

리튬 이온 배터리의 전압 구간 별 건강성 지표와 열화 상태 상관관계 분석 연구

박종욱, 정대웅, 배성우[†]
한양대학교

A research on correlation analysis of health indicators and state of health for each voltage section of lithium-ion batteries

Jongwook Park, Daeung jeong, Sungwoo Bae[†]
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

ABSTRACT

본 논문에서는 리튬 이온 배터리의 전압 구간에 따른 건강성 지표와 배터리의 열화 상태의 상관관계에 대한 분석 연구를 진행한다. 기존 방식으로 배터리 열화 상태를 파악하기 위해서는 전주기의 배터리 충·방전 데이터 확보가 필요하다. 하지만, 실제 배터리를 운용하는 상황에서는 전체 충·방전 데이터를 확보하기 어려워 기존 방식만으로는 배터리 열화 상태 추정이 어렵다. 이를 개선하기 위해서는 충·방전 데이터에서 부분 구간 값을 적용한 배터리 열화 상태 분석이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 전압 구간에 따른 건강성 지표를 분석하고, 전압 구간 별에 따라 회색 상관 분석 방법을 활용하여 건강성 지표와 열화 상태가 얼마나 연관성을 분석한다.

1. 서론

최근 탄소 중립을 위한 노력의 일환으로 리튬 이온 배터리를 활용한 어플리케이션이 주목을 받고 있다. 리튬 이온 배터리는 전기에너지를 화학에너지로 변환하여 저장하는 장치이다. 리튬 이온 배터리는 고밀도 에너지, 높은 출력이라는 장점이 있지만, 에너지를 저장하고 출력하는 잦은 충·방전에 따라 배터리 셀의 용량이 감소하는 열화 현상이 발생한다. 열화 현상은 주로 배터리 셀 내부 저항(Internal Resistance)이 증가하는 것이 원인이 된다. 이로 인해 동일한 전력을 출력하는 상황에서 점차 전력 손실이 커지는 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제는 배터리의 과충전, 과방전 그리고 충·방전 효율 감소와 같은 원인으로 작용하여, 안전하고 효율적인 운영을 어렵게 한다. 따라서, 배터리를 안전하게 운영하기 위해서는 이러한 배터리 열화 상태를 정확하게 추정하는 기술이 필요하다.

리튬 이온 배터리의 열화 상태를 추정 방법은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫째는 모델 기반(Model-Based) 방법이고, 둘째는 데이터 기반(Data-Driven)의 방법이다. 모델 기반의 방법의 경우 리튬 이온 배터리의 전기화학적 특성을 분석하여 파라미터 값으로 모델링하는 것이 필요하다. 해당 방법을 적용하기 위해서는 리튬 이온 배터리에 대한 전기화학적 지식이 요구된다. 하지만, 데이터 기반의 방법의 경우 배터리 관리 시스템(Battery Management System, BMS)에서 측정된 데이터만을 통해 배터리 열화 상태를 추정할 수 있다. 구현하기 쉽다는 특징으로 인해 최근 데이터 기반의 방법이 많이 사용되고 있다.

해당 방법을 적용하기 위해서, 즉, 열화 상태를 추정하기 위

해서는 열화 현상에 따른 건강성 지표(Health Indicator, HI)를 추출하는 과정이 필요하다. 기존의 리튬 이온 배터리의 건강성 지표를 추출하기 위해서는 배터리의 충·방전의 전주기 데이터가 필요하다. 하지만 실제 배터리를 운용하는 상황에서 전주기의 데이터를 모두 확보하는 것은 어렵다. 왜냐하면 실제 배터리를 운용할 때의 충·방전은 배터리의 전 구간이 아닌 부분 구간만을 사용하기 때문이다.

따라서, 본 논문에서는 리튬 이온 배터리의 전압 구간 별로 추출된 건강성 지표가 열화 상태와 얼마나 연관한지 회색 상관 계수를 통해 영향성을 분석한다. 영향성 분석을 위해 사용된 리튬 이온 배터리의 운용 데이터는 실제 배터리를 충·방전 실험을 통해서 획득하였다.

2. 이론

2.1 리튬 이온 배터리의 열화 상태

리튬 이온 배터리의 열화는 배터리를 지속적으로 충·방전함에 따라, 사용 가능한 용량이 감소하는 것을 의미한다^[1]. 이에 따라 현재 최대 사용 가능 용량 상태를 State of Health(SOH)라고 하며, 이를 수식적으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$SOH[\%] = \frac{Capacity_{Current}[Ah]}{Capacity_{Initial}[Ah]} \times 100 \quad (1)$$

해당 수식에서 $Capacity_{Current}$ 은 충·방전 사이클을 진행한 현재의 용량을 의미하며, $Capacity_{Initial}$ 는 초기 배터리 용량을 의미한다. 즉, SOH가 감소함에 따라서 배터리의 사용 가능한 용량이 감소함을 의미한다.

2.2 리튬 이온 배터리 건강성 지표

건강성 지표는 배터리 관리 시스템에서 직접 측정된 데이터를 가공하여 사용하는 지표이다. 이때 직접 측정된 데이터에는 배터리의 전압(Voltage), 전류(Current), 온도(Temperature), 시간(Time) 값을 포함한다. 건강성 지표는 배터리 열화 상태에 따라 한 사이클 동안 측정된 데이터를 통해서 하나의 지표 값을 구하게 된다. 이때 배터리 열화 상태 추정은 여러 가지 건강성 지표를 통해서, 배터리의 현재 열화 상태를 추정하는 방식으로 사용된다.

건강성 지표의 값은 추출되는 전압 구간에 따라서 상이할

수 있다. 하지만 건강성 지표는 배터리 열화 상태와 일관성 있는 상관관계를 가지고 있어야 활용할 수 있다. 본 논문에서는 건강성 지표와 배터리 열화 상태 값과의 일관성 있는 관계성을 파악을 위해 상관관계 분석을 실시하였다.

2.3 회색 관계 분석

회색 관계 분석(Grey Relational Analysis, GRA)는 회색 시스템(Grey System)을 평가하는 방법으로, 불확실하고 불완전한 자료가 있는 경우에 사용한다^[2]. 회색 이론에 따르면 흰색 시스템(White System)이란 시스템에 대해서 모든 것을 알고 있는 것, 검정 시스템(Black System)은 시스템에 대해서 완전하게 모르는 것, 그리고 회색 시스템은 시스템에 대해서 완전하게 명확하지 않는 것을 의미한다.

배터리의 열화 상태의 경우에는 배터리의 최대 사용 가능한 용량 값에 대해 측정된 데이터에서 추출한 건강성 지표 값을 입력 값으로 사용하여 추정을 하는 것이다. 따라서, 배터리 열화 상태 추정 시 회색 시스템에 속하기 때문에, 추출한 건강성 지표 값과 배터리 열화 상태의 관계에 대한 회색 관계 분석이 필요하다.

회색 관계 분석에서는 자료의 정규화(Normalization)이 필요하다. 이는 기존 데이터가 비교 가능한 배열로 변환하기 위함이며, 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x^*(k) = \frac{x_i^0 - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0 - \min x_i^0(k)}, i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, n. \quad (2)$$

여기서 m 은 평가항목의 수, n 은 배열의 수, $x_i^0(k)$ 는 정규화 이전 원본 데이터의 배열, $x_0^*(k)$ 는 자료의 정규화 후 배열, $\min x_i^0(k)$ 는 $x_i^0(k)$ 의 가장 작은 값을 의미한다. 정규화 이후 모든 값은 0과 1사이의 범위로 변환이 되어 관계 계수를 구한다.

회색 관계 계수(Grey Relational Coefficient)는 참조 배열과 비교 배열간의 회색 관계를 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 식(2)의 요소들의 개별 수식은 식(4)~(6)과 같다. 회색 관계 계수가 1에 가까울수록 두 배열의 상관관계가 높다고 판단할 수 있다.

$$\zeta_i(k) = \frac{\Delta \min + \rho \Delta \max}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta \max} \quad (3)$$

$$\Delta_{0j} = |x_0^*(k) - x_j^*(k)| \quad (4)$$

$$\Delta \min = \min |x_0^*(k) - x_j^*(k)|; \forall j \in i \forall k \quad (5)$$

$$\Delta \max = \max |x_0^*(k) - x_j^*(k)|; \forall j \in i \forall k \quad (6)$$

해당 수식에서 x_0^* 은 k 의 참조 배열, x_i^* 는 k 의 비교 배열, ρ 는 분류 계수를 의미한다. 이때 $\rho \in [0, 1]$ 사이의 값이며, 본 논문에서는 0.5로 적용하였다.

3. 건강성 지표 영향 분석

3.1 배터리 충·방전 데이터 세트

본 논문에서는 Samsung SDI 社の INR18650-35E의 NMC 삼원소 배터리를 충·방전하여 얻은 데이터를 사용하였다. 해당 리튬 이온 배터리 셀의 정보는 표 1과 같다. 해당 리튬 이온 배터리 셀의 충·방전 실험은 LABHouse社의 온도 챔버

표 1 실험에 적용된 배터리 정보

Table 1 Battery specifications using for the experiment

Battery Spec.	Value
Model	Samsung SDI INR18650-35E
Nominal Voltage	3.6 V
Charge Cutoff Voltage	4.2 V
Charge Cutoff Current	67 mA
Discharge Cutoff Voltage	2.65 V
Nominal Capacity	3,350 mAh
Internal Resistance	35 mΩ

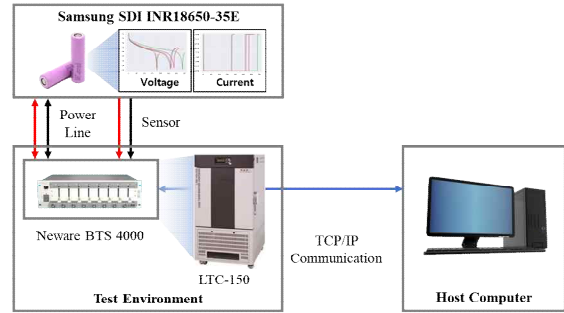


그림 1 리튬 이온 배터리 충·방전 시스템 개요도

Fig. 1 Schematic diagram of charging/discharging system for lithium-ion battery

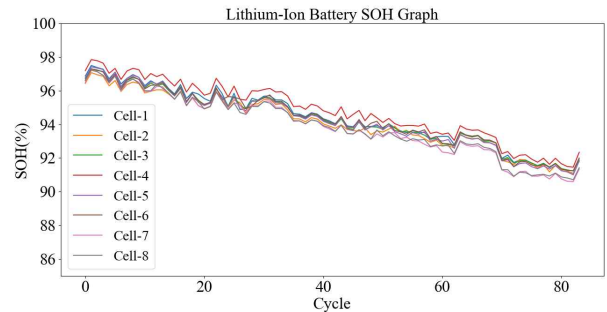


그림 2 리튬 이온 배터리 열화 그래프

Fig. 2 Lithium-Ion battery degradation graph

(LTC-150 모델)에서 상온 25[°C]을 유지하며 진행하였다. 충·방전 실험의 개요도는 그림 1과 같다. 충전 전류는 1,020mA(0.33C)이며, 충전 중단 전압(Cutoff Voltage)는 4.2V에 중단 전류(Cutoff Current)는 67mA를 적용하였다. 방전 전류는 1,750mA(0.5C)이며, 방전 중단 전압은 2.65V를 적용하였다. 해당 충·방전 실험에서는 1 사이클은 배터리를 4.2V로 충전한 상태에서 2.65V까지 방전한 이후 다시 4.2V까지 충전하는 것을 의미한다. 그림 2는 배터리 실험을 진행하여 획득한 배터리 열화 상태 그래프를 나타낸 것이다. 실험 데이터의 배터리 열화 상태는 대략 SOH가 93%까지 열화되었다.

3.2 건강성 지표 추출 시험 및 분석 결과

본 논문에서의 건강성 지표 목록은 표 2와 같다. 건강성 지표는 배터리의 충전과 방전 상황 2가지로 구분을 하였다. 또한, 건강성 지표에서 특정 전압 구간의 값을 추출하여 사용을 하는데, 해당 구간을 0.2V, 0.3V, 0.4V와 같이 나누었다. HL_1과 HL_5에서는 각 구간의 전압 값의 평균값을 건강성 지표로 사용하였다. 또한, 충·방전 상황에서 특정 시간 동안의 변화량에

표 2 배터리 건강성 지표 목록

Table 2 List of lithium-ion battery health indicators

Status	Name	Description
Charge	HI_1	충전 시간 동안의 전압 값의 평균 값
	HI_2	전압 구간의 최소 전압 값 도달 이후 10초 동안 전압 상승량
	HI_3	전압 구간의 최소 전압 값 도달 이후 10초 후 전압 값
	HI_4	IC 곡선의 점두 값
Dis charge	HI_5	방전 시간 동안의 전압 값의 평균 값
	HI_6	전압 구간의 최고 전압 값 도달 이후 10초 동안 전압 상승량
	HI_7	전압 구간의 최고 전압 값 도달 이후 10초 후 전압 값
	HI_8	IC 곡선의 점두 값
	HI_9	전압 구간 도달 CC 방전 시간

표 3 0.2V 구간의 회색 상관 계수 비교표

Table 3 Comparison table of grey relational coefficient for 0.2V voltage interval

Name	Values (Voltage Range)					
	3.0~3.2V	3.2~3.4V	3.4~3.6V	3.6~3.8V	3.8~4.0V	4.0~4.2V
HI_1	0.576	0.284	0.551	0.603	0.622	0.550
HI_2	0.608	0.428	0.652	0.646	0.656	0.647
HI_3	0.544	0.205	0.652	0.646	0.658	0.647
HI_4	0.460	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538
HI_5	0.583	0.579	0.572	0.568	0.574	0.570
HI_6	0.603	0.538	0.332	0.558	0.586	0.585
HI_7	0.601	0.609	0.589	0.581	0.575	0.570
HI_8	0.173	0.514	0.514	0.514	0.514	-
HI_9	0.556	0.548	0.491	0.579	0.558	0.537

대한 지표를 고려하기 위해 HI_2과 HI_6에서는 10초 동안의 전압 평균 값, HI_3와 HI_7에서는 10초 동안의 전압 차이를 건강성 지표로 사용하였다. HI_4와 HI_8에서는 증분 용량 곡선의 점두 값을 사용하였고, HI_9에서는 정전류(Constant Current) 방전 시간을 사용하였다. 각 전압 구간에 해당하는 주기 동안 연산된 건강성 지표 값이 열화 상태를 나타내는 용량 값과 회색 상관 계수 값을 통해 관계성을 분석하였다.

회색 관계 분석을 기반으로 배터리 열화의 영향을 분석한 결과는 표 3, 표 4, 표 5와 같다. 모든 요소에서 HI_5는 전압 값이 높아질수록 상관관계가 낮아지며, 다른 요소들은 대부분 0.5 이상의 상관관계를 보였다. 또한, HI_6에서는 전압 구간이 상이함에 따라서 0.6에서 0.332까지 상관관계 값의 차이가 발생하였다.

4. 결론

본 논문에서는 리튬 이온 배터리의 전압 구간에 따른 건강성 지표에 따른 열화 상태 영향에 대해 분석 연구를 진행하였다. 리튬 이온 배터리의 열화에 따른 건강성 지표 획득하기 위해서 리튬 이온 배터리를 충·방전 실험을 진행하였고 획득한 데이터에서 건강성 지표를 추출하고 회색 관계 분석 방법을 적용하여, 건강성 지표와 열화 상태의 관계성을 분석하였다.

실험 결과 대부분의 상관 계수는 0.5이상의 관계성을 가지며, 이는 일반적으로 강력한 상관관계로 통계적으로 유의미한 관계성이 있다고 판단할 수 있다. 또한, 전압 구간에 따라서 같

표 4 0.3V 구간의 회색 상관 계수 비교표

Table 4 Comparison table of grey relational coefficient for 0.3V voltage interval

Name	Values (Voltage Range)			
	3.0~3.3V	3.3~3.6V	3.6~3.9V	3.9~4.2V
HI_1	0.520	0.505	0.615	0.500
HI_2	0.626	0.510	0.646	0.654
HI_3	0.554	0.511	0.646	0.652
HI_4	0.551	0.538	0.538	0.538
HI_5	0.601	0.608	0.561	0.491
HI_6	0.581	0.332	0.521	0.585
HI_7	0.619	0.589	0.519	0.570
HI_8	0.520	0.514	0.514	0.514
HI_9	0.574	0.550	0.598	0.564

표 5 0.4V 구간의 회색 상관 계수 비교표

Table 5 Comparison table of grey relational coefficient for 0.4V voltage interval

Name	Values (Voltage Range)		
	3.0~3.4V	3.4~3.8V	3.8~4.2V
HI_1	0.501	0.549	0.513
HI_2	0.637	0.652	0.656
HI_3	0.523	0.652	0.658
HI_4	0.538	0.538	0.537
HI_5	0.601	0.583	0.572
HI_6	0.538	0.558	0.585
HI_7	0.609	0.581	0.570
HI_8	0.518	0.514	0.514
HI_9	0.529	0.535	0.557

은 요소라도 0.6에서 0.332까지의 상관관계를 나타낸다. 이는 같은 건강성 지표 요소이더라도 특정 구간에서는 적용하기 어렵다는 것을 의미한다.

차후, 전압 구간에 따라 상관관계가 높은 건전성 지표를 활용하여서 열화가 급격하게 변하는 이상 열화와 같이 배터리 안전 운영에 제한되는 상태를 감지할 수 있는 연구에 대해서 진행할 계획이다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.2022550000060)

참고 문헌

- [1] H. Rauf, M. Khalid, N. Arshad, "Machine learning instate of health and remaining useful life estimation:Theoretical and technological development in battery degradation modelling", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 156, p 111903, 3.
- [2] Deng Ju-Long, Control problems of grey systems, Systems & Control Letters, Volume 1, Issue 5, 1982, Pages 288-294, ISSN 0167-6911
- [3] R. Xiong, Y. Zhang, J. Wang, H. He, S. Peng, and M. Pecht, "Lithium-Ion Battery Health Prognosis Based on a Real Battery Management System Used in Electric Vehicles," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 68, no. 5, pp. 4110 - 4121, May 2019.