는 한국에서 운행 중인 전기택시 21대(E-GMP 800V NMC)의 17개월 BMS 텔레메트리를 수집하여(가속 이벤트 339,866건) 이벤트 기반 저항 추정의 플릿 수준 적용 가능성을 분석하였다. 차량별 기준선 저항의 이질성과 플릿 공통 온도 의존성을 분리하기 위해 선형 혼합효과 모델을 도입하였으며, 17개월의 노화 추세와 계절적 온도 변동이 교란되는 문제를 해결하기 위해 반복적 디트렌드 절차를 적용하였다. 이를 통해 플릿 공통 활성화 에너지 $E_a = 2,334$ K를 추정하였으며, 이 절차 없이는 E_a 가 약 92 K 낮게 편향 추정됨을 확인하였다.

핵심 발견은 2단계 부트스트랩 분석에서 도출되었다. 이벤트 단위($N = 339,866$)와 차량 단위($N = 21$)로 각각 1,000회 리샘플링한 결과, 차량 수준 불확실성($SD = 27.5$ K)이 이벤트 수준($SD = 2.6$ K)의 10.6배에 달하였다. 이벤트 단위로 리샘플링하면 혼합효과 추정치(2,334 K)가 95% 신뢰구간 바깥에 놓이는 역설이 발생하며, 이는 각 이벤트를 독립 관측으로 취급할 경우 정밀도가 심각하게 과대추정됨을 의미한다. 플릿 추론의 유효 표본 크기는 이벤트 수가 아닌 차량 수에 의해 결정된다.

추정된 E_a 를 이용해 모든 측정값을 25°C, SOC 50%로 정규화한 결과, 플릿 전체 변동계수(CV)가 25.4%에서 9.0%로 65% 감소하여 계절 패턴이 실질적으로 제거되었다. 실험실 기준값이 확보된 독립 검증 차량(AAM15)에서는 정규화 중앙값 저항(112.8 mΩ)이 실험실 기준값(113.0 mΩ) 대비 -0.2% 편차를 보였다(CV: 28.2% → 7.9%). 정규화 저항의 시계열 분석에서는 플릿 평균 열화율 0.97 mΩ/month를 추정하였으며, 차량별 노화율은 한 자릿수에 걸쳐 분포하나 어떤 BMS 관측 가능 변수와도 유의한 상관성이 없어 제조 변동성이 이질성의 주된 원인임을 시사하였다.

본 연구는 추가 하드웨어 없이 표준 BMS 텔레메트리만으로 플릿 배터리 건강을 모니터링하는 프레임워크를 제시한다. 핵심 교훈: 동일 차량에서 이벤트를 추가 수집하는 것은 플릿 수준 정밀도를 개선하지 못하며, 차량 수를 늘리는 것만이 효과적이다.

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2025-02309323)

Photo. 1. Vehicle Diversity Over Data Volume: Scaling Battery Health Monitoring in EV Fleets

