

고속 부분 충/방전 기반 배터리 건강 상태 추정을 위한 최적의 다중 건전성 지표 추출 및 선정

국강현*, 이동철*, 공태현*, 김종훈*
 충남대학교 에너지저장변환연구실*

Optimal Extraction and Selection of Multiple Health Indicators for Estimating Battery State of Health Based on High-Speed Partial Charge/Discharge

Ganghyeon Kook*, Dongcheol Lee*, Taehyeon Gong*, Jonghoon Kim*
 Energy Storage Conversion Lab., Chungnam National University*

ABSTRACT

본 논문에서는 고속 부분 충/방전 시 배터리 건강 상태(State-of-health; SOH) 추정을 위해 건전성 지표(Health Indicator; HI)를 추출하였다. SOH 추정에 적합한 최적의 다중 HI를 선정하기 위해 추출한 HI를 Min-max scaling을 통해 정규화하였고, 이를 기반으로 다중 HI로 조합하였다. 피어슨 상관 분석을 진행한 결과, 1.5C-rate로 충전했을 때 MVF 3.8V 200초 구간과 TIECVD 3.7-4.0V 구간을 조합한 다중 HI가 0.954로 가장 높은 상관계수를 보였다.

1. 서 론

전 세계적으로 환경 문제가 대두됨에 따라 기존의 내연기관 자동차 대신 리튬이온 배터리를 기반으로 한 전기 자동차(Electric vehicle; EV) 시장이 성장하고 있다. 그러나 긴 충전 시간과 짧은 주행 거리가 EV 보급 확대의 저해 요소로 꼽힌다. 이를 해결하기 위해 고속 충전에 관한 연구가 활발히 이뤄지고 있다^[1]. 또한, 주행 거리 감소로 인한 불편을 방지하기 위해 배터리 건강 상태(State-of-health; SOH)를 정확하게 파악하여 배터리 수명 종료(End-of-life; EOL) 지점에서 배터리의 신속한 교체가 이뤄져야 한다. 그러나 EV 사용자들은 배터리가 완전히 방전될 때까지 주행하지 않을 뿐만 아니라 완전한 충전이 이뤄지지 않는 경우가 많아, 기존의 완전 충/방전에서 추출한 건전성 지표(Health Indicator; HI)로 SOH를 추정하는 것은 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 하한 전압을 3.0V, 상한 전압을 4.0V로 충/방전 구간을 축소하여 부분 충/방전 열화 실험을 진행하였다. 또한, 고속 충전을 고려하여 1C-rate, 1.5C-rate 두 가지 충전 속도로 부분 충/방전을 진행하였다. 실험을 통해 나온 열화 데이터에서 HI 추출할 때 일정한 패턴을 보이는 구간을 선택해야 한다. 실제로 EV 사용자에게 따라 방전 구간에서의 변동성이 심하므로 제어된 전류가 주입되는 충전 구간에서 HI를 추출하였다. 이때 추출한 HI는 충전 구간 전압 데이터를 기반으로 한 MVF(Mean voltage fall-off), VIECTD(Voltage interval of equal charging time difference), TIECVD(Time interval of equal charging voltage difference)이다. 부분 충전 곡선 전체에서 추출하기보다 특정 충전 구간에서 HI를 추출하는 것이 효율적이기 때문에, 배터리 열화 정도를 정확하게 대변할 수 있는 여러 특정 충전 구간에서 HI를 추출했다. 또한, 추출한 HI와 실제 용량과 피어슨 상관 분석하여 상관계수

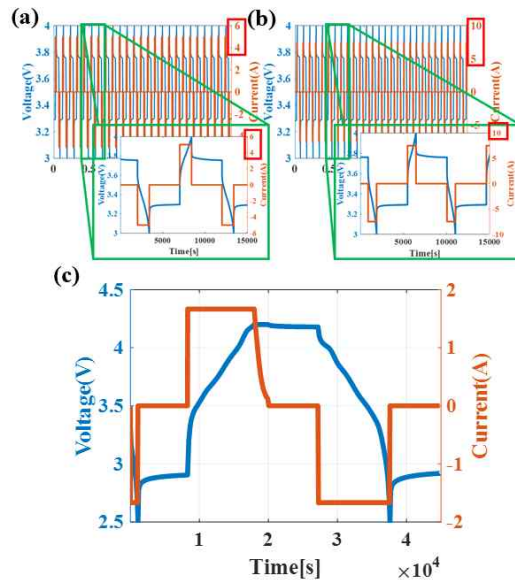


그림 1 (a) 1C-rate 부분 충/방전 기반 열화 실험 프로파일, (b) 1.5C-rate 부분 충/방전 기반 열화 실험 프로파일, (c) 용량 시험 프로파일

Fig. 1 (a) 1C-rate partial charge/discharge based aging experiment profile, (b) 1.5C-rate partial charge/discharge based aging experiment profile, (c) Capacity experiment profile

가 높은 HI를 선정했다. 이때 실제 용량은 부분 충/방전 실험에서는 알 수 없어 40 Cycle마다 진행한 용량 실험에서 용량을 얻었고, 이를 기반으로 선형 보간법을 사용하여 각각의 Cycle에 대한 용량을 얻었다. 상관관계를 높이기 위해 Min-max scaling을 통해 정규화된 HI를 다중 HI로 조합하고 상관 분석하여 SOH 추정에 적합한 다중 HI를 선정하였다.

2. 충/방전 프로파일 및 실험

2.1 부분 충/방전 프로파일

C-rate 별 다중 HI 조합에 따른 SOH 추정 성능 차이를 분석하기 위해 1C-rate, 1.5C-rate의 정전류 프로파일을 선정하여 각각 열화 실험을 진행하였다. 실험에 사용한 셀은 21700-50E 셀이며 온도 조건은 상온 25도로 동일하였다. 또한 완전 충/방전이 아닌 부분 충/방전을 수행하여 다중 HI를 추출하기 위해 전압을 4.0V, 하한 전압을 3.0V로 전압 영역을 축소한 프로파일을 설계하였고 그림 1에 나타내었다. 설계한

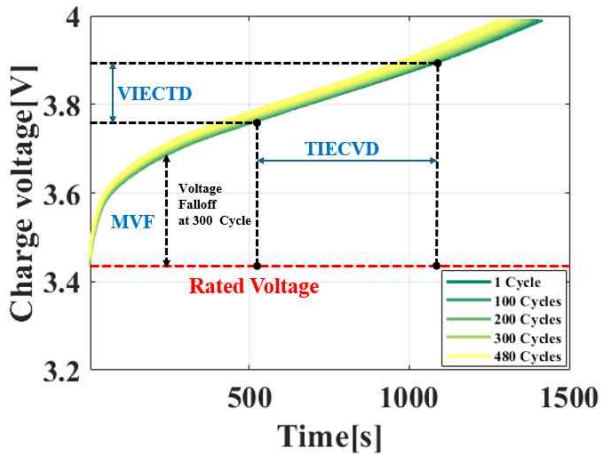


그림 2 충전 프로파일에서 MVF, VIECTD, TIECVD 모식도
Fig. 2 MVF, VIECTD, TIECVD schematic diagram in charging profile

프로파일을 기반으로 총 480 Cycle 동안 부분 충/방전을 진행하였다. 그리고 부분 충/방전만으로는 사용 가능한 용량을 알 수 없어, 40 Cycle마다 용량 실험을 진행하여 배터리 잔존 용량 및 열화 경향을 파악하였다.

3. C-rate 별 SOH 추정 적합 HI 선정

본 연구에서는 HI 추출 구간을 전류의 주입이 일정한 충전 구간으로 한정시켰다. 또한, 최적의 추정 인자를 찾기 위해 단일 HI뿐만 아니라 두 개의 HI를 조합하여 다중 HI를 도출했다. 배터리 잔존 용량 확인하기 위해, 40 Cycle마다 측정된 용량을 선형 보간법을 통해 각각의 Cycle에 대한 용량을 얻었다. 용량과 상관성이 높은 HI를 상관 분석하여 높은 상관계수를 갖는 HI를 확인하였다.

3.1 C-rate 별 단일 HI와 용량 상관성 분석

SOH는 사이클에 따라 변하는 시계열 데이터 특성이 있다. 따라서 배터리의 열화 정도를 대변할 간접적 건전성 지표로 MVF, VIECTD, TIECVD 총 3가지를 선정하였다. 각 지표에 관한 식은 (1), (2), (3)에 나타내었다.

$$MVF_i = \frac{\sum_{j=i}^{i+sample} |V_j - V_i|}{sample} \quad (1)$$

$$VIECTD_i = |V_{t_i} - V_{t_j}| \quad (2)$$

$$TIECVD = |t_{V_{max}} - t_{V_{min}}| \quad (3)$$

방전시켰을 때 회복 전압과 충전 시 순간적으로 상승하는 전압을 고려하여, 추정 오차를 줄이기 위해 HI 추출 구간을 3.5V 이상으로 한정시켰다. MVF 추출 시 전압값을 3.5V에서 0.1V씩, 측정 시간 값을 100초씩 증가시켜 상한 전압 4.0V에 도달할 때까지 추출하였다. VIECTD는 전압값을 3.5, 3.6V로 한정시킨 후 측정 시간을 60초씩 증가시켜 추출하였다. 마지막으로 TIECVD는 3.5V, 3.6V, 3.7V, 3.8V, 3.9V, 4.0V 총 6개의 전압값을 기준으로 각 전압 사이의 시간 값을 측정하여 얻었다. 이후, 선형 보간법으로 얻은 용량과 HI 두 변수 간 선형적인 상관관계를 수치화하는 피어슨 상관 분석을 진행하여 1 혹은 -1에 가까운 HI를 선정하였다. HI 별로 가장 높은 상관성을 갖는 추출 구간 및 상관계수는 표 1에 나타내었다.

표 1 높은 상관성을 갖는 추출 구간 및 상관계수

Table 1 Extraction intervals and correlation coefficients with high correlation

Type	MVF		VIECTD		TIECVD	
1C-rate	3.7V 200초	0.897	3.6V 360초	0.860	3.8V - 4.0V	0.893
1.5C-rate	3.8V 300초	0.926	3.6V 840초	0.863	3.8V - 4.0V	0.905

표 2 C-rate 별 높은 상관성을 갖는 다중 HI 및 상관계수

Table 2 Multiple HI and correlation coefficient with high correlation by C-rate

C-rate	Type	Correlation coefficients
1C-rate	MVF 3.7V 200초 TIECVD 3.8-4.0V	0.918
1.5C-rate	MVF 3.8V 300초 TIECVD 3.7-4.0V	0.954

3.2 C-rate 별 다중 HI와 용량 상관성 분석

단일 HI의 값은 서로 상이하기에 다중 HI 조합을 위해 Min-max scaling을 수행하여 HI의 범위를 0에서 1 사이로 변경하였다. 스케일링 된 단일 HI별로 상관계수가 높았던 상위 3개 구간, 총 9개 구간을 2개씩 조합하여 다중 HI로 만들었다. 상관 분석 시, 1.5C-rate로 충전했을 때 MVF 3.8V 200초 구간과 TIECVD 3.7V-4.0V 구간을 조합한 다중 HI가 0.954로 가장 높은 상관계수를 보였고 1C-rate는 비교적 낮은 0.918의 상관계수를 보였다. 따라서 단일 HI, 다중 HI 모두 1.5C-rate에서 용량과 높은 상관성을 가진다는 결론을 도출할 수 있었고 단일 HI보다 다중 HI로 조합했을 때 더 나은 추정 성능을 갖는다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 불규칙한 EV 주행 특성을 고려하여 고속 부분 충전 구간에서의 SOH 추정에 적합한 HI를 추출하였다. 또한, 단일 HI보다 용량과 상관성이 높은 다중 HI로 조합하기 위해 Min-max scaling을 통해 정규화하였으며, 도출된 다중 HI를 용량과 상관 분석하였다. 결과적으로 단일 HI의 상관계수는 0.926, 다중 HI는 0.954로 단일 HI보다 MVF와 TIECVD를 결합한 다중 HI가 SOH 추정에 있어 높은 상관성이 도출됨을 확인하였다. 또한 1C-rate로 충전했을 때보다 1.5C-rate로 충전했을 때 더 우수한 추정 성능을 보였다. 향후, 선정된 다중 HI로 SOH 추정 알고리즘을 연구할 예정이다.

본 연구는 한국전력연구원(R23X005-03, ESS향 물리모델-AI 결합 클라우드 기반 BMS 요소기술 개발) 및 산업기술평가관리원의 재원으로 오토실리콘(No. 200116167, 전기자동차 배터리의 내부 상태, 폭발 위험, 잔존 수명, 교체 시기를 예측하는 배터리 안전 진단 시스템 (BDS) SoC 개발)의 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] Tomaszewska, Anna, et al. "Lithium-ion battery fast charging: A review." ETransportation 1 (2019): 100011.