

리튬이온 배터리의 신속 진단을 위한 노화에 따른 전기적 등가회로 모델 파라미터 분석 및 최적의 SOC 구간 선정

이재아*, 이상력*, 김종훈*

충남대학교 에너지저장변환연구실

Analysis of Electrical Equivalent Circuit Model Parameters According to Aging and Selection of Optimal SOC section for Rapid Diagnosis of Lithium-ion Batteries

Jaea Lee*, Sangryuk Lee*, Jonghoon Kim*

Energy Storage Conversion Lab., Chungnam National University*

ABSTRACT

본 논문에서는 신속 진단을 위한 노화에 따른 전기적 등가회로 모델 파라미터 분석 및 최적의 SOC(State-of-charge) 구간 선정을 진행하였다. 분석에는 NCM(Nickel-cobalt-manganese)을 양극재로 사용하는 니켈 계열의 3원계 배터리를 사용하였고, 충전과 방전을 반복하여 노화를 진행하였다. 전기적 특성 실험을 수행하여 SOC 5% 구간별 전기적 등가회로 모델 파라미터를 추출하였다. 추출한 파라미터들의 변화와 방전용량의 변화를 피어슨 상관 분석을 진행하여 방전용량의 변화에 따른 파라미터 변화의 상관관계를 분석하였다. 높은 경향성을 나타낸 구간은 SOC 40%로, 세 파라미터 모두 상관계수의 크기가 모두 0.95 이상으로 도출되었다.

1. 서 론

최근 화석연료 사용의 증가에 따른 기후 변화로 인해, 화석 연료를 다른 에너지로 대체하고자 하는 전 세계적 노력이 기울여지고 있다. 이러한 노력으로 인해 전기 자동차(Electric vehicle; EV)의 보급 및 수요가 급증하고 있으며, 전기 자동차의 주요 에너지원인 리튬이온 배터리(Lithium-ion battery; LIB)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 리튬이온 배터리는 사용 동안 충전과 방전이 필수적으로 진행된다. 따라서 노화가 발생하며, 노화가 진행됨에 따라 배터리의 용량 감소, 내부 저항 증가 등 노화에 따른 경향을 관찰할 수 있다. 배터리는 건강 상태(State-of-health; SOH)가 80% 이하로 감소하면, 노화가 충분히 진행되어 더는 사용할 수 없는 배터리로 분류된다^[1]. 노화에 따른 파라미터의 변화는 배터리의 충전 상태를 나타내는 지표인 SOC(State-of-charge)에 영향을 주므로 노화를 고려하지 않은 SOC 추정 은 어렵다.

배터리 내부 특성 파라미터 추출을 위한 전기적 등가회로 모델(Equivalent circuit model; ECM)은 저항과 커패시터와 같은 전기적 소자를 이용하여 배터리의 특성을 반영하여 설계한 전기 회로 모델이다. 전기적 등가회로 모델은 사용 애플리케이션 및 적용 프로파일에 따라 적절한 모델을 선정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 리튬이온 배터리의 노화에 따른 IRC-ladder 모델을 사용하고, 파라미터인 R_i , R_{diff} , C_{diff} 를 추출하였다. 이를 피어슨 상관 분석을 통해 상관계수를 산출하여 신속 진단을 위한 최적의 SOC 구간을 선정하였다.

2. 전기적 특성 실험 및 전기적 등가회로 모델링

2.1 배터리 용량 실험 및 충·방전 실험 구성

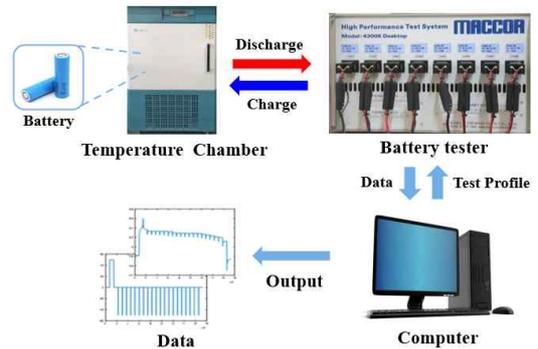


그림 1 배터리 용량 및 충·방전 실험 구성

Fig. 1 Battery capacity and charge/discharge experiment configuration

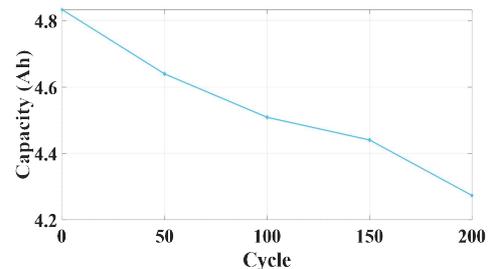


그림 2 노화 사이클에 따른 배터리 용량 변화

Fig. 2 Battery capacity changes according to aging cycle

본 연구에서는 NCM(Nickel-cobalt-manganese)을 양극재로 사용하는 배터리 셀을 사용하여, 상온 25°C 조건으로 설정된 챔버에서 정전류-정전압(Constant current-constant voltage; CC-CV) 충전과 정전류(Constant-current; CC) 방전을 200 사이클을 반복하여 열화 실험을 수행하였다. 또한, 배터리의 노화 경향성을 파악하기 위해 50 사이클마다 전기적 특성 실험을 진행하였다. 이를 위해 1C-rate의 전류 크기를 이용하였으며, 배터리의 SOC가 SOC 100%에서 0%에 도달할 때까지 5% 간격으로 방전 전류를 인가하여 실험을 진행하였다. 각 방전 후에는 배터리의 내부 안정성을 위한 휴지 시간을 두고 반복 방전을 진행하였다. 그림 2는 50 사이클 증가에 따른 노화로 인한 용량의 감소를 나타내었다.

3. 노화에 따른 파라미터 분석 및 구간 선정

3.1 노화에 따른 모델 파라미터 추출 및 분석

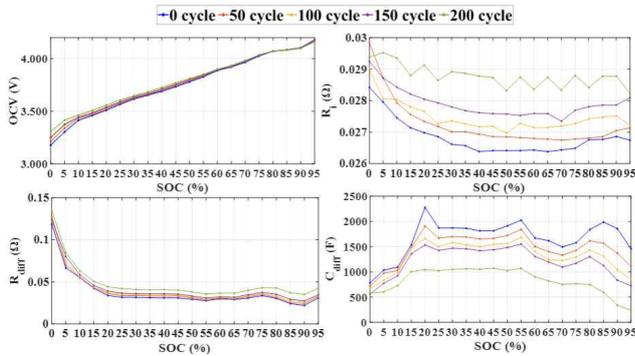


그림 3 노화 사이클에 따른 1RC-ladder 모델 파라미터 변화
Fig. 3 Changes in 1RC-ladder model parameters according to aging cycle

총 200 사이클의 충·방전을 통해 추출한 SOC 구간에 따른 내부 파라미터의 변화를 그림 3의 결과로 나타내었다. 노화가 진행될수록 내부 파라미터가 증가 혹은 감소의 경향을 띠며 변화하였다. R_i 와 R_{diff} 는 사이클 수가 증가할수록 저항의 크기가 증가하였으며, C_{diff} 의 경우는 앞선 파라미터들과 달리 노화 시 감소하는 특성을 확인하였다. 사이클에 따른 내부 저항의 증가는 배터리의 성능 상태의 저하 및 열폭주로 이어질 위험이 있다. 또한 배터리의 사용 가능한 용량이 감소하고, 사용 수명이 단축되는 것을 의미한다.

3.2 노화에 따른 파라미터 변화의 피어슨 상관 분석

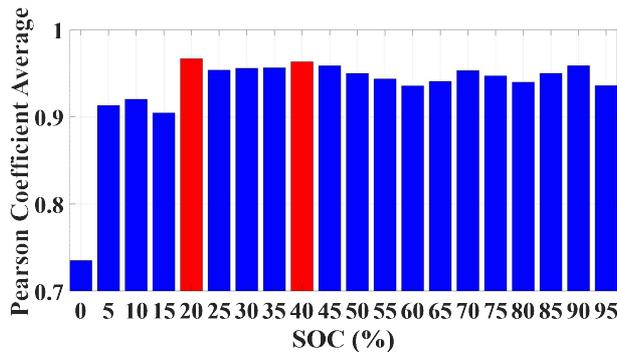


그림 4 노화에 따른 파라미터 변화 상관계수의 평균
Fig. 4 Average correlation coefficient of parameter change due to aging

그림 4는 방전용량 변화와 파라미터 변화의 피어슨 상관 분석을 통해 산출한 SOC 구간별 상관계수의 평균이다. 피어슨 상관 분석이란 두 변수 간 선형 관계를 분석하는 방법이다. 이때 두 변수 간 관계의 강도를 상관관계, 그리고 그 크기를 상관계수라고 한다. 식 (1)의 피어슨 상관계수 식으로, r 은 상관계수를, X_i, Y_i 는 n 개의 표본 중 i 번째 요소, \bar{X}, \bar{Y} 는 각 집단의 평균을 의미한다. 이때 상관계수의 크기는 -1에서 1 사이의 값을 가진다. 상관계수의 부호에 따라 양 혹은 음의 관계를 가지며, 상관계수의 크기가 0.9 이상이면 높은 상관성을 갖는다고 분석한다^[2]. 그림 4는 노화에 따른 파라미터의 상관계수 절댓값의 평균을 나타낸 그래프이다.

SOC 20%의 구간과 40% 구간에서 상관계수의 평균값이 0.9669, 0.9634로, 가장 높게 도출되었다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

3.2.1 최적의 SOC 구간 선정

표 1은 그림 4에서 얻어낸 구간별 파라미터 상관계수의 평균이 높게 도출된 SOC 20%, 40% 구간의 상관계수를 나타내었다. 도출된 상관계수의 평균값은 SOC 20% 구간이 SOC 40% 구간보다 0.035가 높았지만, 세 파라미터 모두에서 크기 0.95 이상의 높은 상관계수가 도출된 구간은 SOC 40% 구간이다. 이는 노화 즉, 방전용량 변화에 따른 파라미터의 변화 상관성이 높다는 것을 의미하며 노화에 따른 파라미터 분석에 최적인 SOC 구간은 40%이다.

표 1 SOC 20%와 SOC 40%에서의 노화에 따른 파라미터 변화의 상관계수

Table 1 Correlation coefficients of parameter changes with aging at SOC 20% and SOC 40%

	R_i	R_{diff}	C_{diff}
SOC 20%에서 상관계수	-0.9483	-0.9596	0.9929
SOC 40%에서 상관계수	-0.9560	-0.9639	0.9704

4. 결 론

본 논문에서는 1RC-ladder 모델을 기반으로 NCM 배터리의 노화에 따른 파라미터 추출을 진행하고, 이를 분석하여 SOC에 따른 사이클별 파라미터 변화를 나타내었다. 전기적 특성 실험을 통해 사이클별 방전용량의 변화를 얻었으며, 방전용량의 변화와 파라미터 변화의 피어슨 상관 분석을 통해 최적의 SOC 구간 선정을 수행하였다. SOC 40% 구간에서 방전용량 변화와 파라미터 변화와의 상관계수가 R_i 는 -0.9560, R_{diff} 는 -0.9639, C_{diff} 는 0.9704로 모두 크기 0.95 이상의 상관계수가 도출되었다. 따라서 방전용량의 변화에 따른 전기적 등가회로 모델 파라미터 분석에서 선정된 최적의 SOC 구간은 40% 구간이다.

본 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(No. 2022-1711152629, 대규모 분산 에너지 저장장치 인프라의 안전한 자율운영 및 성능 평가를 위한 지능형 SW 프레임 워크 개발)의 지원과 중소기업기술정보진흥원의 재원으로 민테크(S3344862, EIS 기반 배터리 진단 기능을 포함한 12V 차량 시동용 BMS 개발)의 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Juner Zhu, "End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries", Proceedings of Cell Reports Physical Science 2, Vol. 2, No. 8 pp.2, 2021.
- [2] Schober, P., "Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation", Proceedings of the Anesthesia & Analgesia, vol. 126, pp. 1785, 2018.