전기자동차용 사용후 배터리의 AC IR법 모델링에 의한 열화 특성에 관한 연구

정재범*,**, 김지명*, 태동현*, 임민규*, 노대석*
*한국기술교육대학교
**한국산업기술시험원
e-mail:jjb@ktl.re.kr

A Study on Degradation Characteristics of Used EV Batteries using AC IR Modeling

Jae-Beom Jung*,**, Ji-Myoung Kim*, Dong-Hyun Tae*, Min-Gyu Lim*, Dae-Seok Rho*
*Korea University of Technology and Education
**Korea Testing Laboratory

요 약

전 세계적인 전기자동차(EV, electric vehicle) 및 에너지저장장치(ESS, energy storage system) 시장의 확대에 따라, 국내 외에서 사용 중인 배터리 및 사용후 배터리의 성능과 안전성을 측정하고 예측하는 배터리 진단기술이 요구되고 있다. 특히, 정부에서는 늘어나는 전기자동차용 폐배터리에 대한 대책으로 재활용 확대를 위한 지속적인 지원체계를 마련하고 있으며, 전기자동차 폐배터리를 에너지저장장치 분야로 재사용하는 방안이 가장 유력한 대안으로 떠오르고 있다. 하지만 사용 환경에 따라 달라질 수 있는 배터리 특성과 최근 몇 년간 지속적으로 발생하고 있는 중대형 배터리 사고 상황에 따라, 사용후 배터리 상태를 정확하게 진단할 수 있는 다양한 방안이 요구되고 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 배터리의 열화 상태 추정을 위한 리튬이온배터리의 등가회로를 제안하고, 방전율 기반 개방회로 전압을 추정하여 시간 및 충전율에 따른 상용화 중대형 배터리 셀의 1차 RC ladder 등가회로 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, AC IR법을 이용한 리튬이온배터리의 SOC 및 SOH에 따른 열화 특성을 분석한 결과, 시뮬레이션과 실측값의 차이가 거의 발생하지 않아 본 논문의 유효성을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

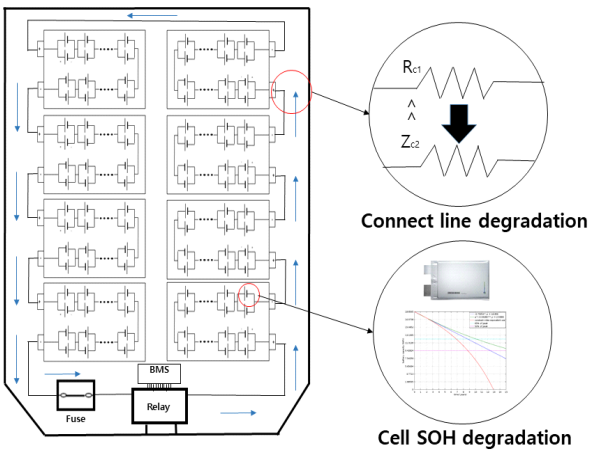
현재 국내외 전기자동차 시장이 급격하게 확장되고 있다. 전 세계 전기자동차 보급량은 2020년 600만대에서 2030년 전체 자동차 판매량의 27%인 2,600만대 규모로 성장이 예상되며, 국내의 경우 2020년 누적 기준 약 9.3만대 규모에서 『2030년 국가로드맵』 기준 2030년 300만대로 확대할 예정이다. 따라서, 단기적으로 운용 중인 배터리의 현재 상태를 측정하고 성능 및 안전성을 예측하는 배터리 진단 수요가 증가할 것으로 예상되며, 장기적으로는 사용후 배터리와 같은 배터리 재사용 및 재활용을 위한 진단 수요가 증가할 것으로 예상된다. 한편, 사용후 배터리는 운용환경 및 사용자에 따라 달라지는 배터리의 열화 특성으로 인해 전수검사가 필수로 요구되며, 전수검사 시간의 감소를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 즉, 비교적 신속한 검사 특성을 갖는 내부저항 측정 방법을 이용하여, 사용후 배터리의 성능과 안전성에 영향을 줄 수 있는 열화 특성을 평가하는 것이 중요하다.

따라서 본 논문에서는 1차 ladder RC 등가회로를 방전율 기반 개방회로전압(OCV, open circuit voltage) 및 임피던스 산정 및 matlab을 통해 상용화된 리튬이온배터리 셀의 등가회로를 정식화를 제안하고, 방전율 기반 개방회로전압을 추정하여 시간 및 충전율에 따른 상용화 중대형 배터리 셀의 1차 RC ladder 등가회로 모델링을 수행한다. 상기에서 제안한 정식화 및 모델링을 바탕으로, AC IR법을 이용하여 리튬이온배터리의 SOC 및 SOH에 따른 열화특성을 실측값과 비교한 결과, 오차가 거의 발생하지 않아 본 논문에서 제안한 방법의 유효성을 확인할 수 있다.

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) 강하로 인하여 배터리 성능에 악영향을 끼칠 가능성이 있다. 또한, 제조 공정상 문제 발생할 시 배터리의 내부저항의 값이 달라질 수 있어, 일반적으로 배터리의 내부저항을 핵심적인

평가항목으로 적용한다. 즉, 사용후 배터리의 내부저항 측정은 배터리의 열화를 평가하기 위해 사용된다. 여기서, 배터리 열화는 그림 1과 같이 크게 배터리 셀 자체의 열화와 접속부 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. 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. 따라서, 본 논문에서는 내부저항의 측정에 사용되는 AC IR법을 바탕으로 사용후 배터리의 성능과 안전성을 효과적이고 효율적으로 평가할 수 있는 방안을 제시한다.

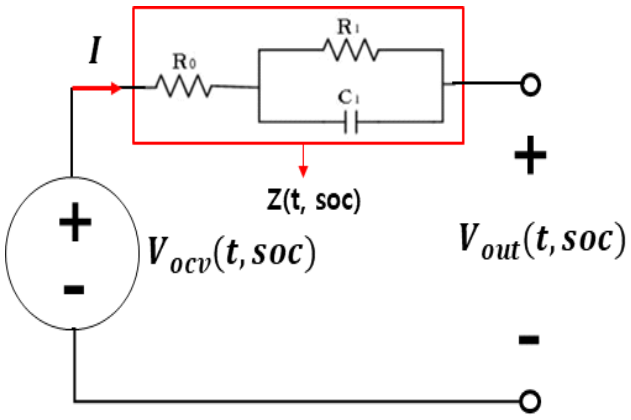


[그림 1] 전기자동차 배터리의 열화 종류

3. 리튬이온배터리 셀의 등가회로 정식화

리튬이온배터리의 셀은 전류 및 전압 특성을 반영하여 전기적 소자인 저항과 커패시터를 통해 등가화화며, 본 논문에서는 그림 2와 같이 1차 RC ladder 모델을 사용한다. 여기서, 1차 RC ladder 모델 내 개방회로전압을 추정하기 위하여, 충전 혹은 방전 전류 차단 후 일정 휴지기간을 갖고 반복적으로 측정하는 것이 일반적이다. 하지만 해당 방법으로 개방회로전압을 측정할 경우, 휴지시간의 일관성 및 측정기기의 오차뿐만 아니라 장기간 시험시간이 소요된다.

따라서, 본 논문에서는 방전율 기반으로 개방회로전압을 추정하고, 이를 통해 임피던스를 추정하는 방식으로 등가회로 모델링을 수행한다. 즉, 5가지 방전 전류를 적용한 Constant Current 방전시험 후 외삽법 적용을 위한 fitting을 적용하고, 외삽법 적용하여 OCV를 추정하여 SOC(%)별 OCV 곡선을 추정한다. 또한, 상기의 개방회로전압을 기반으로, 그림 2와 같이 해당 개방회로전압은 시간 및 SOC에 따라 VOCV(t,soc)로 추정하고, 배터리 셀 외부로 노출된 단자를 통해 측정된 전압 Vout(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_1의 시간변수를 포함한다. 이를 바탕으로, 그림 2의 합성임피던스 Z를 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.



[그림 2] 전류에 따른 시간변수를 고려한 등가회로

$$Z = \frac{R_0 + R_1 + jwR_0R_1C_1}{1 + jwR_1C_1}, \quad jw = s \tag{1}$$

$$L^{-1}(Z) = L^{-1}[R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1C_1s}] \tag{2}$$

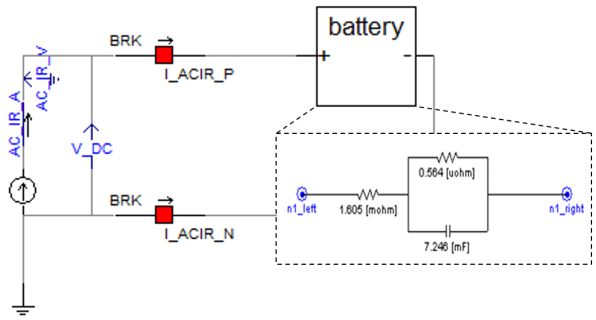
$$L^{-1}[Z(t)] = R_0\delta(t) + \frac{1}{C_1}e^{-\frac{1}{R_1C_1}t} \tag{3}$$

$$Z(t) = R_0 + \frac{1}{C_1}e^{-\frac{1}{R_1C_1}t} = A + Be^{-Ct} \tag{4}$$

여기서, Z: 등가 임피던스, R_0: 직렬저항, R_1: 확산저항, C_1: 확산 커패시터

4. 리튬이온배터리의 AC IR법 모델링

상기에서 정식화한 등가회로의 파라메타를 적용하여 리튬이온배터리의 AC IR법 모델링을 나타내면 그림 3과 같다. 여기서, AC IR법은 국제표준인 IEC 62620에서 제안한 방법을 바탕으로 교류 저항시험을 이용하여 peak 전압은 20mV 이하로 설정하고, 주파수는 1kHz를 적용한다.



[그림 3] 리튬이온배터리의 AC IR법 모델링

5. 시뮬레이션 및 결과 분석

5.1 시뮬레이션 조건

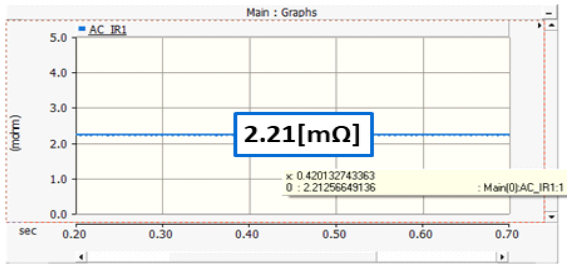
전기자동차용 사용후 배터리의 AC IR법에 의한 열화 특성을 분석하기 위하여, 시뮬레이션 조건을 상정하면 표 1과 같다. 여기서, SOC는 IEC 62620을 바탕으로 25%, 50%, 100%로 상정한다. 또한, SOH에 따른 특성을 분석하기 위하여, SOC는 50%로 고정시킨 후, 0 clcye, 400 cycle, 1200 cycle을 바탕으로 열화 특성을 분석한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

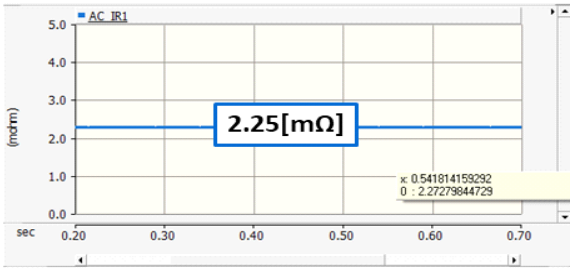
항목	내역
배터리 정격전압[V]	3.7
배터리 정격용량[Ah]	60
배터리 내부저항[mΩ]	1.6
배터리 SOC[%]	25
	50
	100
배터리 수명[cycle]	0
	400
	1200

5.2 SOC에 따른 AC IR 특성

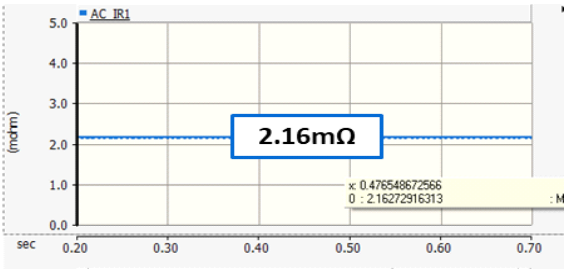
상기에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, SOC에 따른 AC IR법에 의한 내부저항 특성을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서 그림 5의 (a)는 SOC가 25%인 경우로, 내부저항이 2.25[mΩ] 으로 산정되는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 5의 (b)는 SOC가 50%인 경우로, 내부저항이 2.25[mΩ]이며, (c)는 SOC가 100%인 경우로 내부저항이 2.16[mΩ]으로 산정되는 것을 알 수 있다. 즉, SOC가 높아질수록 배터리의 내부저항이 감소하는 것을 알 수 있다. 한편, 모든 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과와 실제 시험 값을 비교하면 표 2와 같으며, 오차가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.



(a) SOC 25%



(b) SOC 50%



(c) SOC 100%

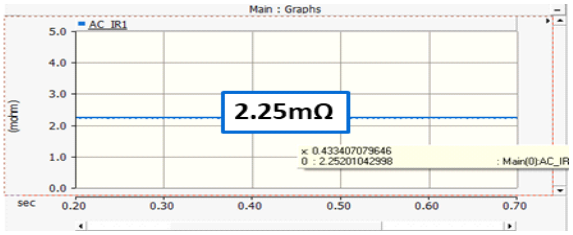
[그림 5] SOC에 따른 AC IR 특성

[표 2] SOC에 따른 AC IR 특성

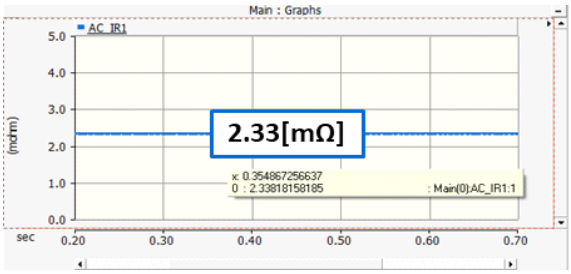
AC IR[mΩ]	SOC 25%	SOC 50%	SOC 100%
시뮬레이션	0.986	0.969	0.947
시험	0.9821	0.9751	0.9658

5.3 SOH에 따른 AC IR 특성

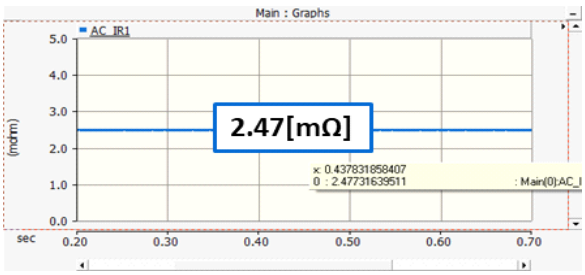
상기에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, SOH에 따라 AC IR법에 의한 내부저항 특성을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6의 (a)는 0 cycle의 경우를 나타내며, 내부저항이 2.25[mΩ]으로 산정되는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 6의 (b)는 400 cycle의 경우로, 내부저항이 2.33[mΩ], 그림 6의 (c)는 1200 cycle인 경우로, 내부저항이 2.47[mΩ]인 것을 알 수 있다. 즉, SOH가 낮아질수록 배터리의 내부저항이 증가하는 것을 알 수 있다. 한편, 모든 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과와 실제 시험 값을 비교하면 표 3과 같으며, 오차가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다.



(a) 0 cycle



(b) 400 cycle



(c)1200 cycle

[그림 6] 사이클에 따른 AC IR 특성

[표 3] SOH에 따른 AC IR 특성

AC IR[mΩ]	0 cycle	400 cycle	1200 cycle
시뮬레이션	2.25	2.33	2.47
시험	2.29	2.34	2.46

6. 결 론

본 논문에서는 전기자동차 사용후 배터리의 열화특성을 평가하기 위하여 1차 ladder RC 등가회로를 방전율 기반 개방회로전압 및 임피던스 산정 및 matlab을 통해 상용화된 리튬이온배터리 셀의 등가회로의 정식화를 제안한다. 또한, 방전율 기반 개방회로전압을 추정하여 시간 및 충전율에 따른 상용화 중대형 배터리 셀의 1차 RC ladder 등가회로 모델링을 수행한다. 상기에서 제안한 정식화 및 모델링을 바탕으로, AC IR법을 이용하여 리튬이온배터리의 SOC 및 SOH에 따라 AC IR법에 의한 내부저항 특성을 분석한 결과, 시뮬레이션과 실측값의 오차가 거의 발생하지 않아 본 논문에서 제안한 정식화 및 모델링의 유효성을 확인할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행 중인 '(20026497)S/W 검사기법을 활용한 사용후 배터리 평가의 국외 표준개발 및 국제표준화 대응' 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] Jaehyung Lee, "Lithium-Ion Battery Pack Modeling Considering Cell-to-Cell Variation and Packaging". Power Electronics Conference pp187-188, July 2016