

어플리케이션 운용 중 통신 데이터 기반 SOH 추정을 위한 방전구간건전성지표추출

김보민, 이동철, 하태빈, 송민우, 김종훈*

충남대학교*

mikim0626@naver.com, cheol9883@naver.com, bin_0@naver.com, bananakick4563@naver.com, whdgns0422@cnu.ac.kr*

Extracting Discharge Section Health Indicators for Communication Data-Based SOH Estimation during Application Operation

Kim Bomin, Lee Dongcheol, Ha Taebin, Song Minwoo, Kim Jonghoon*

Chungnam University*

요약

본 논문은 어플리케이션 운용 중 취득 가능한 통신 데이터 기반으로 건강 상태(State of health; SOH) 추정을 위해 방전 구간에서 건전성 지표를 선정하였으며 이력 데이터 중 전압 정보를 활용하여 성능을 대변할 수 있는 건전성 지표인 TIEDVD(Time interval of equal discharging voltage difference), VIETD(Voltage interval of equal discharging time difference), MVF(Mean voltage falloff) 및 Partial Capacity를 추출하였다. 이를 위해 노화된 배터리의 완전 충전 및 방전과 부분 충전 및 방전에 대한 인자를 도출하였으며 충전 상태(State of charge; SOC)에 따른 일부 구간별 건전성 지표(Health indicator; HI)를 도출하였다. 어플리케이션 운용 중 통신 데이터 내 부분 방전 구간에서도 SOH 추정을 위한 건전성 지표를 추출할 수 있었으며 완전 방전 구간과 부분 방전 구간의 HI를 비교한 결과, 부분 방전 구간에서 추출된 HI 기반으로 폐배터리의 노화 정도를 대변할 수 있다.

I. 서론

최근 전 세계적으로 기후 변화에 대응하기 위해 온실가스 배출량을 줄이고 탄소 중립이라는 최종적인 목표를 달성하고자 기존의 화석연료 발전 방식에서 벗어나기 위한 노력이 계속되고 있다. 대표적으로 신재생 에너지의 적극적인 도입과 내연기관 자동차에서 전기 자동차로의 전환이 활발하게 이루어지고 있다. 특히 전기 자동차의 경우 정부 규제와 시민들의 환경 의식 확장에 따라 수요가 매년 증가하고 있으며, 이에 따라 전기 자동차의 주 전력원인 리튬이온 배터리의 사용량도 증가하고 있다. 하지만 리튬이온 배터리는 사용됨에 따라 열화가 일어나며 동일한 배터리 간에도 배터리 내부 전기화학적 특성이 상이하고 배터리의 운용환경 및 운용 조건에 따라 열화 특성이 비선형적으로 나타난다. 이러한 특성으로 인해 전기 자동차에 탑재되는 리튬이온 배터리의 SOH(State-of-health; SOH)가 80% 이하로 떨어지게 되면 전기 자동차가 요구하는 에너지 및 전력요구를 충족하지 못함에 따라 폐기되며 이때를 수명 임계점(End of life; EOL)이라 정의한다[1]. 수명 임계점을 넘어서는 배터리는 폐배터리로 정의하며, 폐배터리는 외부 노출 시 화재나 폭발 위험이 있고 매립이나 소각을 진행할 경우 오히려 환경 문제가 악화될 수 있어 처리문제가 대두되고 있다. 따라서 기존 처리 방식과는 달리 배터리의 모듈 및 셀을 해제하지 않고 에너지저장장치(Energy storage system; ESS)와 같이 에너지 및 전력 수요가 낮은 곳에서 폐배터리를 재사용함으로써 환경적 가치와 경제적 가치를 동시에 창출하는 방법에 대한 연구가 활발하다[2]. 하지만 폐배터리를 재사용하기 위해서는 여전히 많은 기술적 제약이나 경제적 실행 가능성에 대한 의문이 존재한다. 폐배터리의 경우 노화의 진행 단계에서 용량의 변곡점(Knee point)이 일어난 이후 단계로, 그 경향성이 신제품 배터리와는 차이를 보이기 때문에 어플리케이션의 운용에 따른 주요 노화 메커

니즘의 차이와 내부 단락 가능성 증가 및 용도 변경에 따른 여러 안전 문제에 대한 고려도 필요하다. 따라서 어플리케이션을 안전하고 효율적으로 운용하기 위해 배터리의 노화와 잔존수명(Remaining Useful Life; RUL)에 관련되는 SOH 추정방법에 대한 연구가 필요하다[3].

II. 본론

본 논문에서 사용한 배터리는 INR21700-33J 배터리이며 초기용량은 3.3[Ah]이다. 실험은 25°C에서 진행되었으며 SOH 추정을 위해 IC-rate로 CC-CV 충전, CC 방전을 반복하여 총 1,153 Cycle 열화 실험을 진행한 결과 SOH 60%까지 노화되었다. SOH 60%까지 노화된 데이터를 통해 EOL 이후의 배터리 노화 경향성을 파악할 수 있었으며 배터리 열화 실험 프로파일과 열화 데이터의 사이클에 따른 용량 변화

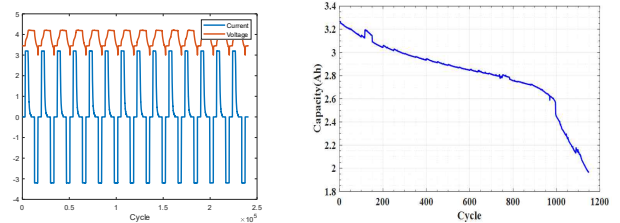


그림 1. 열화 실험 프로파일 및 열화 사이클에 따른 용량 변화

완전 충전, 방전을 진행한 SOC 100%~0% 구간과 부분 충전, 방전 구간인 SOC 50%~30% 구간을 선정하여 방전 구간에 대한 HI를 추출하였다. 일정 방전 전압에 따른 시간 변화를 나타내는 TIEDVD(Time interval of

equal discharging voltage difference)는 식 (1)과 같으며, 일정 방전 시간에 따른 전압 변화를 나타내는 VIEDTD(Voltage interval of equal discharging time difference)는 식 (2)와 같다. 완전 충전 전압과 방전 시 전압 차의 평균값인 MVF(Mean voltage falloff)는 식 (3)으로 나타낼 수 있으며, 일정 전압 구간에 대해 전류 적산을 하여 Partial Capacity를 추출하였다.

$$T_{i_TIEDVD} = |t_{Vmax} - t_{Vmin}| \quad (1)$$

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

$$MVF_i = \frac{\sum_{j=1}^{sample} |V_j - V_i|}{sample} \quad (3)$$

SOC 100%~0% 방전 구간에 대해 TIEDVD는 3.0V부터 4.2V까지 0.2V 간격으로 6개 HI, VIEDTD는 500초 간격으로 4개 HI, MVF는 1개 HI, Partial Capacity는 3.0V부터 4.2V까지 0.2V 간격으로 6개 HI를 추출하였으며 그림 2와 같다. TIEDVD와 Partial Capacity에 대해 전압 구간 별 Pearson 상관 분석을 한 결과 3.8V - 4.0V 구간에서 0.9974, -0.9974로 높은 상관관계가 있었으며 Pearson 상관 계수 식은 식 (4)와 같다.

$$r_{XY} = \frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

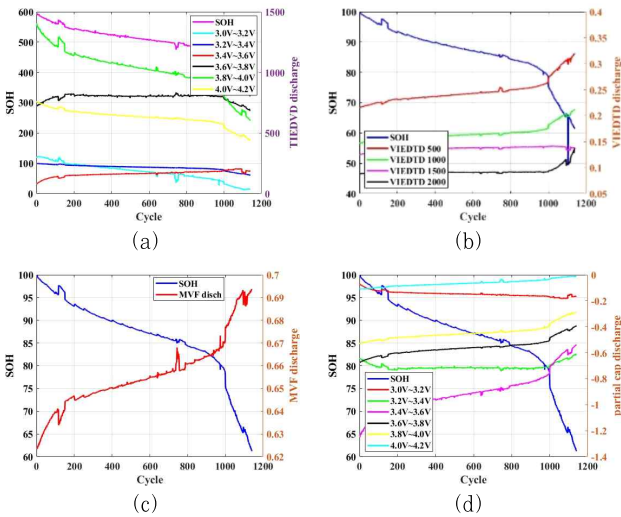


그림 2. SOC 100%~0% 방전 구간 HI (a) TIEDVD (b) VIEDTD (c) MVF (d) Partial Capacity

SOC 50%~30% 방전 구간에 대해 TIEDVD는 1개 HI, VIEDTD는 100 초 간격으로 1개 HI, MVF와 Partial Capacity는 1개 HI를 추출하였으며 그림 3과 같다. 대부분의 건전성 지표 선정 시, 충전 구간에서 인자를 도출하는 것이 일반적이지만 어플리케이션 운용 중 입고되는 폐배터리의 방전 구간에서 인자를 추출하기 위해 부분 방전 구간을 선정하였다.

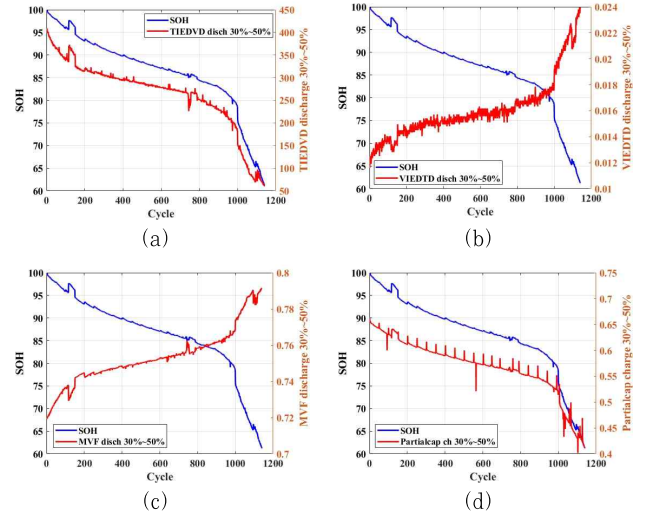


그림 3. SOC 50%~30% 방전 구간 HI (a) TIEDVD (b) VIEDTD (c) MVF (d) Partial Capacity

용량과 SOC 50%~30% 방전 구간에서 추출한 HI 간 Pearson 상관 분석을 한 결과는 표 1과 같으며 부분 방전 구간에서도 용량에 대한 상관관계가 높음을 볼 수 있다.

TIEDVD	VIEDTD	Partial capacity	MVF
0.9942	-0.9887	1	0.9866

표 1. SOC 50%~30% 방전 구간 Pearson 상관 분석 결과

III. 결론

본 논문에서는 어플리케이션 운용 이력과 통신 데이터에 따른 SOH 추정을 위해 리튬이온 배터리 방전 구간에서 건전성 지표를 추출하여 상관 분석을 진행하였다. SOC 구간에 따라 완전 방전 구간과 부분 방전 구간에 대한 HI를 비교하였으며 이를 통해 부분 방전 구간인 SOC 50%~30%에서도 배터리의 노화 정도를 반영할 수 있으며 높은 상관관계가 있다. 추후 연구로는 방전 구간에서 추출한 건전성 지표를 기반으로 RUL 예측 연구를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 GS건설의 지원 및 한국산업기술평가관리원(No. 20015572, 전기자동차 급속충전 및 고출력 운전을 위한 배터리팩 열관리)의 재원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Kandler Smith. "Life Prediction Model for Grid-Connected Li-ion Battery Energy Storage System", 2017 American Control Conference, p. 4062-4068.
- [2] Yang Hua, "Toward Sustainable Reuse of Retired Lithium-ion Batteries from Electric Vehicles", Resources, Conservation & Recycling, 2021, 105249.
- [3] Elisa Braco. "State of health estimation of second-life lithium-ion batteries under real profile operation", Applied Energy, 2022, 119992.