

리튬이온 배터리의 잔여 수명 예측을 위한 다중 건전성 모니터링 지표 연구

권상욱*, 김규태**, 윤성현**, 임철우***, 김종훈*
충남대학교 에너지저장변환실험실*, 삼성전자**, 한국과학기술원 인공위성연구센터***

A study on the multiple health monitoring indicator for remaining useful life prediction of battery

Sanguk Kwon*, Kyutae Kim**, Sunghyun Yoon**, Cheolwoo Lim***, Jonghoon Kim*
Chungnam National University*, Samsung Electronics**, KAIST Satellite Technology Research Center***

ABSTRACT

배터리 시스템은 어플리케이션의 대영화에 따른 데이터 저장 공간 문제 및 연속적인 배터리 신뢰성 문제 해결을 위한 건전성 예측 및 관리기술 접목에 관한 문제에 직면해 있으며, 이러한 문제 해결을 위해서는 배터리 시스템 신호를 통해 추출 가능한 건전성 지표 수립이 중요하다. 본 논문은 건전성 지표를 물리적, 간접적 지표로써 정의하고, 사이클 노화 데이터를 통해 건전성 지표로써의 성능을 검증하였다.

1. 서 론

Net zero 발표 이후 지구 온난화 방지를 위한 온실 가스 감축 방안이 검토되고 있으며, 리튬이온 배터리는 온실 가스 절감 및 고에너지, 장수명 특징으로 자동차(Electric vehicle), 에너지 저장 장치(Energy storage system) 등 다양한 어플리케이션에서 사용되고 있다. 리튬이온 배터리를 사용하는 어플리케이션의 대영화가 진행됨에 따라 안전 및 효율적인 운용을 위해 배터리 관리 시스템(Battery management system; BMS)의 중요성이 강조되고 있다. 하지만, 대용량 어플리케이션이 증가하면서 실제 상용되는 배터리 관리 시스템은 적은 데이터 저장 공간 및 부족한 계산 능력과 같은 물리적인 임베디드 시스템의 한계로 인하여 배터리의 건전성을 예측하는 고도화된 알고리즘의 수행은 불가능하다. 따라서 물리적 시스템의 한계를 극복하기 위하여 가상 공간(Cyber)에서 고성능 시스템을 구축하는 클라우드 기반 배터리 관리 시스템 연구가 진행되고 있지만, 이마저도 클라우드로 올라오는 모든 데이터를 저장하기에는 한계를 가지고 있어 노화 상태 진단, 이상 신호, 고장 데이터를 판단하기에 어려움이 있다.

이러한 배터리 관리 시스템의 한계성과 연속적인 안전성 및 신뢰성 문제로 인한 연구가 맞물려 건전성 예측 및 관리기술(Prognostics and health management; PHM) 연구가 주목받고 있다.^[1] 건전성 예측 및 관리기술은 배터리의 상태를 진단(Diagnosis)하고 현재 상태를 바탕으로 이후 상태를 예측(Prognosis)하게 되며, 적용 단계는 데이터 획득, 상태 지표 추출, 건전성 상태 진단, 건전성 상태 예측으로 크게 나눌 수 있다. 배터리 시스템을 위한 건전성 예측 및 관리기술은 배터리 노화 상태를 효율적으로 나타낼 수 있는 건전성 지표(Health indicator; HI) 추출이 요구되며, 대표적으로 용량, 내부 저항을 수명 상태(State of health; SOH) 및 잔여 수명(Remaining

useful life; RUL)의 기준으로써 사용하고 있다. 하지만 어플리케이션에 접목하기 위해서는 만충(Fully charge)과 만방(Fully discharge)을 통해 산출되는 용량, 전류 및 온도에 영향을 많이 받는 저항만으로 노화 상태를 판단하는 것은 어려움을 가지고 있다. 따라서 상태 지표로써 사용되는 방전 용량과 높은 상관관계를 나타내며, 실제 어플리케이션 운용 환경에서 배터리 시스템의 신호(전압, 전류, 온도)를 통해 추출 가능한 다양한 성능 지표가 요구된다.

본 논문은 충전 구간에서의 건전성 지표를 배터리 내부 물리적 특성 반영 여부에 따라 물리적 건전성 지표와 간접적 지표로 나누어 정의하였으며, 총 300 사이클의 원통형 배터리 노화 실험 데이터를 통하여 방전 용량과의 상관관계를 검증하였다.

2. 건전성 지표(health indicator)

2.1 물리적 건전성 지표(Physics health indicator)

충전 구간은 부하에 따라 변동되는 방전 구간과 다르게 충전방식에 따라 일정하게 충전된다. 따라서 비교적 일정한 조건의 충전 영역에서 건전성 지표 추출이 요구되며, 이에 따라 본 논문은 충전 영역에 한정하여 제안한다.

물리적 건전성 지표는 노화에 따라 나타나는 배터리 내부 전기적/화학적 변화를 물리적으로 대변할 수 있는 지표로써, 노화에 따른 충전 전압 곡선과 함께 그림 1에 나타났다. 제안하는 건전성 지표는 총 2가지로 나눌 수 있으며, 첫 번째는 CC(Constant current) 충전과 CV(Constant voltage) 충전의 관계, 2번째는 부분 충전 용량(Partial charge capacity)이다. 첫 번째 CC 충전과 CV 충전의 경우 노화가 진행될수록 CC 충전 용량은 감소하고, CV 충전용량은 증가하는 경향을 그림 1을 통해 확인할 수 있으며, 이는 배터리 내부 부반응으로 인한 활성 리튬의 감소 및 SEI(Solid electrolyte interphase) 층의 증가로 인한 내부 저항 증가 현상에 기인한다. 하지만 CV 충전용량의 경우 노화가 진행될수록 용량 감소량보다 저항 증가량에 영향을 받게 되며, 노화 초기 증가 경향에서 감소 경향으로 비선형적으로 변화한다. 이로 인해 CV 충전 영역에서의 건전성 지표는 배터리가 노화될수록 실제 노화 상태와의 오차가 발생하며, 이는 건전성 지표로써 부적합함을 의미한다. 따라서 본 논문은 노화에 따라 비교적 선형적으로 변화하는 CC 충전 구간에서 추출하였고, CC 충전용량 및 충전 시간을 건전성 지표로써 제안한다.

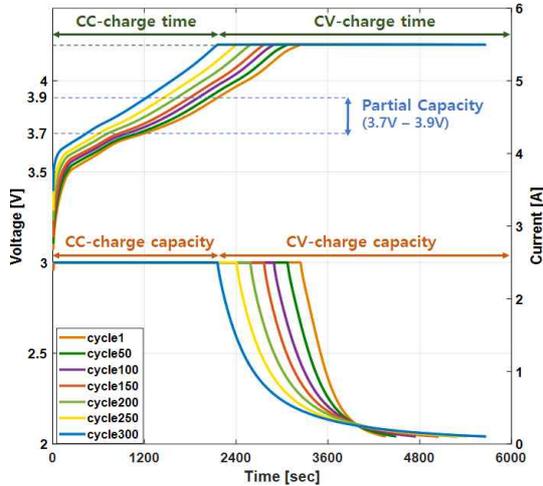


그림 1 노화에 따른 충전 전압, 전류 곡선 및 물리적 건전성 지표

Fig. 1 Voltage, current curve with aging and direct health indicator

$$Capacity_{partial} = \int_{t_0}^{t_1} i(t)dt \quad (3.7V - 3.9V) \quad (1)$$

두 번째로 부분 충전용량의 경우 식 (1)과 같이 어플리케이션의 운용 범위에 따른 특정 전압 구간에서 전류 적산을 통해 산출되는 충전용량을 의미하며, 수식에 나타난 3.7V부터 3.9V의 전압은 배터리 어플리케이션에서 주로 사용되는 40% - 60% 충전상태(State of charge; SOC)를 예를 들어 나타냈다. 부분 충전용량은 건전성 지표로서 전압 범위에 따라 성능이 상이하며, 구간에 따른 방전 용량과의 상관관계 및 실제 어플리케이션의 운용 전압 범위가 고려되어야 한다.

2.2 간접적 건전성 지표(Refined health indicator)

간접적 건전성 지표는 배터리 시스템의 신호(전류, 전압, 온도)를 통해 일정 조건에서의 신호 변화량, 통계적 분석, 신호 처리 등 간접적으로 배터리 노화 상태를 추정할 수 있는 지표를 의미한다. 그림 2는 노화에 따른 충전 구간의 전압과 함께 본 논문에서 제안하는 간접적 건전성 지표 5개를 나타낸다. 첫 번째 방법은 일정 조건에서의 전류, 전압 변화량을 지표로서 사용하는 방법이며, 동일한 전류 조건에서 특정 전압부터 다른 특정 전압까지 일정한 전압 구간에서의 충전 시간(Time interval of equal charging voltage difference; TIECVD), 특정 전압부터 일정한 시간 동안의 전압 변화량(Voltage interval of equal charging time difference; VIECTD), CV 충전 구간에서 일정 시간 동안의 전류 감소량(CV current difference)으로 구분할 수 있다. 두 번째 방법은 신호의 통계적 변화량을 통해 노화의 지표로서 나타내며, 전압의 평균값 변화(mean voltage falloff)가 대표적이다. 세 번째 방법은 신호 처리를 통해 노화에 따라 변화하는 신호 특징을 추출하는 방법으로 웨이블릿 변환(Wavelet transform), 정보 엔트로피(Shannon entropy), 샘플 엔트로피(Sample entropy)와 같은 방법이 사용되며, 본 논문은 샘플 엔트로피를 건전성 지표로서 검증 및 제안한다. 샘플 엔트로피는 신호의 외란, 이상 신호와 같은 복잡함(Complexity) 정도를 수치 변환하는 방법으로써, 신호의 복잡함이 적을수록 0에 가까운 값으로 나타난다.

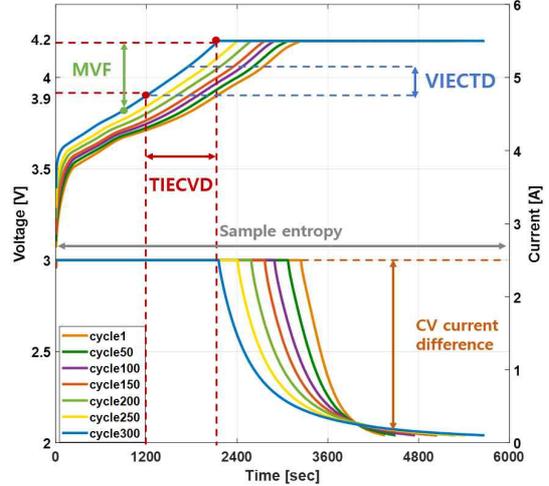


그림 2 노화에 따른 충전 전압, 전류 곡선 및 간접적 건전성 지표

Fig. 2 Voltage, current curve with aging and refined health indicator

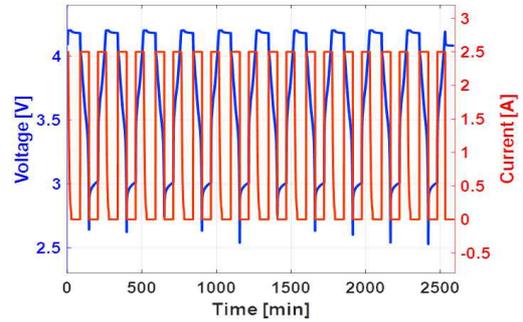


그림 3 사이클 노화 실험 프로파일

Fig. 3 Cycling aging test profile

표 1 NMC 계열 18650 원통형 배터리 사양
Table 1 18650 cylindrical NMC battery specification

Characteristic	Specification
Nominal discharge capacity	2500mAh
Nominal voltage	3.6V
Standard charge	CCCV, 1.25A, 4.2±0.05V, 125mA cut-off
Discharge cut-off voltage	2.5V

3. 건전성 지표 검증을 위한 사이클 노화 실험

3.1 사이클 노화 실험

본 논문에서는 제안한 건전성 지표 성능 검증을 위하여 NMC(Nickel manganese cobalt) 계열의 18650 원통형 배터리 사이클 노화 실험을 진행하였다. 실험 환경 조건은 항온 항습 챔버 내부에서 상온(25℃) 조건을 유지하며 진행되었으며, 실험 프로파일의 경우 표 1에 나타난 원통형 배터리 사양에 따라 1C-rate(2.5A)의 동일한 전류 조건으로 4.2V까지 만충 이후 2.5V까지 만방을 1 사이클로 정의하였다. 총 300 사이클의 실험을 진행하였으며, 262 사이클에서 초기 용량 대비 80%까지 감소하여 수명 임계점(End of life; EOL)에 도달하였다.

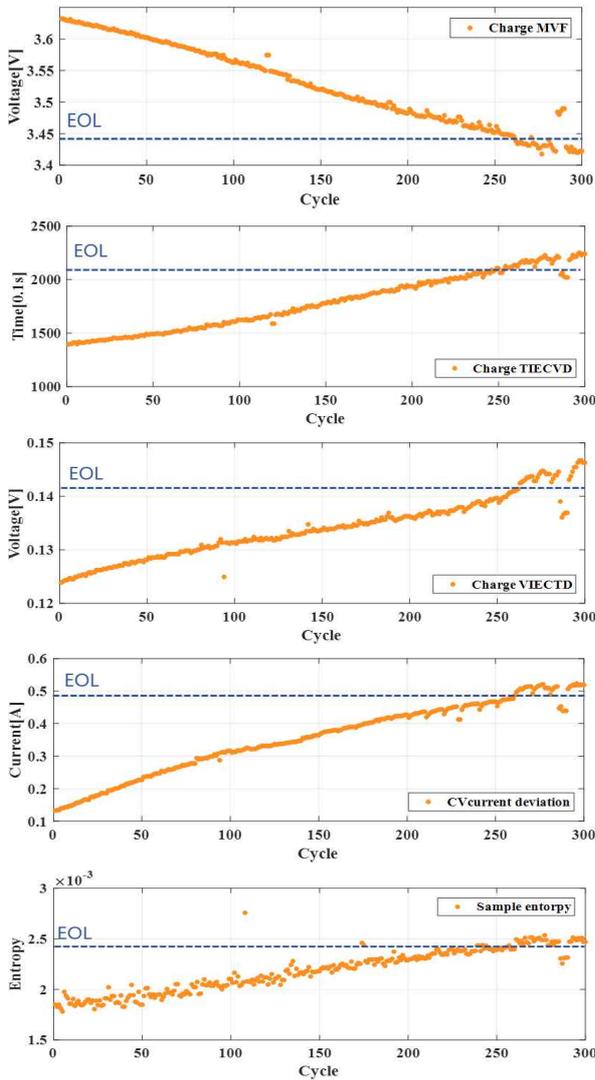


그림 4 노화에 따른 간접적 건전성 지표 그래프
Fig. 5 Refined health indicator graph with aging

3.2 노화 실험 기반 건전성 지표 추출 및 검증

그림 4, 5는 총 300 사이클의 노화 실험 동안 물리적 건전성 지표와 간접적 건전성 지표를 추출하여 그래프로 나타낸 결과이다. 그림 4, 5에서 나타난 수명 임계 제한선까지 모든 지표가 비교적 선형적으로 감소하거나, 증가하는 경향이 있으며, 수명 임계점 이후로 비선형적으로 분포하는 것을 확인할 수 있다. 건전성 지표의 성능 평가는 방전 용량을 기준으로 진행하였으며, 초기 용량 대비 80%까지 도달하는 262 사이클을 수명 임계점(End of life; EOL)으로 정의하고 수명 임계점까지 건전성 지표 변화량 계산 및 방전 용량을 기준으로 피어슨 상관분석을 진행하였다. 방전 용량 기준 상관분석 결과 물리적 건전성 지표는 0.9722 이상, 간접적 건전성 지표는 0.9404 이상으로 높은 상관관계를 확인할 수 있으며, 정확한 수치는 표 2에 나타내었다. 표 2에서 나타난 EOL은 초기 대비 수명 임계점에서의 수치를 의미하며, 물리적 건전성 지표는 80% 이하로 변화량이 적은 반면 간접적 건전성 지표는 최대 375% 변화율로 물리적 건전성 지표보다 배터리 노화에 따라 민감하게 변화하는 지표인 것을 확인할 수 있다.

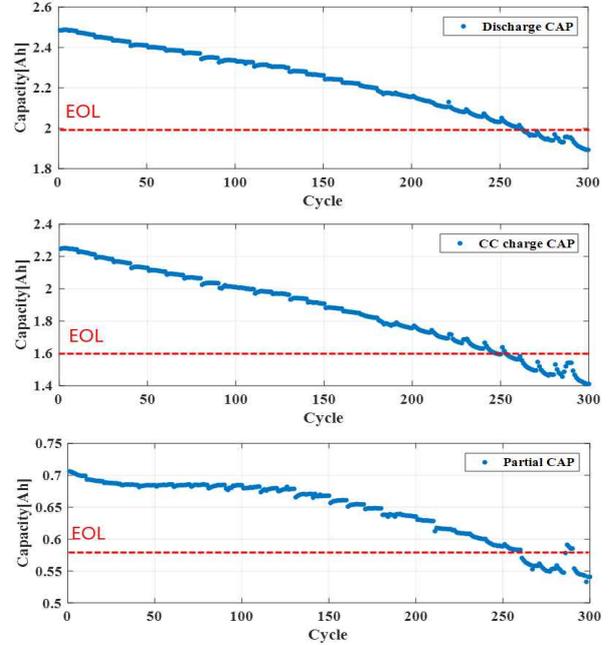


그림 5 노화에 따른 물리적 건전성 지표 그래프
Fig. 5 Physics health indicator graph with aging

표 2 건전성 지표 상관 분석 및 수명 임계점 수치
Table 2 Correlation analysis of health indicators and end of life quantity

	방전 용량	CC 용량	부분 용량	MVF
상관계수	1	0.999	0.9722	0.9786
EOL	80%	69.3%	80%	94.7%
	TIECVD	VIECTD	CV 전류 감소량	Sample entropy
상관계수	0.9904	0.9796	0.9679	0.9404
EOL	154%	114%	375%	134%

4. 결론

대용량 배터리 시스템 운용 및 배터리 건전성 예측 및 관리 연구를 위한 사전 연구로써 건전성 지표를 정의 및 구분하고 사이클 노화 데이터를 통해 검증하였다. 향후 연구로써는 실제 어플리케이션에서의 성능 평가 및 온도 데이터를 포함한 건전성 지표 연구가 요구된다.

이 논문은 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업(NRF-2017M1A3A3A03016056)과 삼성전자의 “무정전전원공급장치(UPS) 건전성 및 배터리관리시스템(BMS) 개발” 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고 문헌

- [1] MENG, Huixing; LI, Yan-Fu. A review on prognostics and health management (PHM) methods of lithium-ion batteries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 116: 109405.