

고출력 리튬이온 배터리에 적합한 단순선형회귀모형 기반 SOH 추정 기법

이평연*, 박진형*, 윤창오*, 김종훈*
충남대학교*

SOH estimation method based on simple linear regression model for high power lithium ion battery

Pyeong-Yeon Lee*, Jin-Hyeong Park*, Chan-O Yoon*, Jonghoon Kim*
Chungnam National University*

ABSTRACT

본 논문에서는 배터리 수명의 지표인 SOH(state of health) 추정 시 배터리 노화에 따라 방전 용량의 급격한 변화가 발생하면 SOH도 변화하게 된다. 이로 인해 잘못된 SOH의 정보를 가지고 오게 되며 배터리의 안정성 및 신뢰성에 문제가 된다. 본 논문에서는 방전 용량과 내부 저항의 선형적 관계를 확인하고, 방전 용량과 내부저항을 고려한 단순선형회귀모형(simple linear regression model)을 모델링하였다. 방전 용량의 급격한 변화나 오프라인 기반 방전 용량을 측정함에 어려움이 있는 경우 단순선형회귀모형에 따라 방전 용량을 추정하여 SOH를 보정하는 기법을 제안하고 이에 대한 검증을 수행하였다.

1. 서론

신재생에너지는 화력 발전기를 대체하기 위한 대안으로 설치용량의 증가하고 있다. 하지만 입력에 따라 출력이 변하는 특징을 갖고 있어 전력망의 안정도에 영향을 미친다. 이에 따라 전력망의 안정도 향상을 위한 에너지저장장치(ESS)가 각광을 받고 있으며 다양한 분야에서 활용되고 있다.

효율적으로 배터리를 활용하고 관리하기 위해서는 배터리의 상태를 모니터링 할 수 있는 배터리 관리시스템(battery management system, BMS)이 필요하다. 기존에는 배터리의 상태를 SOC(state of charge) 정보 기반으로 파악하였다. 하지만 다양한 어플리케이션에서의 배터리를 장시간 운용할 시 배터리 노화 정도에 따라 내부 특성의 변화를 야기한다. 초기 용량과 저항 대비 용량의 감소 및 저항의 증가(출력의 감소)가 나타나며 배터리 수명 단축으로 이어진다. 또한 배터리 노화에 따른 내부 파라미터의 변화로 인해 잘못된 SOC 정보를 모니터링하게 되어 신뢰성 및 안전성에 심각한 문제가 될 수 있다. 이에 따라 배터리를 안정적이고 효율적으로 운용하기 위해 배터리관리시스템의 요소 중 하나인 잔존수명 예측, 즉 SOH(state of health)의 중요도가 증가하고 있다.

본 논문에서는 고출력 리튬이온 배터리의 효율적 운용을 위한 SOH 추정 기법을 제안하였다. 전기적 특성 실험을 통해 추출된 방전 용량과 내부 저항으로부터 두 파라미터의 관계성을 확인하고 단순선형회귀모형을 모델링하였다. 회귀모형을 통해 SOH 추정을 하였고 노화 정도에 따라 급격한 용량 변화 발생 시 내부 저항으로 SOH를 보정하는 기법을 제안하였다.

2. SOH 추정을 위한 전기적 특성 실험 및 내부 파라미터 분석

2.1 SOH 추정 기법

SOH는 배터리 노화로 인한 내부 파라미터의 변화 및 성능의 감소의 지표로써, 배터리의 수명을 파악할 수 있는 대표요소이다. SOH는 용량과 펄스 파워(pulse power)로 정의되며 이는 각각 식(1), (2)와 같다.^[1] SOH의 경우 용량은 초기 용량 대비 80%라는 EOL(end of life) 기준이 있지만 저항에 대한 기준은 명확하지 않다. 일반적으로 용량기반 SOH 판단 방법이 일반적이며 SOH 추정 정확도가 저항기반 추정 방법 보다 상대적으로 높다는 특징을 갖고 있다.

$$SOH_{capacity} = \frac{C_{n_{current}} - C_{n_{aged}}}{C_{n_{Fresh}} - C_{n_{aged}}} \quad (1)$$

$$SOH_{pulse\ power} = \frac{P_{current} - P_{aged}}{P_{Fresh} - P_{aged}} \quad (2)$$

식 (1)의 $C_{n_{current}}$ 는 현재 용량, $C_{n_{aged}}$ 는 초기 대비 80%의 용량, $C_{n_{Fresh}}$ 는 초기 용량을 나타낸다. 식 (2)는 파워에 대한 식이며, 용량과 동일하다.

2.2 SOH 추정을 위한 전기적 특성 실험

본 논문에서는 고출력 어플리케이션의 운용 시 배터리 노화의 요소를 접목하기 위해 NCA계열 고출력 18650 원통형 셀을 사용하여 전기적 노화 실험(cycle life test)을 수행하였다. 배터리 셀이 운영되는 외기온도에 따라 전기적 특성이 민감하게 반응하기 때문에 외기 온도의 영향 제거의 목적과 단위 셀의 온도와 외기 온도를 동일하게 맞추기 위해 챔버 내부 온도를 상온(25°C)로 1시간 유지 후 전기적 노화 실험을 수행하였다. 전기적 노화 실험의 프로파일은 그림 1과 같으며 충전 상한 전압(4.2[V]), 방전 하한 전압(2.5[V])을 고려하였다. 만충과 만방을 1 사이클로 정의하며, 10사이클의 주기로 총 160사이클 실험을 수행하였다. 충전과 방전 전류는 1[C rate]로 동일하며, 충전의 경우 CC CV(constant current constant voltage), 방전의 경우 CC(constant current), 휴지 시간은 1시간을 적용하였다. 전기적 노화 실험에서 방전 용량(fully discharged capacity; C_n)은 SOC 100~0%까지의 방전 전류의 누적으로 산출되며, 내부 저항(ohmic resistance; R_i)은 SOC 100%에서 방전 전류 인가 시 순간적인 전압 강하에 옴의 법칙을 적용하여 계산된다.

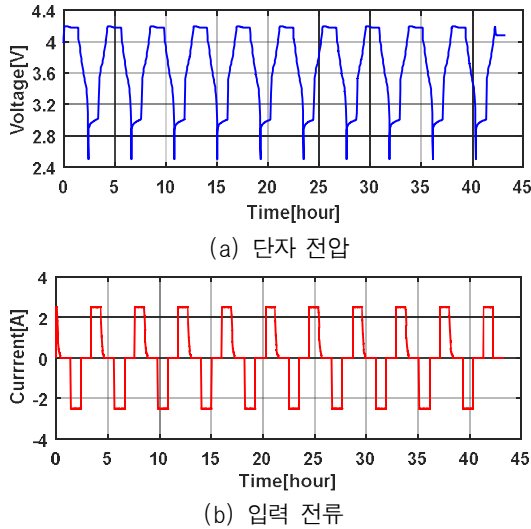


그림 1 전기적 노화 실험 프로파일
Fig. 1 cycle life test profile

2.3 전기적 특성 기반 배터리 내부 파라미터 분석

전기적 노화 실험을 통해 산출된 160 사이클의 방전 용량, 내부 저항을 그림 2에 나타내었다. 방전용량은 초기에 비해 0.24[Ah] 감소하였으며 내부 저항은 0.013[Ω] 증가하였다. 방전 용량과 내부 저항은 선형적으로 감소하거나 증가하는 경향을 보였다. 본 논문에서는 이를 통해 두 파라미터의 상관관계 및 인과관계를 확인하여 SOH 추정을 위해 통계적 분석 기반 회귀 분석을 수행하였다.

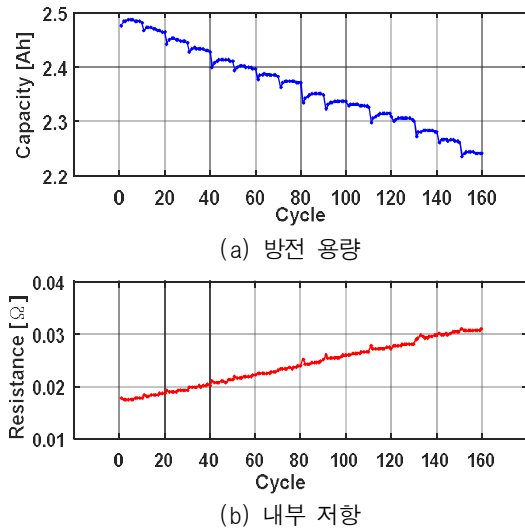


그림 2 전기적 노화 실험의 결과
Fig. 2 Cycle life test result

3. 통계적 분석 기반 제안한 SOH 추정 기법

방전용량과 내부 저항이 단순선형회귀모형에 적용가능한지 여부를 판단하기 위해 관계성을 확인하는 상관 분석을 우선적으로 적용해야한다. 선형적 관계가 있다면 회귀분석을 통해 단순선형회귀모형을 모델링할 수 있다. 본 논문에서는 전기적 노화 실험을 통해 산출된 방전 용량과 내부 저항을 적용하여 상관 분석을 수행하여 선형적 관계를 확인하고, 이에 따라 회귀 분석을 수행하였으며 두 변수의 인과 관계를 표현하는 단순선

형회귀모형을 모델링하였다.

3.2 상관 분석

상관 분석이란 두 변수사이에 어떠한 선형적인 관계를 가지고 있는지 분석하는 통계적인 방법으로, 서로 독립적인 두 변수 간의 관계를 파악하여 회귀 분석에 접목시킬 수 있는지를 확인하는 사전 분석 기법이다. 두 변수간의 선형 관련성의 정도를 나타내는 척도로 상관 계수를 사용한다. 상관 계수(γ)는 -1~1의 범위를 가지며 |1|에 근접할수록 선형적 관계의 정도가 높음을 의미한다.^[2] 그림 3은 전기적 노화 실험을 통해 추출된 방전 용량 및 내부 저항의 상관관계를 나타내며, 상관 계수가 0.98로 두 변수사이에 음의 상관관계를 가지고 있음을 의미한다. 상관 분석에는 두 변수사이에 관계의 정도만을 확인할 수 있으며, 상관 계수의 크기로 인과관계를 설명할 수 없다.

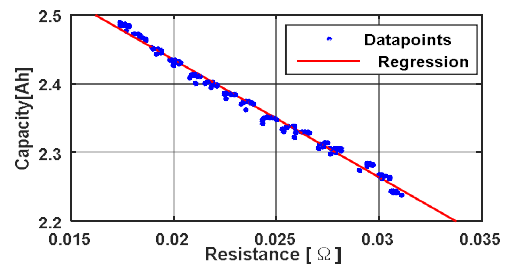


그림 3 방전 용량 및 내부 저항의 상관관계
Fig. 3 Correlation between discharged capacity and internal resistance

3.3 단순 선형 회귀 모형

단순회귀분석은 두 변수 사이의 관계를 알아보기 위한 통계적 분석 방법이며, 독립 변수에 의해 종속 변수를 예측하거나 두 변수 사이의 인과관계를 나타낼 수 있다. 식 (3)은 모집단에 대한 단순선형회귀모형을 나타내고 x_i 의 독립변수가 y_i 의 종속 변수에 주는 영향력을 나타낸다. 회귀 계수(β_0, β_1), 오차항(ϵ)로 구성되며 오차항은 평균이 0, 표준편차가 σ 라고 가정한다. 식 (3)을 통해 전체 모집단의 회귀선을 구할 수 없기 때문에 식 (4)의 적합회귀선 식을 사용한다. 적합 회귀선은 표본으로부터 얻은 선형 회귀선을 의미하며, 잔차(e_i)는 적합회귀선과 실제 데이터의 차이를 나타낸다. x 와 y 의 관계를 표현하는 최적의 직선을 나타내기 위해 최소 제곱법을 사용하여 회귀 계수를 산출하였다. 식 (4)~(8)는 최소 제곱법을 나타내며, 잔차 제곱의 합(sum of squares of the errors; SSE)이 최소가 되는 회귀 계수를 산출하는 방법이다. 최소 제곱법을 적용하여 산출된 회귀계수는 식 (9), (10)에 의해 산출된다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (5)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i)^2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(SSE)}{\partial \hat{\beta}_0} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(SSE)}{\partial \hat{\beta}_1} = 0 \quad (8)$$

$$\hat{\beta}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (9)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (10)$$

3.4 통계적 기법을 적용한 SOH 추정 기법

실제 전력구동 어플리케이션은 충·방전이 반복되지만, SOC 100~0%까지 충·방전을 하지 않는다면 현재 용량을 산출함에 있어 어려움이 있다. 또한 방전 용량의 변화가 급격하게 발생하면 SOH도 동일하게 급격한 변화가 예상된다. 본 논문에서는 배터리 노화와 관련된 용량과 내부 저항의 관계를 통해 단순 선형 회귀 모델을 설계하고 이를 집묵한 SOH 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 상관 분석을 통해 두 파라미터간의 선형적인 관계를 파악하고 회귀 분석을 적용하여 독립 변수(내부 저항)에 따라 종속 변수(방전 용량)에 영향을 미치는 단순 선형 회귀 모델을 설계하였다. 이 회귀 모델은 내부 저항과 용량의 관계를 수식으로 표현하고 있으며, 두 파라미터사이의 선형적인 관계를 나타냄에 따라 SOC 100~0%까지 방전 용량을 측정하지 않아도 내부 저항으로 용량을 추정할 수 있다. SOH 추정 시 방전 용량과 내부 저항을 모두 고려하여 방전 용량의 급격한 변화가 있을 때 내부 저항으로 SOH를 추정하는 기법을 제안한다.

3.5 제안한 SOH 추정 기법 검증

전기적 노화 실험을 통해 산출된 내부 저항과 방전 용량의 단순선형회귀모형에 따라 추정된 선형회귀계수를 식(4)에 적용하여 내부 저항(R_i)에 따른 방전 용량(\hat{C}_n)의 관계를 식 (11)에 나타내었다.

$$\hat{C}_n = 2.777 - 17.109(R_i)_i \quad (11)$$

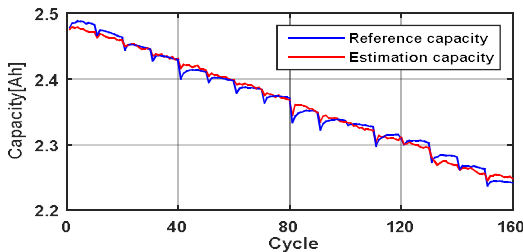


그림 4 실제 용량과 회귀모형을 통해 추정 용량
Fig. 4 Reference capacity and estimation capacity

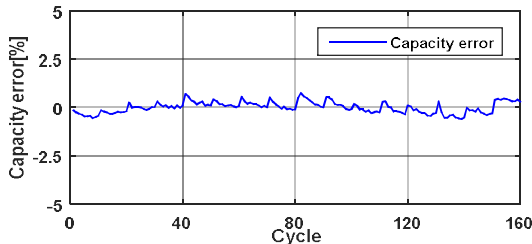


그림 5 실제 용량과 회귀모형을 통해 추정된 용량의 오차
Fig. 5 Reference capacity and estimation capacity(error)

그림 4와 그림 5는 단순 선형 회귀 모델을 사용하여 저항을 통해 추정된 방전 용량과 실제 방전 용량 및 오차를 나타내며 추정 오차는 $\pm 1\%$ 이다. SOC 100~0%까지 오프라인으로 방전 용량을 측정하지 않아도 내부 저항으로 용량 추정이 가능함을 의미한다. 제안한 SOH 추정 기법은 방전 용량이 급격한 변화가 있을 시 회귀 모형 기반 내부 저항을 통해 SOH를 추정한다. 이의 결과는 그림 6에 나타내었다. 방전 용량의 SOH와 방전 용량과 내부 저항의 단순선형회귀모형을 적용한 SOH를 비교한 그림이다. 급격한 방전 용량의 변화를 회귀모형에 반영하여 SOH 추정을 수행하였으며, 용량만의 SOH와 비교 시 최대 3.4%의 급격한 SOH의 변화를 줄일 수 있다.

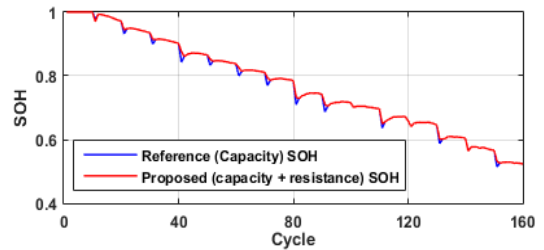


그림 6 방전 용량의 SOH와 제안된 SOH 비교
Fig. 6 Reference SOH and proposed SOH

4. 결론

본 논문에서는 고출력 리튬이온 18650 셀에 전기적 노화 실험(cycle life test)을 적용하여 상온 25도와 160사이클의 전기적 특성 기반 내부 파라미터인 방전 용량과 내부 저항을 추출하였다. 통계적 기법인 상관 분석을 통해 추출된 두 파라미터의 선형적인 관계를 파악하고 회귀 분석을 통해 단순선형회귀모형(simple linear regression model)을 모델링하였다. 단순선형회귀모형은 내부 저항을 통해 방전 용량의 추정이 가능하다. 방전 용량의 급격한 변화나 오프라인 기반 방전용량을 측정함에 어려움이 있는 경우 단순선형회귀모형에 따라 용량을 추정하여 SOH를 보정하는 기법을 제안하였으며 실제 용량과 추정된 용량은 $\pm 1\%$ 내의 오차를 보였다. SOH 추정을 위해 추출한 파라미터는 온도에 민감하게 반응하므로 향후 고온과 저온의 파라미터를 사용하여 SOH의 추정 성능을 검증이 필요할 것으로 예상된다.

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업의 연구비지원 (17TLRP C135446 01, 택배차량용 디젤 트럭의 하이브리드 개조기술 개발 및 실용화)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] J. H. Kim, S. J. Lee, B. H. Cho, "The State of Charge Estimation of Aged Batteries Using Per Unit System and Time Constant," Power Electronics Annual Conference, pp. 500~502, July, 2009.
- [2] P. Y. Lee, C. O. Yoon, J. H. Kim and S. S. Jang, "Analysis of the parameter change of high power lithium ion battery according to vibration test based on statistical analysis," Power Electronics Annual Conference, , pp. 453~454, Jul, 2017.