

실시간 전류 적산 및 정전압 충전 시간 기반 리튬 이온 배터리의 SOH 추정 알고리즘

임제영, 임종훈, 김동환, 이병국[†]

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Real-time SOH Estimation Algorithm of Lithium-ion Batteries Based on Coulomb Counting and Constant Voltage Charging Time

Je Yeong Lim, Jong-Hun Lim, Dong Hwan Kim and Byoung Kuk Lee[†]

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 측정된 단자전압을 기반으로 OCV (Open circuit voltage) 곡선의 응축을 변화율 추출하여 리튬 이온 배터리의 SOH (State-of-health)를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 배터리 제조에 따른 총 cycle 및 전류 용량과 실시간으로 적산된 전류 용량을 기반으로 SOH를 추정을 진행한다. SOH 추정 정확도를 향상시키기 위하여 정전압 충전이 발생했을 시 정전압 충전시간 대비 SOH 값을 기반으로 추정된 SOH를 재추정한다. 알고리즘을 검증하기 위하여 LiFePO₄ 배터리를 이용한 노화 실험을 기반으로 검증을 진행한다.

1. 서론

높은 효율과 에너지 밀도, 전력 밀도 등의 장점을 가지는 리튬 이온 배터리는 다양한 종류의 응용 분야에서 사용이 급증하고 있으며, 이에 따른 안전한 동작 및 관리를 위한 상태 추정 알고리즘들이 연구되고 있다. 리튬 이온 배터리는 충·방전 사이클이 반복됨에 따라 노화가 진행되어 전류 용량 감소하게 되며 배터리의 노화는 여러 상태 추정 알고리즘의 추정 결과에 영향을 끼치기 때문에 배터리의 노화도를 나타내는 SOH (State-of-health)의 실시간 추정의 중요성이 강조된다.

배터리의 SOH를 추정하는 가장 기본적인 방법으로는 노화가 진행된 배터리의 SOC (State-of-charge)를 0%에서 100%까지 완전 충전, 완전 방전을 진행하여 배터리의 전류 용량을 측정하는 것이다. 이를 이용하여 배터리의 노화에 따라 변화하는 OCV (Open circuit voltage)의 변화량과 배터리 내부의 전류 용량의 변화량을 기반으로 IC (Incremental capacity) 곡선을 분석하여 배터리의 노화도를 추정하는 알고리즘이 제안되었다^[1]. 하지만 IC 곡선의 추정을 위하여 정전류 충·방전에 따른 OCV 값의 변화를 최소화하기 위하여 1/5C 수준의 정전류 충·방전이 필요하기 때문에 실시간으로 SOH를 추정하는 것에 한계가 있다. 이러한 한계를 해결하기 위하여 확장 칼만 필터 등의 재귀적 방안과 data-driven 기반의 머신러닝/딥러닝 알고리즘을 적용한 실시간 추정 알고리즘들이 연구되고 있지만, BMS에 실시간으로 적용하기에 많은 연산량이 요구되는 한계를 가진다.

따라서 본 논문은 배터리 제조 시 결정된 배터리의 총 cycle 및 전류 용량과 BMS에서 실시간으로 측정된 전류에 따른 적

표 1 LiitoKala社 LiFePO₄ 배터리 셀 데이터

Table 1 Data of LiitoKala社 LiFePO₄ battery cell

Parameter	Value	Unit
Nominal Voltage	3.2	V
Cut-off Voltage range	2.0 - 3.65	V
Rated capacity	6.0	Ah

산 전류 용량을 기반으로 실시간으로 잔존 전류 용량을 추정하는 SOH 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 배터리 제조 시 제공되는 배터리의 기본 수명 cycle과 전류 용량을 기반으로 배터리가 가지는 총 전류 용량을 계산하고, 실시간으로 적산되는 전류 용량으로 감소시켜 남은 잔존 전류 용량을 추정한다. 이 때, 배터리의 정전압 충전이 발생하면 노화에 따라 정전압 충전시간이 증가되는 것을 이용하여 확보된 충전시간에 따른 SOH 값을 이용하여 SOH 추정 정확도를 보정한다. 제안하는 알고리즘의 검증을 위하여 LiFePO₄ (Lithium iron phosphate) cell의 노화 실험 데이터를 이용한 실험 및 시뮬레이션 실험을 진행한다.

2. 제안하는 실시간 SOH 추정 알고리즘

2.1 노화 실험 구성 및 진행

리튬 이온 배터리의 노화 실험은 LiitoKala社에서 제공되는 6 [Ah] LiFePO₄ cell을 이용하였으며 표 1은 실험에서 사용된 배터리의 공칭 전압, 단자 전압 범위, 정격 전류 용량을 나타낸다. 제안하는 SOH 추정 알고리즘 개발을 위하여 위 배터리에 대하여 배터리 노화 cycling 실험 프로파일을 구성하여 실험을 진행하였다. 실험은 그림 1과 같이 배터리의 상한 전압인 3.65V까지 0.3C-rate로 CC (Constant current) 충전을 하였으며, 배터리의 분극 전압 성분을 감소시키고 OCV 성분만을 남기기 위하여 1시간 동안 휴지를 진행한다. 이후 1.0C-rate CC 방전을 하한 전압인 2.0V까지 진행하고 다시 OCV 성분만을 남기기 위하여 1시간 동안 휴지를 진행하여 프로파일을 반복 수행한다. 이 때 1.0C-rate 방전을 통하여 측정된 전류 용량 감소량을 통하여 cycle 별 SOH를 측정하였으며, 실험을 통해 총 338 cycle, SOH 90.21%까지의 노화 데이터를 확보하였다.

2.2 실시간 전류 적산 기반 SOH 추정 알고리즘

리튬 이온 배터리의 용량과 수명은 제조 시에 결정되기 때문에 배터리의 전류 용량과 cycle life를 이용하여 아래 (1)과

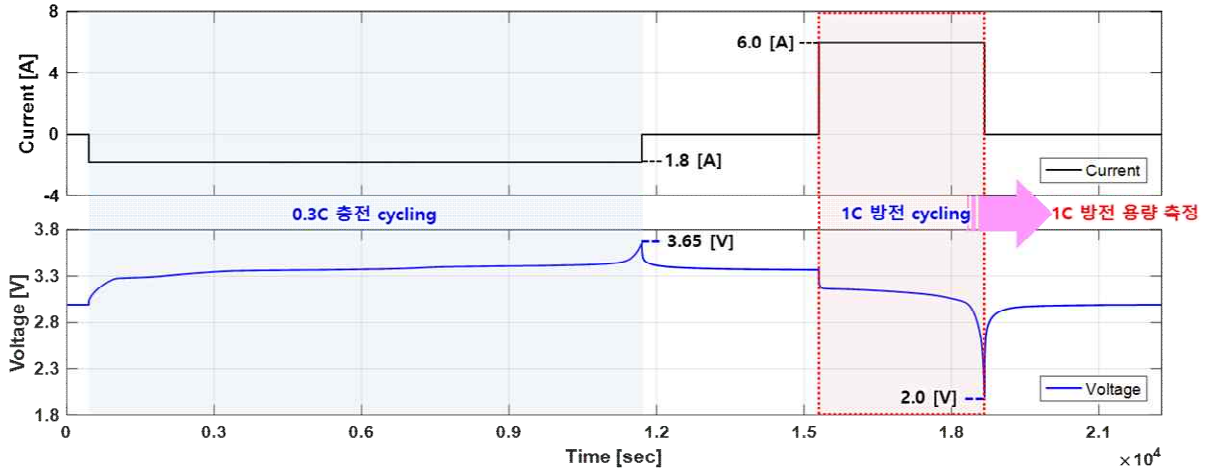


그림 1 배터리 노화 실험 프로파일
Fig. 1. Battery aging experiment profile.

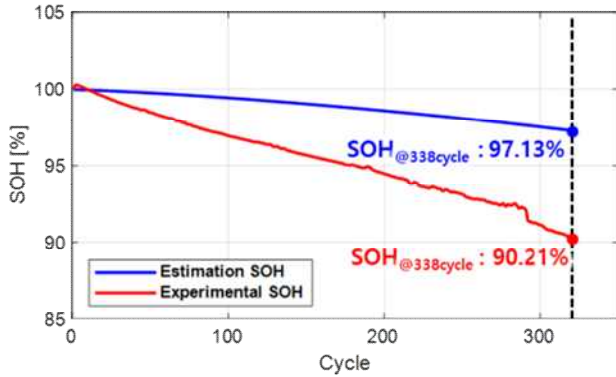


그림 2 실시간 전류 적산 기반 SOH 추정 결과
Fig. 2. SOH estimation result based on real time Coulomb counting.

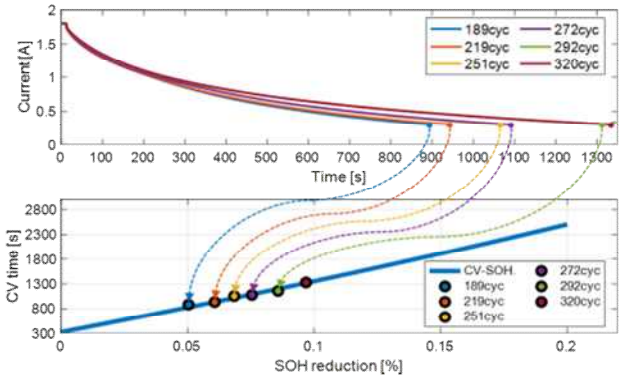


그림 3 정전압 충전 시간 증가에 따른 SOH 감소량 관계
Fig. 3. SOH estimation result based on real time Coulomb counting.

같이 사용할 수 있는 총 전류 용량을 나타낼 수 있다.

$$C_{Ah(Total)} = C_{Ah} \times cycle_{EOL} \quad (1)$$

하지만 배터리의 특성과 배터리를 사용하는 전류 크기 등의 상태 조건들에 의하여 전류 용량 감소량은 달라질 수 있다. 따라서 배터리의 실시간으로 사용되는 전류 용량을 계산하기 위하여 아래 (2)와 같이 배터리의 초기 사용 시점인 t_{init} 부터 현재 시점인 $t_{present}$ 까지의 모든 단자 전류를 적산하여 현재 시점까지 사용된 전류 용량 $C_{Ah(present)}$ 를 구한다.

$$C_{Ah(present)} = \int_{t_{init}}^{t_{present}} i_t \cdot dt \quad (2)$$

이후 (3)과 같이 현재 시점까지 얻어진 $C_{Ah(present)}$ 를 총 전류 용량인 $C_{Ah(Total)}$ 로부터 감소시켜 현재 잔존 용량인 $C_{Ah(residual)}$ 을 구하고 두 값을 기반으로 (4)와 같이 SOH를 실시간으로 추정한다.

$$C_{Ah(residual)} = C_{Ah(Total)} - C_{Ah(present)} \quad (3)$$

$$SOH = \frac{C_{Ah(residual)}}{C_{Ah(Total)}} \quad (4)$$

배터리 노화 실험 데이터를 기반으로 실시간 전류 적산 SOH 추정 알고리즘을 적용하여 검증한 결과 그림 2와 같이 전류 용량 감소량을 추정하였으며 실험이 진행된 338 cycle 기준 6.92%의 SOH 추정 오차가 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 SOH 추정 오차를 보완하기 위한 추가적인 방안이 필요하다.

2.3 정전압 충전 시간 기반 SOH 추정 보완

리튬 이온 배터리는 노화가 발생하게 되면 배터리의 전류 용량 감소와 내부 저항 증가 등의 내부 파라미터 변화들에 의하여 CC 충전 시 상한 전압에 도달하는 시간이 감소하게 되고 이에 따라 완전 충전 시 정전압 충전 시간이 증가하게 된다. 이를 이용하여 그림 3과 같이 정전압 충전 시간에 따른 SOH 감소량 관계를 기반으로 배터리의 SOH를 추정할 수 있다. 하지만 완전 충전 시에만 SOH를 추정할 수 있기 때문에 실시간으로 SOH를 추정하는 데에 한계가 있다. 따라서 정확도의 오차가 발생하지만 실시간으로 SOH를 추정할 수 있는 실시간 전류 적산 기반 SOH 추정 알고리즘과의 결합을 통한 SOH 추정 알고리즘 보완 방안을 제안한다.

SOH 추정 알고리즘의 적용은 그림 4와 같이 진행된다. 그림 4(a)와 같이 실시간 전류 적산 알고리즘을 통하여 SOH를 실시간으로 추정한다. 이 때 정전압 충전에 의하여 완전 충전이 발생했을 시 그림 4(b)와 같이 정전압 충전 시간을 BMS에서 저장할 수 있다. 저장된 시간을 기반으로 그림 4(c)와 같이

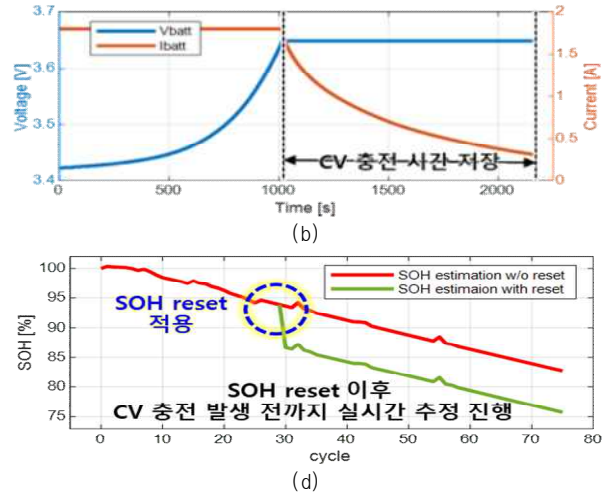
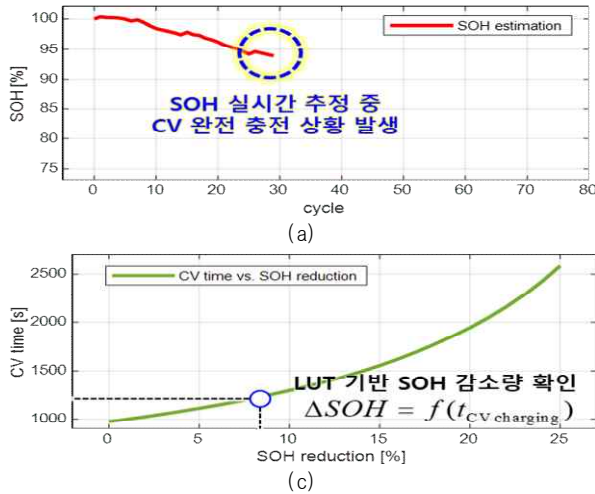


그림 4 정전압 충전 시간 기반 SOH 추정 보완 방안

Fig. 4. Supplementary method of SOH estimation based on constant voltage charging time.

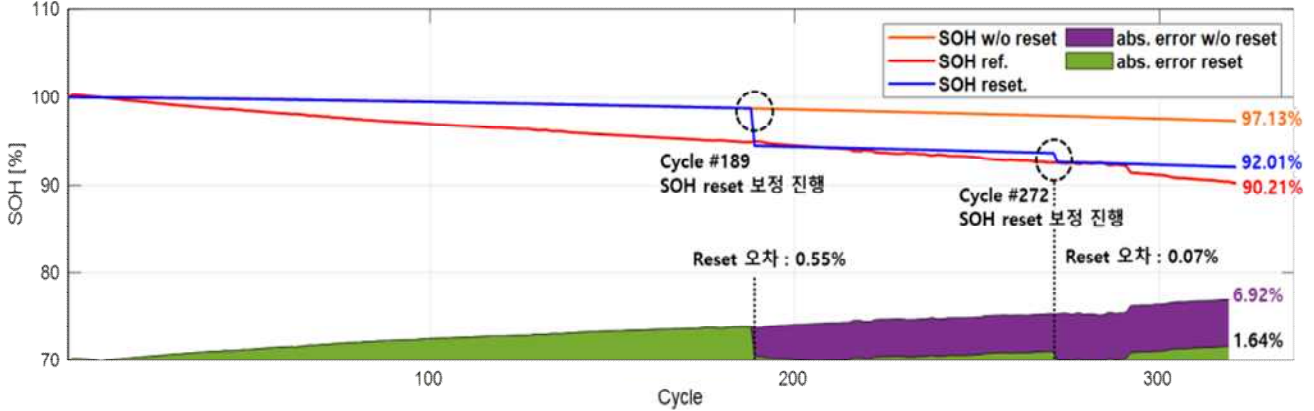


그림 5 정전압 충전 시간 기반 SOH 보완 알고리즘 적용 결과

Fig. 5. Result of SOH estimation algorithm based on constant voltage charging time.

정전압 충전 시간-SOH 감소량 Look up table에서 SOH 감소량을 확인한다. 확인된 SOH 감소량 만큼 그림 4(d)와 같이 SOH 추정 값을 재조정하고 다시 정전압 충전이 발생할 때까지 실시간으로 SOH를 추정한다.

3. 제안하는 SOH 추정 알고리즘 실험 검증

제안하는 SOH 추정 알고리즘을 검증하기 위하여 2장에서 설명한 배터리 노화 실험 데이터를 이용하였으며, 실제 환경과 동일한 실험 조건 구현을 위하여 189 cycle과 272 cycle에서 SOH 곡선 피팅을 제외하고 정전압 충전을 진행하여 정전압 충전 시간을 확보하였다. 알고리즘 적용 결과 그림 5와 같이 실시간 전류 적산 알고리즘만 적용한 경우 338 cycle에서 SOH 추정 오차 6.92%가 발생했지만, 189 cycle에서 발생한 정전압 충전을 기반으로 SOH reset 보정을 진행하여 보정 시점에서 추정 오차를 0.55%로 감소시켰다. 그리고 다시 실시간으로 SOH 추정을 진행하여 SOH 추정 오차가 증가하였지만 272 cycle에서 발생한 정전압 충전을 통하여 SOH reset 보정을 수행하여 0.07%로 감소시켰으며 최종적으로 338 cycle에서 1.64%로 전류 적산을 통한 SOH 실시간 추정 알고리즘의 보완 전에 비하여 보완 후의 SOH 추정 오차를 5.28% 감소시켰음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문은 전류 적산을 기반으로 실시간 SOH를 추정과 정전압 충전 시간을 기반으로 SOH 추정값을 보완하는 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘은 초기 시점부터 현재 시점까지 측정된 단자 전류의 적산 값을 기반으로 현재까지 사용된 전류 용량을 계산하여 SOH를 실시간으로 추정하고, 노화에 따른 정전압 충전 시간 증가를 기반으로 SOH 추정 오차를 보정한다. 알고리즘의 검증은 LiitoKala社에서 제공되는 LiFePO4 cell의 노화 실험을 통하여 진행하였으며 실시간 SOH 추정 결과 최종 시점에서 6.92%, 정전압 충전 발생에 따른 SOH 추정 결과 보완 시 1.64%로써 높은 정확도의 SOH 추정을 확인하였다.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022400000440, 섹터커플링 에너지산업 고도화 인력양성 사업)

참고 문헌

- [1] Krupp A, Ferg E, Schuldt F, Derendorf K, Agert C. "Incremental Capacity Analysis as a State of Health Estimation Method for Lithium-Ion Battery Modules with Series-Connected Cells" Batteries 7, no. 1: 2, 2021.