

Data-Driven 기반 Indirect Property 개발을 통한 배터리 상태추정 연구

주재현, 박정주*, 한세경**

경북대학교, 경북대학교*, 경북대학교**

joojhyun123@gmail.com, *wjdown929@naver.com, **sekyung.han@gmail.com

A Study on the Estimation of Battery Condition by Indirect Property Based on Data-Driven

Joo Jae Hyun, Park Jeong Joo*, Han Se Kyung**

Kyungpook National Univ.

요약

BMS(Battery Management System)는 시스템 Data를 기반으로 운용되지만, 배터리 화재사고는 특정 Cell로부터 시작하므로 Cell 단위 상태정보 기반 Monitoring이 필수적이다. 따라서, Cell 단위 상태 진단을 위해 단시간 BMS Data 기반 상태추정 방법 개발이 필요하다. 본 논문에서는 BMS에서 취득되는 Cell 단위 Data를 기반으로 단시간의 정전류(CC, Constant Current)에 대한 전압 거동을 수치화하여 간접 인자를 도출하고, 간접 인자 기반 일반적인 배터리 Profile에서 안정적으로 상태추정 및 진단을 할 수 있는 방법론이 제안된다.

I. 서론

배터리 시스템의 안전과 효율을 위한 BMS(Battery Management System)가 있음에도 불구하고, 다수의 화재 및 안전사고가 발생하였다. 배터리 화재사고는 특정 Cell로부터 시작하지만, BMS는 시스템 Data를 기반으로 운용되어 Cell 단위의 상태정보를 모두 파악할 수 없다. 따라서 배터리 사고 방지를 위해서는 Cell 단위 상태 진단을 위해 단시간 BMS Data 기반 배터리 상태추정 방법 개발이 필요하다.

배터리 상태 기준에는 내부 저항, 용량 그리고 SOC(State Of Charge) 등이 있다. 하지만 배터리 내부 저항은 같은 공정으로 만들어진 Cell이라도 그 편차가 상당할 뿐만 아니라 온도에 따른 변동성이 매우 크기 때문에 상태를 정확히 정의하는 기준으로는 적절하지 못하다. 또한, Pack/Module 시스템은 모든 Cell들의 Min/Max 전압을 기준으로 운용되기 때문에, 개별 Cell의 용량은 완전충전 또는 완전방전 상태가 확보될 수 없음으로 측정될 수 없다. SOC 추정 방식에는 전류 적산 방식, SOC-OCV(Open Circuit Voltage) table 기반 1 대 1 매칭 등이 존재한다. 하지만 전류 바이어스 및 센싱 오차의 누적에 따른 전류 데이터 신뢰도 감소와 장기간 사용될 때 OCV를 직접적으로 취득하기 어려운 부분 때문에 SOC 계산 또는 추정이 어렵다.

따라서 본 논문에서는 배터리 사고 예방을 위한 Cell 단위 상태 Monitoring을 위해 일반적인 배터리 Profile에서 안정적으로 상태추정 및 진단을 할 수 있는 방법론이 제안된다. 이 방법론은 BMS에서 취득되는 Cell 단위 Data를 기반으로 단시간의 정전류(CC, Constant Current)에 대한 전압 거동을 수치화하여 간접 인자를 도출하고, 간접 인자의 SOC 상태에 따른 추정 성능이 확인된다.

II. 본론

A. 간접 인자(IP, Indirect Property) 도출

배터리는 전기 화학반응 기반 에너지 저장장치로써 전극과 전해질 계면을 사이에 두고 산화, 환원 반응을 통해 동작한다. 계면에서는 여러 반응

mechanism이 복합적으로 일어나며, 등가회로의 저항으로 표현되는 여러 과전압(Overpotential) 성분이 발생한다.

계면에서의 반응으로 계면 국부적인 부분에서 반응물의 농도가 감소함에 따라 전류 밀도가 감소한다. 해당 과정에서 일정한 전류 밀도(Steady State Current)를 유지하기 위해서 반응물이 바로 반응에 참여할 수 있는 확산층(Diffusion Layer) 보다 멀리 떨어진 벌크 영역(Bulk Solution)에서 반응물질전달이 일어나야 한다. 물질전달은 크게 3가지로 확산, 대류, 전기장에 의한 이동으로 전달되며 이를 물질전달(Mass Transfer) 과전압 또는 농도분극(Concentration) 과전압이라고 한다.

물질전달을 통해 이동된 반응물이 산화, 환원 반응하면서 전자를 잃거나 얻는다. 전하가 반응에 참여하기 위해서는 반응이 일어날 수 있는 최소 에너지인 활성화 에너지 이상의 에너지가 필요하므로 과전압이 필요하게 되는데, 이를 전하전달(Charge Transfer) 과전압 또는 활성화(Activation) 과전압이라고 한다. 배터리는 상태별로 위 과전압 성분들의 크기 및 반응 속도에서 차이가 발생한다.

배터리의 상태 차이는 운용 환경에 따른 열화 속도 편차 및 공정상의 미소 편차 등에 의해 발생하며 영향이 점차 증가한다. 이러한 편차는 SEI layer, Dendrite의 성장 속도에 영향을 미치며 위 Mechanism의 원활한 수행을 방해한다. 즉, 배터리 상태 편차는 저항, 과전압 성분에 편차로 이어지며 이를 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{chg} &= E_{eq,cell} + i \cdot R_{total} + \Sigma \eta \\ E_{dchg} &= E_{eq,cell} - i \cdot R_{total} - \Sigma \eta \end{aligned} \quad (1)$$

($\Sigma \eta = \eta_{ct} + \eta_{mt} + \eta_{rxn}$)

($E_{eq,cell}$: 셀평형전압(셀기전력),

η_{ct} : 전하전달저항, η_{mt} : 물질전달저항, η_{rxn} : 화학반응저항)

저항, 과전압 성분 크기에 기반해서 같은 입력 전류에 대해 다른 전압 거동을 보임을 확인할 수 있으며, 전압 데이터를 통해 배터리 상태 차이를 인지할 수 있음을 알 수 있다. 이를 기반으로 전압 거동 특징점을 수치화

하여 IP를 도출하며 예시는 그림 (1)과 같다.

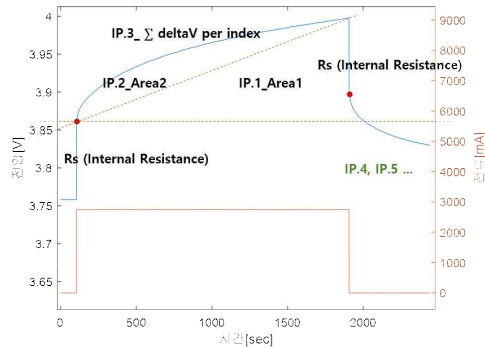


그림 1 IP 도출 예시

B. 실험 결과

S사 NCM 18650 원통형 배터리 11개, E사 LFP 18650 원통형 배터리 2개를 사용하여 약 5°C의 야외환경, 항온 25°C의 챔버 두 가지 환경에서 실험을 진행하였다. Cell 간 최대 용량 편차는 4%이며 3.1~3.6V의 구간에서 0.1V 간격으로 펄스 인가를 통해 IP 도출을 수행하였다. IP 도출 Profile은 다양한 시간 길이의 정전류 충, 방전을 통해 Pulse를 취득하였고 펄스 별 전압 시작점을 0으로 통일해 변화량을 도출하였다. 그 결과는 그림(2), (3) 와 같다.

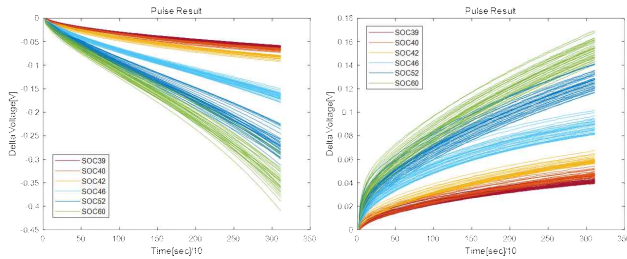


그림 2 약 5°C의 야외 SOC 별 충전, 방전 Pulse

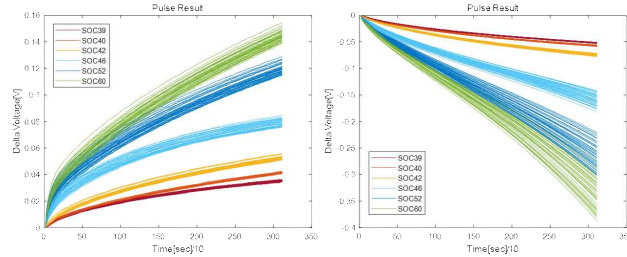


그림 3 25°C의 챔버 충전, 방전 Pulse

야외의 불규칙하고 낮은 온도에 비해 항온을 유지하는 챔버의 Pulse 파형이 더 균집이 잘 이루어졌음을 확인할 수 있으며, SOC 위치에 따라 Pulse 개형이 달라짐과 동시에 Boundary 구분 성능 역시 뛰어남을 확인했다. 야외에서의 펄스 파형 역시 일정한 경향을 확인하였으며 해당 파형을 기반으로 IP를 도출하여 그 결과는 그림 (4)와 같다.

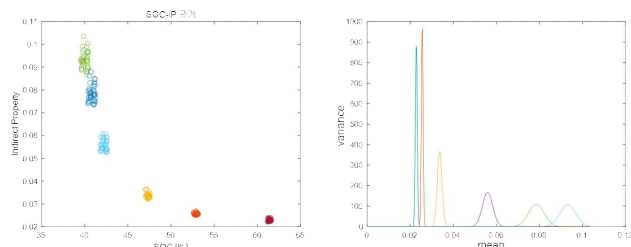


그림 4 SOC 별 단일 IP 기반 SOC 추정 성능

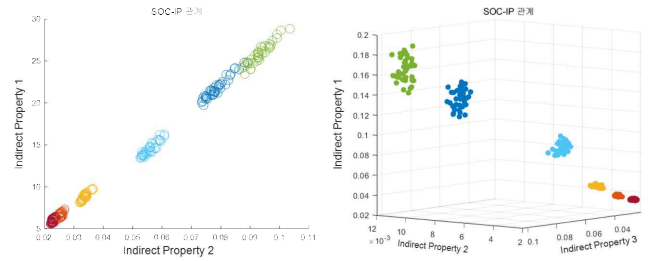


그림 5 다중 IP 조합 기반 SOC 추정 성능

그림 (4)의 왼쪽은 SOC 별 한 개의 단일 IP를 사용한 결과이고, 오른쪽은 IP의 평균과 분산을 통한 정규분포의 형태로 표현한 그림이다.

같은 Pulse 데이터 기반 도출한 IP임에도 어떤 특징점을 기준으로 수치화를 하는가에 따라서 IP 성능이 달라질 수 있다. 동시에 그림 (5)와 같이 여러 IP를 조합함으로써 Data의 근거를 늘려 성능을 더욱 향상할 수 있다. 야외에서의 IP 구분 성능 역시 크게 차이가 나지 않으며 4%의 용량 편차 및 온도 편차에도 해당 성능이 크게 떨어지지 않음을 알 수 있다.

LFP Cell의 경우 NCM과 물성 차이에 따른 OCV curve에서 차이가 존재하며 이는 IP에서도 확연히 그 차이가 드러나 Cell 종류별 분류 성능 역시 가능하다.

III. 결론

본 논문에서는 화재 및 안전사고가 특정 Cell에서 시작하는 문제 인식을 통해 시스템 단위 정보에 의한 기존 상태추정의 한계점을 인지하고, Cell 단위 정보 기반 상태추정 방법론을 제안하였다. 배터리 상태별로 달라지는 반응 Mechanism의 차이가 저항, 과전압 성분에서 차이가 남을 전기화학 이론을 통해 이해하고, 전압 데이터를 통해 배터리 상태 편차를 인지할 수 있음을 설명하였다. 해당 원리 기반 수 초의 단시간의 CC에 대한 전압 거동을 수치화하여 IP를 도출하고, 이를 기반으로 SOC 분류 또는 추정에 대한 성능을 확인하였다. 향후 IP를 기반으로 SOC뿐만 아니라 SOH 등에 대한 배터리 상태를 추정하기 위해 제안된 방법론을 정량화 및 수치화하는 연구로 진행될 예정이다. 이는 실제 운용되는 배터리 시스템에서 Cell 단위의 상태를 안정된 주기마다 측정 및 Monitoring에 따른 배터리 이상 Cell 조기 진단 및 사고 방지로 확장되어 사회적 비용 절감을 기대할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20191210301990)