

에너지 저장 장치를 위한 충전 미소용량과 방전 용량의 회귀 모형을 적용한 SOC 추정 기법

이평연*, 이성준**, 송현철***, 김종훈*
 충남대학교*, 조선대학교**, 한화지상방산***

SOC estimation method based on linear regression model of charged incremental capacity and discharge capacity for energy storage system

Pyeong-Yeon Lee*, Seong-Jun Lee*, Hyeon-Cheol Song***, Jonghoon Kim*
 Chungnam National University*, Chosun University**, Hanwha land system**

ABSTRACT

에너지 저장 장치에서 배터리의 효율적인 운용과 정확한 SOC 모니터링을 위해 배터리 노화 시 충전 미소용량과 방전 용량의 회귀 모형 기반 배터리 방전 용량의 갱신을 통해 SOC 추정 기법을 제안한다. 본 논문에서는 전기적 노화 실험을 수행하였고, 충전 시 특정 전압 영역의 충전 미소 용량과 방전 용량을 산출하여 미소용량과 방전용량의 상관관계를 확인하였고, 이를 통해 회귀모형을 모델링하였다. 모델링된 선형회귀모형을 적용하여 노화에 따른 SOC의 정확도를 향상시켰으며, 이의 검증을 수행하였다.

1. 서 론

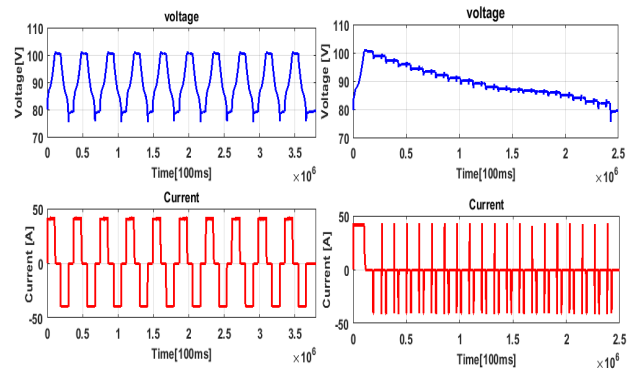
에너지 저장 장치(energy storage system :ESS)는 전력 공급 안정화, 전력 품질 향상, 전력 사고를 대비하기 위한 목적으로 다양한 분야에 사용하기 위해 활발한 연구가 진행되고 있으며, 신재생 에너지와 연계한 에너지 저장 장치의 수요가 증가하고 있다. 에너지 저장 장치의 효율적인 운용을 위해 배터리의 충전 상태(state of charge ;SOC)와 배터리의 수명(state of health; SOH)에 대한 정확한 모니터링이 필요하다. 사용가능한 SOC의 운용 범위와 배터리 수명의 정보가 불확실하다면, 어플리케이션 운용 시 신뢰성 있는 안전 여유(safety margin)를 확보할 수 없고, 배터리의 최대한의 용량을 사용할 수 없기 때문에 배터리의 운용범위를 제한하게 된다^[1]. 또한, 실제 어플리케이션 운용 시 충전과 방전이 빈번하게 반복되기 때문에 배터리의 용량을 산출에 어려움이 있다.

본 논문에서는 고용량 리튬이온 배터리팩의 노화에 대한 영향을 고려하기 위해 전기적 노화 실험(cycle life test)을 수행하였으며, 이를 통해 특정 충전 영역의 미소용량과 방전 용량의 상관관계를 확인하였다. 상관관계가 있는 두 용량에 대한 회귀모형을 모델링하였고, 노화에 따른 정확한 SOC 추정을 위해 특정 전압 영역의 충전 미소용량과 방전용량의 회귀모형 기반 SOC 추정 기법을 제안하였다.

2. 충전 미소용량과 방전 전체 용량 산출을 위한 전기적 노화 실험 및 내부 파라미터 분석

2.1 전기적 노화 실험 조건

노화 영향에 따른 배터리팩의 충전 미소용량과 방전 전체 용량의 상관관계를 확인하기 위해 NMC 계열 고용량 리튬이온 각종 배터리팩의 전기적 노화 실험을 수행하였다. 전기적 노화 실험은 만충 (fully charge)과 만방 (fully discharge)의 사이클로 구성되어있다. 충전 조건은 정전류-정전압 (constant current - constant voltage ;CC-CV), 방전 조건은 정전류 (constant current ;CC)로 수행하였다. 충전과 방전의 절차가 변경 시 휴지 시간을 적용하였고, 휴지 시간은 2시간으로 설정하였다. 그림 1의 (a)는 충전과 방전이 1주기로 총 10주기의 전기적 노화 실험의 프로파일을 나타내고, 그림 1의 (b)는 10주기마다 배터리팩의 내부 파라미터의 변화를 확인하고 각 SOC별 추정 성능을 검증하기 위해 SOC 5%별 HPPC (hybrid pulse power characterization)을 나타낸다^[2]. 배터리는 운용 온도에 민감하기 때문에 배터리에 영향을 미치는 변수인 외기 온도의 영향을 제거하기 위해 항온항습챔버를 사용하였다. 초기 실험에서 외기온도와 단위 셀의 온도를 동일하게 유지하기 위해 안정화 시간은 상온 25°C에서 6시간 이상 적용하였다.



(a) 노화 실험 (b) OCV-HPPC 실험

그림 1 전기적 노화 실험 프로파일

Fig. 1 Electrical characterization test profile

2.2 전기적 특성 기반 배터리 내부 파라미터 분석

고용량의 배터리는 용량에 의존적이며, 고출력 배터리는 저항에 의존하는 경향이 있다. 그림 2는 단자 전압 영역별 충전 전류의 누적으로 산출된 충전 미소 용량을 나타내며, 식 (1)에 의해 계산된다. 충전 상한 전압과 방전 하한 전압 사이의 전압 영역인 81.6~100.8V까지 2.4V 간격으로 1주기마다 충전 미소

용량을 산출하였다. 단자 전압의 영역을 확인하였을 때 86.4~88.8V의 영역에서 가장 많은 전류가 누적됨을 확인하였고, 배터리팩의 운용과 장기간 사용하기 위해 특정 전압 영역의 사용이 필수적이다. 그림 3은 50cycle 동안 측정된 방전 용량을 나타내고, 만충에서 만방까지의 전류의 누적을 의미하는 식 (2)에 의해 계산된다. 50cycle의 방전 용량을 초기 방전 용량과 비교하였으며, 약 0.6%의 용량의 감소가 발생했음을 확인하였다.

$$Cn_{incremental} = \int i_{charge} dt \quad (1)$$

$$Cn_{discharge} = \int i_{discharge} dt \quad (2)$$

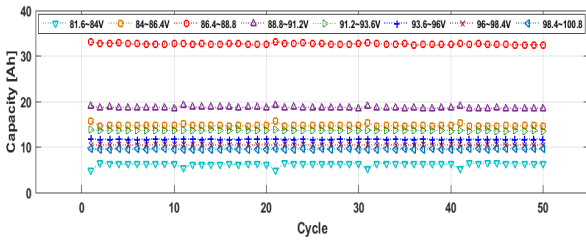


그림 2 전압 영역별 충전 미소 용량
Fig. 2 incremental capacity based on voltage area (charge)

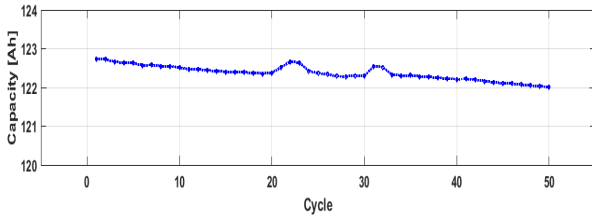


그림 3 실제 방전용량 (50cycle)
Fig. 3 Actual discharged capacity (50cycle)

3. 충전 미소용량과 방전 용량의 선형회귀모형 모델링을 위한 회귀분석

3.1 충전 미소용량과 방전 용량의 상관관계

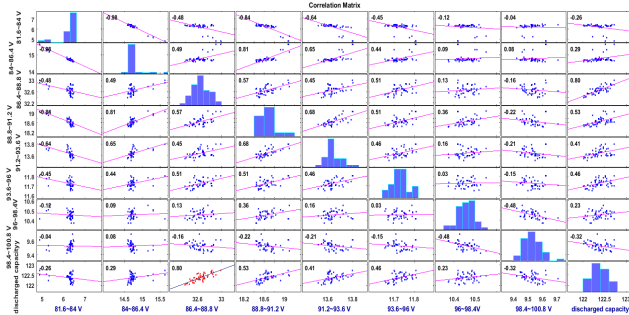


그림 4 충전 미소 용량과 방전 용량의 상관관계
Fig. 4 Correlation between incremental charged capacity and discharged capacity

본 논문에서는 고용량 어플리케이션의 정확한 SOC 모니터링과 실제 운용 시, 방전의 조건이 연속적으로 인가되는 것이

아니라 충·방전이 빈번하게 반복되기 때문에 특정 단자 전압 범위별 충전 미소용량과 방전 용량의 상관관계를 확인하였다. 그림 4는 전압 범위별 미소용량과 방전 용량의 관계를 나타내며, 그림 4의 내부 숫자는 상관관계의 정도를 나타내는 상관계수이다. 상관 계수(r)는 식 (3)에 의해서 계산되며 [1]에 근접할수록 두 변수 간 밀접한 상관관계가 있음을 의미한다^[3]. \bar{x} 는 충전 미소용량의 평균, \bar{y} 는 방전 용량의 평균을 의미한다. 충전 미소용량과 방전 용량의 상관관계가 가장 높은 86.4~88.8V에서의 충전 미소용량이 선정되었다.

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \times \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

상관관계로부터 선정된 단자 전압 86.4~88.8V의 영역에서의 충전 미소용량과 방전 용량과 회귀 분석을 수행하였다. 회귀 분석을 통해 데이터의 잔차(e_i) 제곱의 합이 가장 적은 적합 회귀선을 산출 할 수 있으며, 독립 변수(충전 미소용량)에 의해 종속 변수(방전 용량)의 예측이 가능하다^[3]. 적합 회귀선은 식 (4)과 같으며, 모든 데이터를 대표하는 회귀선인 모 회귀선을 구할 수 없기 때문에 측정된 데이터로부터 모델링된다.

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

식 (5)은 잔차(e_i)이고 이는 측정된 데이터를 이용하는 적합 회귀선(\hat{y}_i)과 실제 데이터(y_i)의 차이를 의미한다.

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

식 (6)은 잔차 제곱의 합(sum of square errors ;SSE)을 나타내며, 최소 제곱법을 이용하여 회귀 계수를 산출하는 방법이다. 식 (6)의 편미분을 통해 잔차 제곱의 합이 최소가 되는 회귀 계수($\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$)를 산출할 수 있다.

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

식 (6)을 통해 산출된 회귀 계수를 식 (4)에 대입하여 회귀 모형을 모델링하였고, 모델링된 회귀 모형은 식 (7)과 같다. 이 회귀 모형은 통계적으로 유의미하며, 특정 전압 영역에서 산출된 충전 미소용량을 통해 방전 용량을 추정 할 수 있음을 의미한다.

$$\hat{y} = 86.25 + 1.11x \quad (7)$$

$$\hat{Cn}_{discharged} = 86.25 + 1.11 Cn_{incremental}$$

식 (7)을 통해 산출된 특정 전압 범위에서의 충전 미소용량으로 추정된 방전 용량을 그림 4에 나타내었으며, 오차는 그림 5와 같다. 실제 방전 용량과 추정된 방전 용량의 오차는 $\pm 0.3\%$ 이내이며, 이의 방전 용량을 적용하여 노화된 고출력 리튬이온 배터리팩의 SOC 추정 및 단자 전압 추정의 오차를 확인하고 이를 검증하였다.

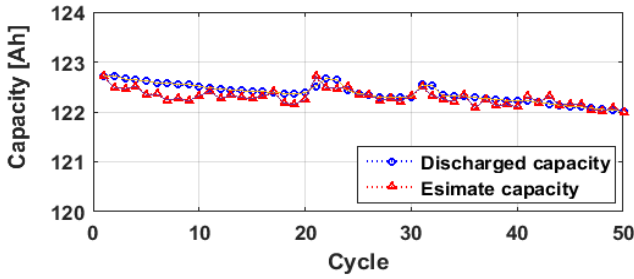


그림 5 회귀 모형의 추정 결과

Fig. 5 Estimation result of regression model

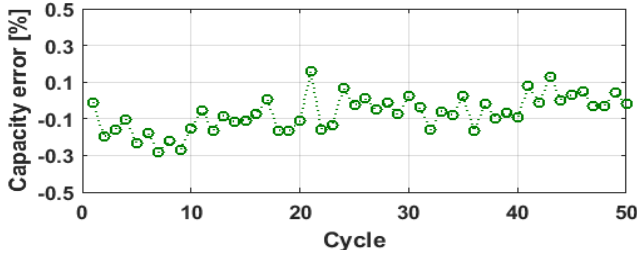


그림 6 회귀 모형의 추정 오차

Fig. 6 Estimation error of regression model

4. 제안된 회귀모형 기반 SOC 추정 기법

본 논문은 회귀분석을 통해 모델링된 특정 전압 영역의 충전 미소용량과 방전 용량의 회귀 모형을 전류적산법에 접목한 SOC 추정 기법을 제안한다. SOC 추정 기법으로는 전류적산법을 사용하였으며, 전류적산법은 식 (8)과 같다. SOC는 현재의 SOC, SOC_0 는 이전 SOC, C_n 은 방전 용량을 의미한다. 회귀 모형을 사용하여 충전 시 특정 전압 영역에서 충전 전류가 인가되어 미소용량이 계산되면 C_n 의 방전 용량을 갱신하여 SOC를 추정한다.

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_n} \int idt \quad (8)$$

5. 제안된 회귀모형 기반 SOC 추정 검증 결과

제안된 회귀 모형 기반 SOC 및 전압 추정을 위해 전기적 등가회로 모델을 사용하여 SOC 및 단자 전압의 검증을 진행하였다. 노화된 배터리의 데이터에 추출된 방전 용량을 레퍼런스 값으로 설정하였다. 노화를 반영하지 못한 방전 용량을 적용한 경우와 제안된 회귀 모형을 통해 추정된 용량을 적용한 경우로 비교 검증을 수행하였다. 이의 결과는 그림 7과 같으며, 그림 8에 두 경우의 오차를 나타내었다. 단자 전압의 경우 실제 전압 값을 레퍼런스 값으로 설정하였으며, SOC의 경우 실제 용량 값을 대입한 SOC를 레퍼런스 값으로 설정하였다.

노화가 반영된 회귀 모형에서 상대적으로 오차가 적음을 확인할 수 있으며, 배터리 등가회로 모델을 통해 추정되는 단자 전압도 SOC-OCV의 함수를 사용하여 계산되기 때문에, 실제 단자 전압과 비교 시, 제안된 회귀모형을 사용한 전압 오차가 적음을 확인하였다. 제안된 회귀 모형을 사용한 SOC 추정 기법의 SOC 오차는 $\pm 1\%$ 이내에 있음을 확인하였으며, 단자 전압의 오차는 $\pm 1.5\%$ 이내에 있음을 검증하였다.

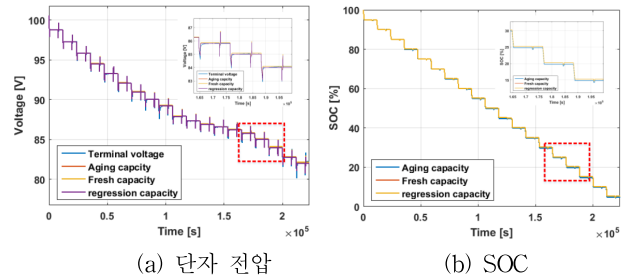


그림 7 회귀 모형 검증 결과

Fig. 7 Verification of regression model

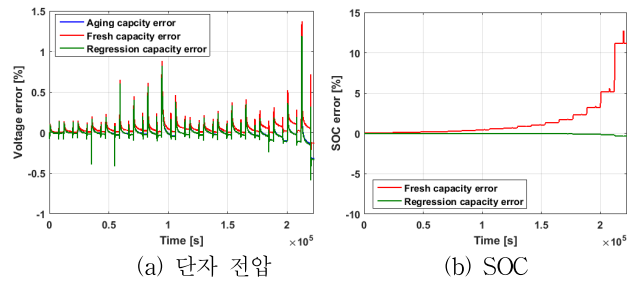


그림 8 회귀 모형 검증 오차

Fig. 8 Verification error of regression model

6. 결론

본 논문에서는 고용량 리튬이온 배터리팩을 사용하고, 전기적 노화 실험(cycle life test)을 수행하였다. 이의 실험을 통해 노화의 요소를 고려한 충전 시 특정 전압 영역에서의 미소 용량과 방전 시 방전 용량을 산출하였고, 산출된 두 개의 용량으로 회귀 모형을 모델링하였다. 추정된 방전 용량과 실제 방전 용량은 $\pm 0.3\%$ 의 오차를 가지고 있으며, 회귀 모형 기반 SOC 및 전압 추정의 성능을 psim으로 검증하였다. 노화된 배터리팩에 접목 시 정확한 SOC 추정이 가능함을 확인하였다. 향후 충·방전이 빈번한 프로파일에서 검증이 필요할 것으로 예상된다.

본 연구는 한화지상방산의 연구비 지원을 받아 수행된 연구에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Y. Wang, C. Zhang, Z. Chen, "A method for joint estimation of state-of-charge and available energy of LiFePO4 batteries," Applied Energy, vol 135, pp 81~87, Dec. 2014
- [2] J.h. Kim, S.J. Lee, J.M. Lee, B.H. Cho, "A new direct internal resistance and state of charge relationship for the li-ion battery pulse power estimation," The 7th international conference on power electronics, , pp 1173~1178, Oct. 2007
- [3] 이평연, 박진형, 윤창오, 김종훈, "고출력 리튬이온 배터리 에 적합한 단순선형회귀모형 기반 SOH 추정 기법.", 전력 전자학술대회논문집, , pp 246~248, 2018