

전기차 사용후 배터리 내부저항 평가를 위한 배터리 셀의 등가회로 모델링에 관한 연구

정재범^{***}, 김지명^{*}, 김남현^{**}, 임민규^{***}, 노대석^{*}

^{*}한국기술교육대학교

^{**}한국산업기술시험원

e-mail:jjb@ktl.re.kr

Modeling for Equivalent Circuit of Battery Cell for Internal Resistance Evaluation of used EV Batteries

Jaе-Beom Jung^{***}, Ji-Myoung Kim^{*}, Nam-Hyun Kim^{**}, Min-Gyu Lim^{***}, Dae-Seok Rho^{*}

^{*}Korea University of Technology and Education

^{**}Korea Testing Laboratory

요약

최근, 국내외에서 전기자동차(electric vehicle, EV) 시장의 확대에 따라, 가까운 미래에 사용후 배터리(used battery)의 급격한 공급이 예상되고 있다. 이에 따라, 정부에서는 전기차 사용후 배터리 시장의 활성화를 위한 제도적 지원체계를 마련하고 있으며, 민간에서는 활용처 및 재사용(repurpose) 제품의 안전에 대한 다양한 연구와 개발이 진행되고 있다. 재사용은 통상 EV용 배터리를 에너지저장장치(energy storage system, ESS) 분야에서 활용되는 것이 일반적이며, 사용 환경에 따라 달라질 수 있는 배터리 특성과 최근 몇 년간 지속적으로 발생하고 있는 중대형 배터리 화재사고에 따라 사용후 배터리의 성능과 안전성을 확보할 수 있는 유효성 있는 평가 방안에 초점을 두고 다양한 연구가 진행되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 배터리 열화 진단에 일반적으로 사용되는 내부저항 검사의 동작 메커니즘을 제시하고, 이를 신속하게 측정하기 위해 방전을 기반 개방회로 전압(open circuit voltage, OCV) 산출 및 등가회로 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로, 중대형 배터리 셀의 1kHz 주파수의 교류 내부저항 측정법을 통해 모델링에 의한 시뮬레이션과 실제통 시험장치의 실측값을 비교한 결과 유사한 특성을 나타내어, 본 논문의 유효성을 확인할 수 있었다.

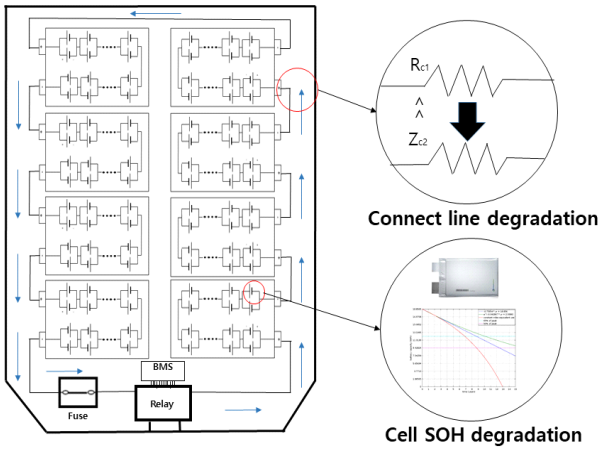
1. 서론

현재 국내외 전기차 시장이 급격하게 확장되고 있다. 전 세계 전기차 보급량은 2020년 600만대에서 2030년 전체 자동차 판매량의 27%인 2,600만대 규모로 성장이 예상되며, 국내 경우 2020년 누적 기준 약 9.3만대 규모에서 『2030년 국가로드맵』 기준 2030년 300만대로 확대할 예정이다. 따라서, 단기적으로 운용 중인 배터리의 현재 상태를 측정하고 성능 및 안전성을 예측하는 배터리 진단 수요가 증가할 것으로 예상되며, 장기적으로는 사용후 배터리와 같은 배터리 재사용 및 재활용을 위한 진단 수요가 증가할 것으로 예상된다.

따라서 본 논문에서는 1차 ladder RC 등가회로를 방전을 기반 개방회로전압(OCV, open circuit voltage) 및 임피던스 산정 및 matlab을 통해 상용화된 리튬이온배터리 셀의 등가회로를 모델링한다. 이후 배터리 셀의 등가회로 모델의 유효성을 1kHz 주파수의 교류 내부저항(AC IR) 측정법을 통해 측정된 실측값과 비교하여 확인한다.

2. 사용후 리튬이온배터리의 내부저항 특성

배터리의 내부저항은 일반적으로 배터리의 특성을 나타내는 주요 지표로 사용되고 있다. 즉, 배터리는 열화가 진행될수록 내부저항이 높아지게 되고, 줄열(Joule Heat)에 따른 에너지 손실과 방전 말단 전압(discharge termination voltage) 강하으로 인하여 배터리의 성능에 악영향을 끼칠 가능성이 있다. 또한, 배터리의 내부저항은 제조공정상 문제가 발생할 경우 값이 달라질 수 있어, 대부분의 배터리 제조공정에서 내부저항을 핵심적인 평가항목으로 적용하는 것이 일반적이다. 한편, 사용후 배터리의 내부저항 측정은 상기의 표준을 바탕으로 [그림 1]과 같이 배터리의 열화를 평가하기 위해 사용된다. 여기서, 배터리 열화는 크게 배터리 셀 자체의 열화와 접촉부 열화로 구분된다. 먼저, 셀의 열화는 셀 내부 리튬 이온의 이동에 따른 내부 화학적 변화에 기인하며, 높거나 낮은 주변 온도 및 고전류로 해당 열화가 가속될 수 있다.



[그림 1] 전기차 배터리의 열화 종류

한편, 접속부 열화는 배터리가 사용된 제품의 지속적인 진동·충격과 같은 물리적인 요인으로 발생할 수 있으며, 열화로 인해 높아진 임피던스에 따른 상승된 저항열이 배터리 셀에 영향을 미쳐 안전에 위해를 가할 수 있다. 또한, 접속부 열화에 의한 임피던스는 접속부의 리액턴스 성분을 포함하고 있어 측정 방법에 따라 변동될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 내부저항의 측정에 사용되는 AC IR 및 DC IR의 메커니즘을 분석하고, 이를 바탕으로 시험장치를 구현하여 사용 후 배터리의 성능과 안전성을 효과적이고 효율적으로 평가할 수 있는 방안을 제시한다.

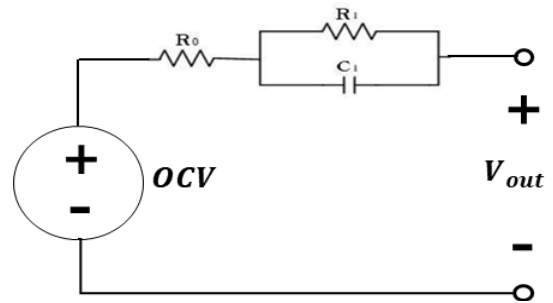
3. 리튬이온배터리 셀 등가회로 모델링

배터리 진단은 배터리의 비선형적 및 동적 특성을 반영하여 상태를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 해당 특성을 반영하기 위한 다양한 모델링 방법 개발 및 활용을 통해, SOC(state of charge) 및 SOH(state of health)와 같은 배터리 상태 지표의 정확성을 향상시킬 수 있다. 배터리의 성능을 추정하고 설계 반영을 위해 통상 전기화학적 모델, 수학적 모델, 등가회로 모델 등을 사용하고 있다[1]. 전기화학적 모델은 배터리 내부에서 일어나는 전기화학 반응을 분석한 방법을 통해 높은 정확도를 가지나 복잡한 방정식으로 구성되어 있다. 수학적 모델은 배터리의 비선형 특성과 동적 특성을 효과적으로 모사할 수 있도록 구성된 수식 형태로 전기화학 모델에 비해 단순하나, 배터리의 전기화학적 특성을 반영하기는 어렵다. 본 논문에서 다루는 등가회로 모델의 경우, 배터리를 전기회로로 치환하여 나타내며 배터리의 화학적 요소를 저항 및 커패시터 등의 전기회로 소자로 치환하는 방법을 사용한다. 등가회로 모델은 타 모델에 비해 시각적인 직관성이 높으며, 배터리의 상태 변화를 분석하고 추정하는 것이 용이하다. 이에 따라, 배터리의 열화(degradation)을 전기적 소자의 파라

미터에 반영하는 방법으로 널리 사용되고 있다. 다만, 배터리의 전기화학적 특성을 나타내는 정확도가 타 모델에 비해 낮아, 등가회로 모델 개선을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

3.1 등가회로 모델링 사례 분석

등가회로 모델은 전류 및 전압 특성을 반영하여 전기적 소자인 저항과 커패시터를 통해 모델링되며, linear model, Thevenin 등가회로 모델, RC ladder 모델 등이 있다.[1] 본 논문에서는 그림 2와 같이 1차 RC ladder 모델을 사용하여 등가회로를 모델링하고 이를 검증하기 위한 일련의 방법을 제안한다. 그림 2 내 전압원(voltage source)인 개방회로전압은 통상 전해질 이온의 평형상태 도달까지 휴지 후 측정하는 방식으로 측정이 진행되어왔다. 휴지 시간은 길게는 하루까지 가져가며 정확성을 높이기 위해 방전 후 반복 측정을 진행하기도 하여, SOC별 OCV table을 얻기 위해서 많은 시간이 소요되는 것이 일반적이다. 전기적 소자는 직렬저항인 R_0 , 확산저항인 R_1 , 확산 커패시터인 C_1 으로 구분된다. 직렬저항 R_0 은 배터리 내부의 도통 저항성분을 나타내며 전류 변화에 순간적으로 반응하는 특성을 나타낸다. 확산저항 R_1 과 확산 커패시터 C_1 은 배터리 내부 물질로 인한 전기화학적 반응 중 확산을 모사하기 위해 사용된다. 또한, 외부전압인 V_{out} 은 외부로 노출되어 있는 배터리 셀의 단자에서 측정되는 전압으로, 통상 개방회로전압을 추정하기 위해 실시간으로 측정되는 측정값이다.



[그림 2] 1차 RC Ladder 등가회로

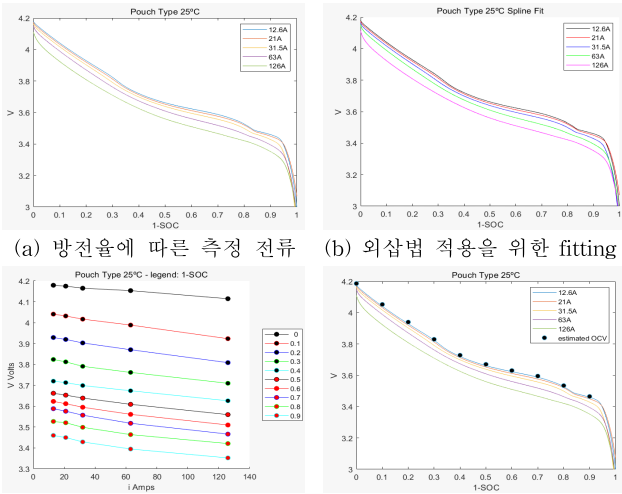
3.2 방전을 기반 등가회로 모델링

상기 언급한 바와 같이 1차 RC ladder 모델 내 개방회로전압을 추정하기 위해, 대부분 충전 혹은 방전 전류 차단 후 일정 휴지시간을 갖고 반복적으로 측정하는 것이 일반적이다. 해당 방법으로 개방회로전압을 측정할 경우, 휴지시간의 일관성 및 측정기기의 오차뿐만 아니라 장기간 시험시간이 소요되어 본 논문에서는 방전을 기반으로 개방회로전압을 추정하고, 이를 통해 임피던스를 추정하는 방식으로 등가회로 모델링을 수행한다.

3.3. 등가회로 시간변수 추정

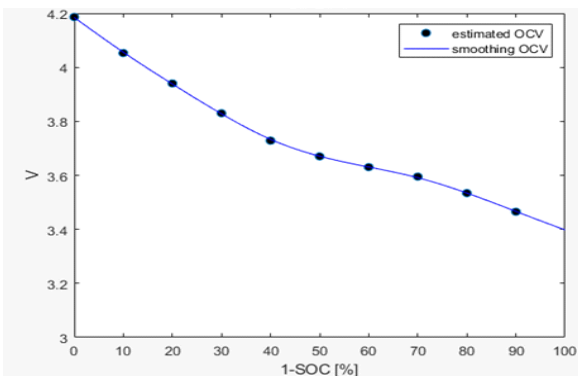
3.3.1 개방회로전압의 시간에 따른 변수 추정

본 논문에서는 기존 개방회로전압 측정방법과 다르게 그림 3(a)와 같이 정격용량 대비 0.2 I_{ta}, 0.33 I_{ta}, 0.5 I_{ta}, 1.0 I_{ta}, 2.0 I_{ta} 등 5가지 방전 전류를 적용한 Constant Current 방전시험 후 그림 3(b)와 같이 외삽법 적용을 위한 fitting을 적용하고, 그림 3(c)와 같이 외삽법 적용하여 OCV를 추정하고 그림 3(d)와 같이 SOC(%)-별 OCV 곡선을 추정한다. 이때, 각 SOC(%)는 전처리 시 측정된 시료의 방전용량 대비 10% 단위로 나누어 측정된 값을 기준으로 사용한다.



(a) 방전율에 따른 측정 전류 (b) 외삽법 적용을 위한 fitting
(c) 외삽법 적용 OCV 추정 (d) SOC별 OCV 곡선 추정
[그림 3] 방전을 기반 방전곡선의 외삽법을 이용한 OCV 추정

상기의 외삽법을 통해 결정된 SOC별 OCV 추정곡선은 그림 4와 같다. 이를 통해, 1차 RC ladder 등가회로 내 SOC 변수에 따른 전압 추정 및 선형적으로 연결하여 활용한다.

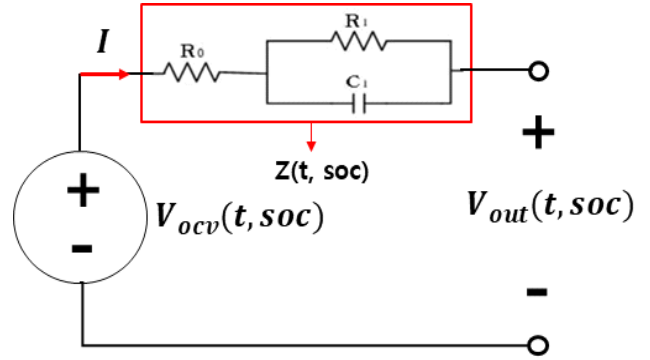


[그림 4] 외삽법을 이용한 OCV 추정곡선

3.3.2 임피던스의 시간에 따른 변수 추정

3.3.1절에서 진행한 시간 및 SOC에 따른 개방회로전압을 기반으로, 그림 3과 같이 해당 개방회로전압은 시간 및 SOC

에 따라 $V_{ocv}(t, soc)$ 로 추정하고, 배터리 셀 외부로 노출된 단자를 통해 측정된 전압 $V_{out}(t, soc)$ 와 측정 전류를 통해 시간에 따른 임피던스 $Z(t, soc)$ 를 추정한다. 이 때, 임피던스 $Z(t, soc)$ 는 직렬저항 R_0 , 확산저항 R_1 , 확산커패시터 C_1 의 시간변수를 포함한다.



[그림 5] 전류에 따른 시간변수를 고려한 등가회로

그림 5 내 등가회로 기준으로 합성임피던스 Z 를 식 (1)과 같이 유도할 수 있고, 식 (2)와 식 (3)과 같이 라플라스 변환을 통해 시간에 따른 임피던스 $Z(t)$ 를 유도하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

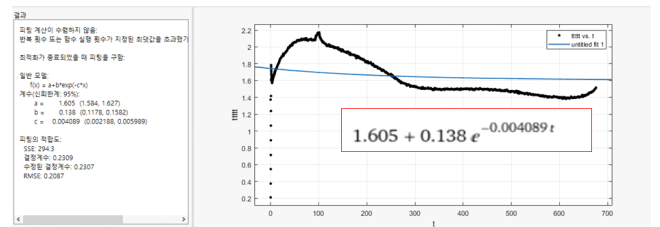
$$Z = \frac{R_0 + R_1 + j\omega R_0 R_1 C_1}{1 + j\omega R_1 C_1}, \quad j\omega = s \quad (1)$$

$$L^{-1}(Z) = L^{-1}\left[R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 s}\right] \quad (2)$$

$$L^{-1}[Z(t)] = R_0 \delta(t) + \frac{1}{C_1} e^{-\frac{1}{R_1 C_1} t} \quad (3)$$

$$Z(t) = R_0 + \frac{1}{C_1} e^{-\frac{1}{R_1 C_1} t} = A + B e^{-\alpha t} \quad (4)$$

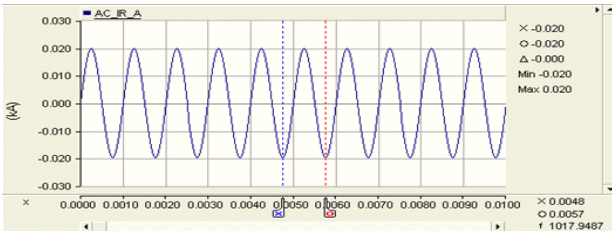
상기에서 추정된 임피던스 및 수식을 기준으로 실제 시험한 외부단락 시험결과를 시간에 따른 결과값 측정 후 matlab을 통해 유도하면 그림 6와 같다. 이에 따라, 식 (4)을 참고하여 유도값과 비교하면, 직렬저항 R_0 는 1.605 [mΩ], 확산저항 R_1 은 0.564 [μΩ], 확산커패시터 C_1 은 7.246 [mF]으로 추정할 수 있다.



[그림 6] 전류에 따른 시간변수를 고려한 등가회로

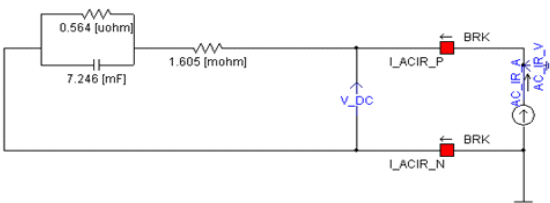
4. 시뮬레이션 및 결과 분석

상기에서 모델링한 등가회로에 대한 유효성 확인을 위해 배터리의 성능을 확인하는 대표적인 시험인 교류 저항시험을 통해 이를 검증한다. 이를 위해 국제표준에서 제안한 방법과 동일하게 peak 전압은 20mV 이하로 설정하고, 주파수는 1kHz를 적용한 결과는 그림 7과 같다.



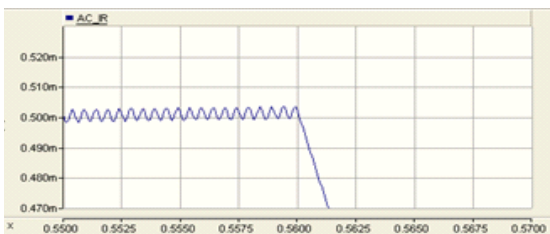
[그림 7] 등가회로 검증을 위한 전류 source 파형

상기에서 설정한 전류 source 및 등가회로를 반영하여 검증을 위한 배터리 셀 회로를 구성한 결과는 그림 8과 같다. 전류원에서 나오는 교류 전류를 인가하면서 양단 전압 측정하면서, 측정된 전압을 실시간 교류 전류로 나누는 방식으로 AC IR을 측정한다.



[그림 8] 배터리 셀 등가회로 검증을 위한 회로 구성

그림 8에 따라 검증 회로를 구성한 후 시뮬레이션을 수행하여 AC IR을 측정된 결과는 그림 9와 같다. 약 0.5 [mΩ] 부근에서 교류 전류의 oscillation에 따라 작은 폭으로 움직이는 것을 확인할 수 있다.



[그림 9] 등가회로 검증 회로에 따른 셀 a.c. 내부저항 측정값

시뮬레이션의 값을 검증하기 위해 배터리 셀의 실측값을 전처리 전류에 따라 측정된 결과는 표 1과 같다. 시료별로 0.45 ~ 0.53 [mΩ]로 시뮬레이션 측정값 0.5 [mΩ]와 차이가 없어 배터리 셀 등가회로의 유효성을 확인할 수 있다.

[표 1] 배터리 셀의 전처리 c-rate에 따른 a.c. 내부저항 측정값

C-rate	내부저항 측정값[mΩ]					
	시료#1		시료#2		시료#3	
	충전	방전	충전	방전	충전	방전
0.2 I _{ta}	0.53	0.53	0.57	0.51	0.46	0.47
0.33 I _{ta}	0.52	0.52	0.51	0.52	0.46	0.45
0.5 I _{ta}	0.53	0.53	0.51	0.51	0.47	0.47
1.0 I _{ta}	0.52	0.52	0.51	0.52	0.47	0.47
2.0 I _{ta}	0.53	0.53	0.52	0.52	0.48	0.45

5. 결 론

본 논문에서는 배터리 상태 추정을 위한 리튬이온배터리의 등가회로 모델링 사례를 분석하고, 5가지 c-rate을 적용한 constant current 방전시험으로 얻은 결과값을 기반으로, 외삽법을 통해 시간에 따른 개방회로전압을 추정한다. 이를 기반으로 상용화 중대형 배터리 셀의 1차 RC ladder 등가회로를 모델링하기 위해 시간에 따른 임피던스를 실측값 기준으로 matlab을 통해 fitting하여 각 전기적 소자의 값을 추정한다. 이후 국제표준 기반의 1kHz 주파수의 교류 내부저항 측정법을 통해 배터리 셀의 등가회로 모델의 유효성을 확인한 결과 실측값과 유사한 것을 확인하였다. 본 논문 내 시험 설계와 수행을 통해 제안한 외삽법을 통한 개방회로전압 추정 방법과 교류 내부저항을 이용한 등가회로 검증 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행 중인 ‘(2022940000050)사용후 배터리 팩단위 신속검사 장비 및 200kW급 병렬정밀검사 통합시스템 개발’ 과제의 일환으로 진행된 연구로서, 관계부처에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Jaegu Kim, “Enhanced Equivalent Circuit Modeling for Li-ion Battery Using Recursive Parameter Correction”, M.S. degree paper Sungkyunkwan University (2016), October, 2016
- [2] Seungwoo Kim, “Estimated Performance Analysis of SOC by Electric Equivalent Circuit Modeling Design of Battery Pack”, Power Electronics Conference, pp85-87, November. 2020
- [3] Jaebeom Jung, “A Study on Modelling for Equivalent Circuit of Li-ion Battery according to Estimation of OCV based on Discharge C-Rate”, Korea Academia-Industrial cooperation Society 2022 fall conference, pp235-238, October 2022