

리튬이온 배터리 셀의 SOC 예측을 위한 등가회로 모델에 관한 연구

고병찬*, 이중선¹, 유경상¹, 남양현¹, 김찬수¹, 윤승진¹, 김대진¹, 허상운², 김병기^{1*}

¹한국에너지기술연구원, ²신화-TEC

e-mail:bk_kim@kier.re.kr

A Study on Equivalent Circuit Model for State of Charge Estimation of Lithium-ion Battery Cells

Byoung-Chan Kho^{1*}, Joong-Seon Lee¹, Kyung-Sang Ryu¹, Yang-Hyun Nam¹, Chan-Soo Kim¹,
Seung-Jin Yoon¹, Dae-Jin Kim¹, Sang-Wn Heo² and Byungki Kim^{1*}

¹Korea Institute of Energy Research, Electric Power System Research Laboratory and ²Shinwa-TEC

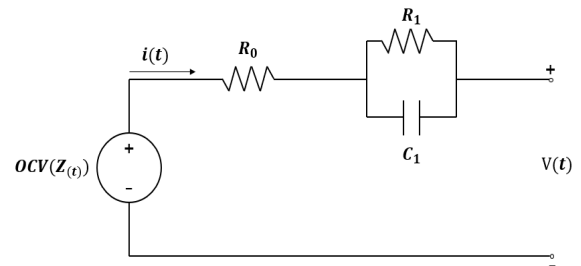
요약

배터리 관리 시스템(Battery Management System, BMS)은 배터리의 안정적 운영을 지원하며, 그 성능과 수명을 최적화하는 데 큰 역할을 한다. 특히, BMS의 중요 기능 중 하나는 배터리의 SOC(State of Charge)를 정확하게 예측하는 것이다. 따라서, 배터리의 상태와 성능에 대한 신뢰성을 확보하여, 안정적으로 운영하기 위해 본 논문에서는 비선형적 전압특성을 모의할 수 있는 테브난 등가회로 기반 리튬이온 배터리를 모델링을 제시하였다. 이 모델을 바탕으로 리튬이온 배터리 셀의 SOC를 평가할 수 있는 장비로 C-rate별 방전특성시험을 수행하였다. 시험 데이터를 통해 제시한 셀 모델로 열화 상태를 분석한 결과, 리튬이온 배터리의 Cycle 횟수가 증가할수록 충전가능용량의 변화하는 특성을 확인할 수 있었다.

1. 서론

재생가능 에너지 자원(Renewable Energy Sources)의 활용은 환경 문제 해결과 지속 가능한 에너지 공급의 필요성 때문에 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 그러나 재생가능 에너지 자원 발전의 불안정성이 큰 도전 과제로 대두되고 있다. 이러한 불안정성을 극복하고 안정적인 에너지 공급을 위해 전력 저장 시스템(Electric Energy Storage System, ESS)의 중요성이 강조되고 있다. ESS의 핵심 구성요소인 배터리 관리 시스템(Battery Management System, BMS)은 배터리의 안정적 운영을 지원하며, 그 성능과 수명을 최적화하는 데 큰 역할을 한다. 특히, BMS의 중요 기능 중 하나는 배터리의 SOC를 정확하게 예측하는 것이다. 그러므로, 배터리의 상태와 성능에 대한 신뢰성을 확보하여, 안정적으로 운영하기 위해 본 논문에서는 리튬이온 배터리를 테브난 등가회로화한 모델링을 제시하였다. 제시한 시험장비로 C-rate별 방전특성을 시험 결과, 배터리의 Cycle 횟수가 증가할수록 충전가능용량의 변화 특성을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 비선형적 전압특성을 모의할 수 있는 테브난 등가회로 기반 리튬이온 배터리의 모델을 제시한다. 구체적으로, 이 등가모델은 무부하 상태의 기전력을 의미하는 $OCV(Z(t))$, 회로에 흐르는 전류를 나타내는 $i(t)$, 배터리의 내부저항을 의미하는 R_0 로 전류와 전압간의 관계를 나타낸다. 배터리의 전압과 전류 사이의 비선형 관계를 나타내는 R_1 , 배터리의 동적 행동을 나타내는 C_1 은 시간에 따른 전압과 전류의 변화를 설명한다. 상기의 모델을 바탕으로 배터리의 출력특성은 시상수($\tau = R_1 C_1$) 특성에 의하여 휴지기 및 전압의 비선형성을 나타내게 된다.



[그림 1] 1차 RC 등가회로

2. 리튬이온 배터리 셀의 모델링

2.1 리튬이온 배터리 모델링

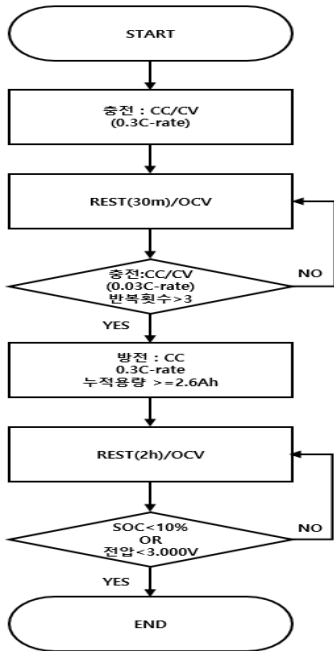
한편, 등가회로의 배터리 전압은 전압요소와 전류요소로 나타낼 수 있는데, 전압요소는 식 (1)과 같이 계산되고, 전류요소를 사용한 전압은 식 (2)와 같이 계산된다. 또한, 배터리의 전류는 식 (3)에 의하여 결정된다.

$$v(t) = OCV(z(t)) - v_{c1}(t) - i(t)R_0 \quad (1)$$

$$v(t) = OCV(z(t)) - R_1 i_{R_1}(t) - R_0 i(t) \quad (2)$$

$$i(t) = i_{R_1}(t) + R_1 C_1 \frac{di_{R_1}(t)}{dt} \quad (3)$$

그림 2는 파라미터 값을 산출하기 위해 진행한 배터리 공정의 알고리즘이다. 구체적으로 설명하면, 첫 번째 사이클(Cycle 1)의 충전 방식은 CC/CV(Constant Current/Constant Voltage)모드로, 충전 전류는 0.3C-rate(0.78A)로 산정한다. 배터리 셀의 안정화를 위해 30분의 휴지 이후 OCV 측정과 0.03C-rate(0.078A)의 전류로 3번의 후속 충전을 수행하여 셀의 최대 용량까지 충전을 진행한다. 두 번째 사이클(Cycle 2)의 방전은 CC방식을 사용하며, 방전 전류는 0.3C-rate(0.78A)이고, 방전 누적 용량이 2.6Ah에 도달하면 방전을 중지하고, 휴지시간 2시간 설정 후 OCV(Open Circuit Voltage)를 측정한다. 여기에서, 두 번째 사이클을 SOC<10% 이거나 V<3.000V가 될 때까지 반복 수행한다.



[그림 2] 배터리 실험 공정 과정

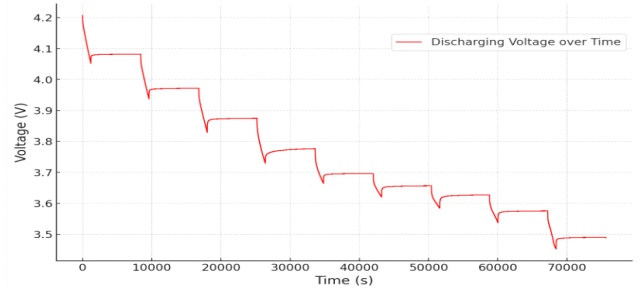
상기에서 적용된 배터리의 정격은 표 1과 같다.

[표 1] 배터리 정격사항

Item	Specification	
Cell Type	18650 B4 LIB Battery	
Nominal Capacity	Nominal	2600 mAh
	Minimum	2500 mAh
Nominal Voltage	3.6 V	
Standard Charging	Constant Current	0.5C (1250mA)
	Constant Voltage	4.2 V
Standard Discharging	Cut-off Current	50 mA
	Constant Current	0.2C(500mA)
	Cut-off Voltage	2.75 V

2.2 리튬이온 배터리 셀 데이터

그림 3은 그림 2의 알고리즘에 따라 3번의 후속 충전을 마친 전압 4.207V를 SOC 100%라고 가정하여 방전을 진행한 그래프이다.



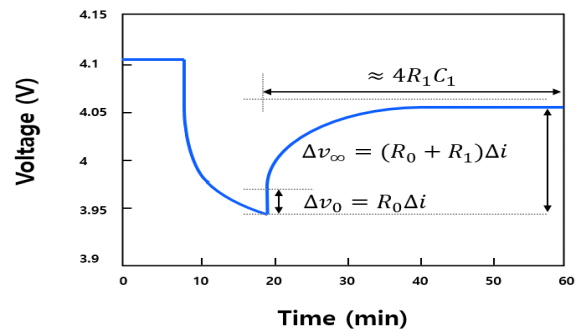
[그림 3] 배터리 방전 전압 그래프

본 논문에서는 기존 연구에서 제시된 방식을 이용하여 배터리 셀의 데이터를 산정하며, 이 산정방식을 나타내면 그림 4와 같다. 구체적으로, 전류 펄스의 적용 시 즉각적인 전압 상승은 식 (4)를 사용해 R_0 값을 산정하고 정상상태의 전압 변화는 식 (5)를 사용하여 R_1 값을 결정한다. 또한, 식 (6)을 사용하여 C_1 의 값을 산정한다.

$$\Delta v_0 = R_0 \Delta i \quad (4)$$

$$\Delta v_\infty = (R_0 + R_1) \Delta i \quad (5)$$

$$\Delta t = 4R_1 C_1 \quad (6)$$



[그림 4] 배터리 동작의 전기적 분석

따라서, 상기의 식을 통해 SOC 별 파라미터 값을 구한 결과는 표 2와 같다.

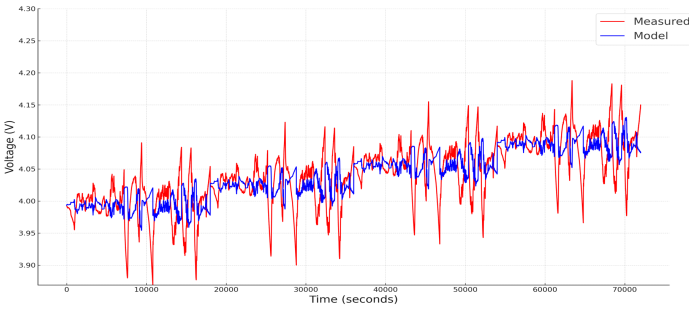
[표 2] 배터리 파라미터

Parameter	R_0 (m Ω)	R_1 (m Ω)	C_1 (kF)
Discharge Cycle			
SOC 90%	0.646349	0.863862	1237.76
SOC 80%	0.678571	1.118201	957.346
SOC 70%	0.800529	1.496772	700.176
SOC 60%	0.756667	1.709471	666.876
SOC 50%	0.735714	0.912698	1227.96
SOC 40%	0.787407	1.124021	910.798
SOC 30%	0.805608	1.463386	725.546
SOC 20%	0.841005	1.169471	933.974
SOC 10%	0.973069	1.038148	1030.45
Average	0.780546	1.210670	932.32

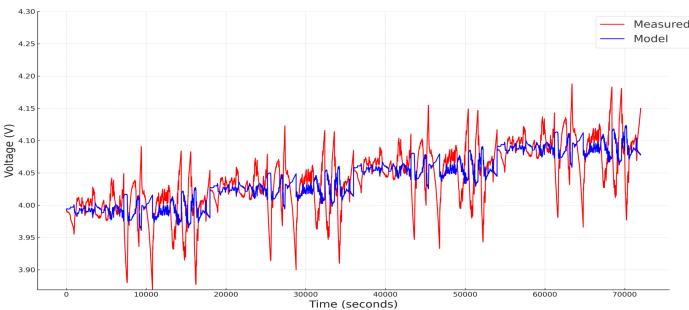
2.3 모델링 정확성 검증

SOC 80% 상태의 파라미터와 평균 파라미터를 적용하여 PV 패턴 데이터와 비교하였다. 비교 결과는 그림 5, 그림 6과 같다. 모델링 값과 PV 패턴 데이터의 정확성을 검증하기 위해 RMSE(Root Mean Square Error)를 활용했으며 RMSE 식은 (7)과 같다. 그림 5는 SOC80% 상태의 파라미터를 적용해 PV 패턴 데이터와 비교한 그림이며 RMSE의 값은 0.04329V이다. 그림 6은 평균 파라미터를 적용해 PV 패턴 데이터와 비교한 그림이며 이때, RMSE의 값은 0.04523V이다.

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=0}^n (V_{Measured}(t) - V_{Model}(t))^2} \quad (7)$$



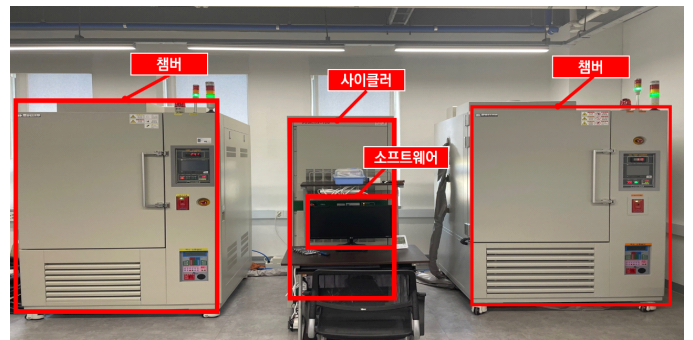
[그림 5] Comparing model to measured(SOC 80%)



[그림 6] Comparing model to measured(Average)

3. 셀 수명변화에 따른 변화된 모델 파라미터 추정을 위한 시험환경 구현

리튬이온 배터리 셀의 SOC 예측을 위한 시험환경은 그림 7과 같이 챔버와 전원공급장치를 중심으로 구성된다. 챔버는 내부 순환 시스템을 통해 전체 영역에서 25°C의 균일한 온도를 유지해 데이터의 정확성을 높였다. 전원공급장치는 2.5V ~ 4.2V까지의 전압 범위와, 최소 2.6A의 방전 전류 범위를 제공한다. 또한, CTS-Pro를 사용하여 챔버의 내부 센서로부터 받은 리튬이온 배터리의 전압, 전류, 용량, 등의 성능 파라미터들을 실시간으로 모니터링하여 테스트를 진행했다.



[그림 7] 챔버와 전원공급장치 및 소프트웨어 장비

4. 리튬이온 배터리 셀의 열화특성 시험 및 분석

4.1 시험 조건

열화 특성 시험에 사용된 리튬이온 배터리 셀의 정격사항은 표 1과 같으며 SOC 예측을 위해 100th Cycle ~ 1000th 동안 충·방전 특성시험을 수행하였다. 1 Cycle 기준 충·방전 C-rate는 0.2C, 0.5C, 0.7C이며 운영 조건은 표 3과 같다.

[표 3] 리튬이온 배터리 충·방전 조건

Type	Mode	V(V)	I(mA)		End
			0.2C	0.5C	
Charging	CC/CV	4.2	520	1300	100mA
			520	1300	
			1820	1820	
Rest	-	-	-	-	1min
Discharging	CC	2.5	520	1300	2.6V
			520	1300	
			1820	1820	
Rest	-	-	-	-	1min

4.2 열화 특성평가

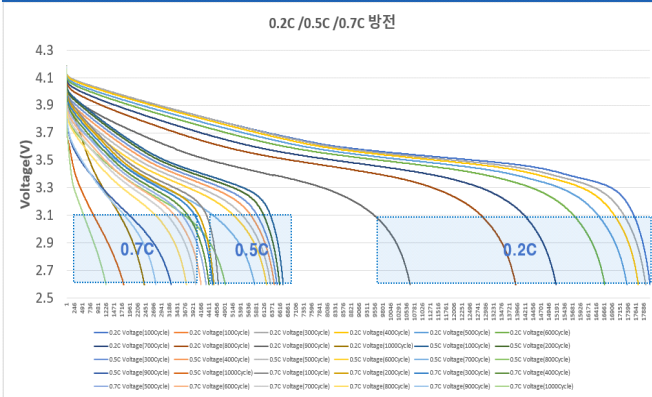
그림 8은 0.2C, 0.5C, 0.7C의 방전률을 기준으로 100Cycle마다 측정된 방전 전압 그래프이다. 전반적으로 Cycle의 수가 증가함에 따라 최저 전압에 도달하는 시간이 짧아지는 것을

확인할 수 있다. 초기 몇 백 Cycle 동안은 최저 전압에 도달시간의 큰 차이를 보이지 않지만 Cycle 수가 증가할수록 최저 전압 도달시간이 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있으며 이는 상대적으로 높은 C-rate와 반복된 충방전을 진행할수록 배터리의 수명이 큰 폭으로 짧아진다는 것을 의미한다. 그림 9는 0.2C, 0.5C, 0.7C, 1C의 방전률에 따른 배터리 용량의 변화를 나타내며 표 4는 그림 8에서 수행된 C-rate 별 방전용량을 의미한다. 표 4에 따라 0.2C-rate 대비 0.5C-rate에서는 약 4.59%의 감소가 있고 0.2C-rate 대비 0.7C-rate에서는 약 6.48%의 감소, 0.2C-rate 대비 1C-rate에서는 약 9.40%의 감소함을 확인하였다. 그림 10은 리튬이온 배터리 셀의 용량과 충·방전 사이클 간의 관계를 나타낸다. 충·방전 Cycle이 반복되고 높은 방전 전류일수록 배터리의 직렬 내부저항의 급격한 열화에 의해 잔존용량이 비선형적으로 감소하였다. 여기서, 배터리 셀 잔존용량의 80%(End of Life, EOL) 미만부터는 C-rate와 관계없이 급격한 용량의 감소특성을 보임을 알 수 있다.

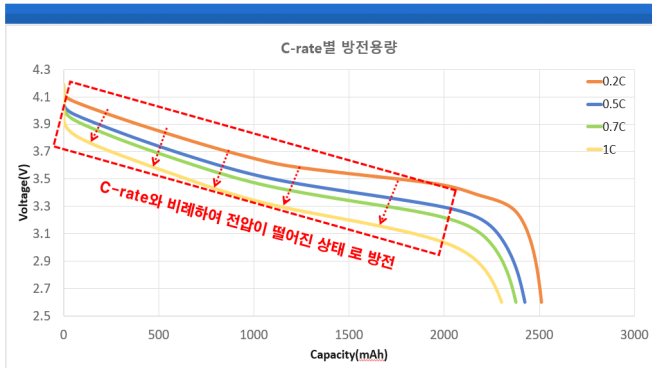
[표 4] 리튬이온 배터리 셀의 방전용량

I(mA)		Discharging Capacity (mAh)	Capacity reduction rate (0.2C)
0.2C	520	2525.47	-
0.5C	130	2409.52	4.59%
0.7C	1820	2361.90	6.48%
1C	2600	2288.09	9.40%

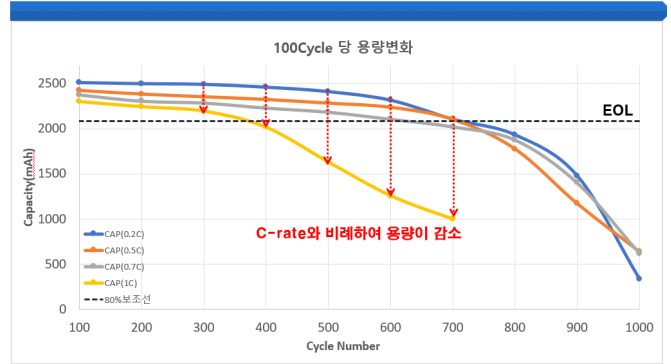
방전 그래프 (0.2C/ 0.5C/ 0.7)



[그림 8] 1000Cycle 운용에 따른 0.2C/0.5C/0.7C의 방전특성



[그림 9] 0.2C/0.5C/0.7C/1C의 방전 및 용량 변화 특성



[그림 10] C-rate 별 Cycle수와 방전 용량 변화 특성

5. 결 론

본 논문에서는 배터리의 SOC 예측을 위한 테브난 등가회로 기반 리튬이온 배터리 셀 모델링의 정확성 검증과 리튬이온 배터리 셀의 열화 특성에 대해 분석하였다. 테브난 등가회로를 기반으로 모델링의 정확성을 검증한 결과 RMSE의 값은 0.04329V, 0.04523V로 수치적인 차이는 근소한 반면 실제 배터리 동작과 모델 간의 불일치를 확인하였다. 테브난 등가회로만으로는 배터리의 비선형적인 특성을 완벽하게 반영하기 어려운 부분이 존재한다. 또한, 리튬이온 배터리 셀의 열화 특성에 있어 높은 C-rate의 방전 및 반복되는 충·방전 Cycle은 배터리의 충전가능 용량과 수명에 영향을 미침을 확인하였다. 추후의 연구에 있어 진보된 모델링 기법을 적용함과 동시에 셀의 열화 특성에 따른 변화된 배터리 모델 파라미터를 적용하여 정확한 배터리 모델을 개발할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원(KIER)의 기본사업(C3-2416-01)과 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No.20213030160080)

참고문헌

- [1] 이민행, 김지명, 노성은, 유경상, 김찬수, 노대석, “중대형 배터리의 형태에 따른 열화 패턴 분석에 관한 연구”, 2023
- [2] Wonhyuk Kwon, “Estimation of OCV and SOC for Lithium-Ion Batteries Using a Kalman Filter”, 2022
- [3] Gregory L. Plett, “Equivalent-Circuit Cell Models”, 2016