

전기화학적 임피던스 분광법 기반 이동 평균 추세선을 이용한 고출력 배터리의 이상 탐지 기법 연구

이평연*, 안정호*, 권상욱*, 이동재*, 유기수**, 김종훈*
 충남대학교 에너지저장변환 실험실*, 영남대학교**

Study on the anomaly detection method of high power battery using moving average trend line based EIS

Pyeong-Yeon Lee*, Jeongho Ahn*, Sanguk Kwon*, Dongjae Lee*,
 Kisoo Yoo**, Jonghoon Kim*
 Chungnam National University, Yeungnam University**

ABSTRACT

리튬이온 배터리를 고온의 환경에서 장시간 운용함에 따라 배터리 내부 물질의 변형 및 특성 변화가 발생하여 안전성의 문제가 발생하게 된다. 배터리의 안전성을 향상하기 위해 배터리의 고장 및 이상 상태를 진단 및 탐지하는 기법들의 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 배터리의 이상 상황을 모사하기 위해 열폭주의 한 가지 방법인 고온의 환경에서 배터리의 특성 변화를 전기화학적 임피던스 분광법을 통해 분석하였으며, 등가회로 모델의 특성 인자를 활용하여 이상 상황을 탐지할 수 있는 이동 평균 추세선 기반의 이상 탐지 기법을 제안하며, 열폭주가 발생한 데이터를 통해 이상 탐지 기법을 검증한다.

1. 서론

최근 신재생에너지의 관심이 높아지고 있으며, 태양광, 풍력 등으로 생산된 전기에너지를 저장하기 위한 에너지저장장치(Energy storage system; ESS)의 연구가 활발히 진행되고 있다. 에너지저장장치는 주로 장수명, 낮은 자가방전율, 높은 에너지 밀도의 특징을 가지는 리튬이온 배터리를 사용하고 있다. 리튬이온 배터리의 단점은 온도에 민감한 특징을 가지고 있어 고온과 저온에서 용량 및 내부 저항의 변화를 반영한 배터리 상태 관리가 필요하다. 고온에서는 리튬이온 배터리의 전해질의 활성화로 인해 용량의 증가 및 내부 저항의 감소로 이어지지만, 제조사에서 제시하는 운용 온도를 넘어서는 온도로 운용시 폭발 및 화재와 같은 안전성의 문제들이 발생할 수 있다.

리튬이온 배터리를 사용하는 에너지저장장치는 2017년 8월부터 다수의 화재 사고가 발생하고 있으며, 산업통상자원부의 2차 화재 조사결과는 리튬이온 배터리의 저전압, 이상 고온, 전압 불균형 등의 원인으로 발표하였다^[1]. 고창 변전소의 경우, ESS의 컨테이너 내부의 공조기가 동작하지 않아 컨테이너 내부 온도 상승으로 인해 발생하였다고 결론을 내린 사례도 있다. 또한, 리튬이온 배터리는 고장 및 예기치 못한 사고가 발생하여 화재가 발생하면 소화하기 어려워 진소할 때까지 기다려야 하는 실정이며, 리튬이온 배터리의 화재를 대비하기 위해 소화 및 이상 탐지에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 첫 번째는 배터리 내부의 안전성이 높은 소재 개발에 관한 연구가 진행되고 있으며^[2], 두 번째는 화재 및 고장이 발생하기 전에 사전 징후를 판단하여 화재를 예방하는 방법에 관한 연구가 진

행되고 있다. 배터리 이상 상태의 판단 및 진단하는 방법에는 배터리 관리 시스템(Battery management system; BMS)의 기능 중 하나인 건전성 예측 및 관리(Prognostics and health management; PHM)이 있다. 건전성 예측 및 관리는 시스템의 상태를 실시간으로 관리하여 상태를 판단하고 고장 시점을 예측하는 기술이다. 이의 기술은 경제적 손실과 안전에 직결되는 문제를 다루는 에너지저장장치에 필수적으로 적용 되어야 한다. PHM은 배터리의 상태를 나타내는 건전성 지표(Health indicator; HI)를 활용하여 배터리를 진단하여 노화 및 이상을 탐지하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 건전성 지표는 배터리의 특성 인자를 의미하며, 이상을 탐지하기 전 배터리의 특성을 판단하기 위해 우선으로 고려되어야 할 사항이다. 배터리의 상태를 나타내는 특성 인자는 전기적 방법을 통해 산출된 인자와 전기화학적 방법을 통해 산출된 인자로 나눌 수 있다. 전기적 특성 인자의 경우, DCIR(Direct current internal resistance) 방법을 통해 산출된 배터리의 등가회로 모델(Equivalent circuit model; ECM) 파라미터인 내부 저항, 동일한 전류가 인가되었을 때의 특정 전압부터 특정 전압까지의 경과 시간(Time interval of equal discharging voltage difference; TIEDVD) 등 다양한 특성 인자가 사용된다. 하지만, 전기적 특성 인자의 경우, 배터리의 내부 상태를 설명하기에는 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해 전기화학적 임피던스 분광법(Electrochemical impedance spectroscopy; EIS)의 방법을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. EIS는 전압 또는 전류에 높은 주파수에서 낮은 주파수로 정현파 파형을 인가하고 배터리의 응답 특성에 따른 진폭과 위상의 변화를 측정하여 임피던스를 분석하는 방법이다. 또한, 복소수로 표현한 그래프를 나이퀴스트 선도(Nyquist plot)라고 하며, 배터리의 등가회로 모델의 파라미터를 추출할 수 있다. 또한, EIS 기반 전기화학적 등가회로 모델 파라미터는 전기적 모델 파라미터와 다르게 각 파라미터의 의미를 배터리 내부 물질의 변화와 함께 설명할 수 있어, 본 논문에서는 고온의 특성을 반영한 등가회로 모델 파라미터를 이상 검출을 위한 인자로써 설정한다.

본 논문에서는 고장이 열폭주(Thermal runaway)가 발생하기 전, 사전 징후를 판단하여 사고를 예방하는 것에 초점을 맞추어 연구되었다. 이상 고온의 상황에서 열폭주를 모사하기 위해 고온(60°C)에서 충·방전을 진행하였다. 고온 사이클 시험 중 배터리의 열폭주가 발생하였으며, 이의 데이터를 활용하여 고온의 상황에서 이상 현상을 탐지하기 위한 기법을 제안한다.

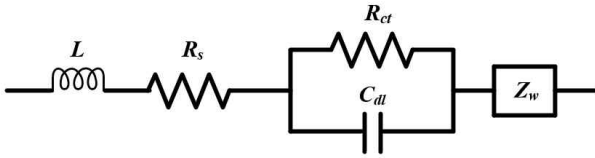


그림 1 리튬이온 배터리의 등가회로 모델
Fig. 1 Equivalent circuit model(ECM) of

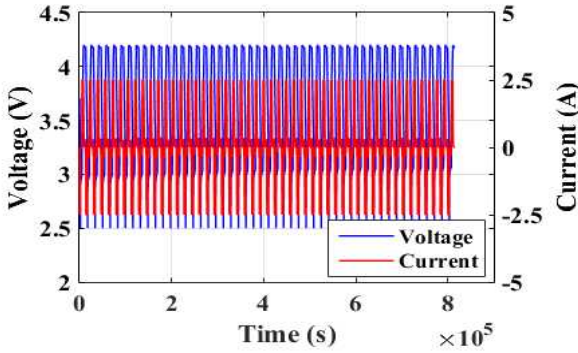


그림 2 고온 환경에서의 장기 노화 시험
Fig. 2 Cycle life test at 60°C

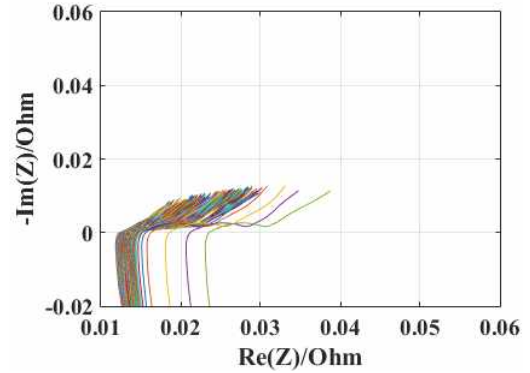
2. 배터리 이상 탐지를 위한 인자 추출을 위한 전기화학적 특성 시험 및 특성 인자 분석

2.1 전기화학적 임피던스 분광법

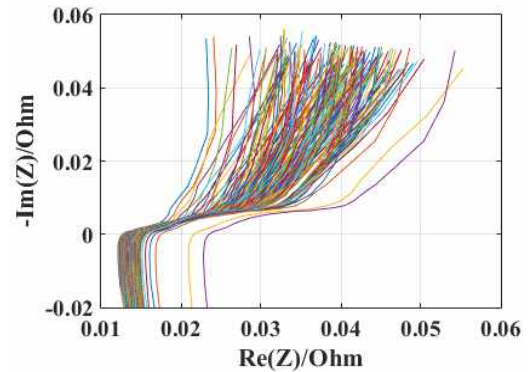
본 논문에서는 고출력 18650 배터리의 전기화학적 특성 인자를 추출하기 위해 비파괴적인 검사 방법의 하나인 전기화학 임피던스 분광법을 사용하였다. EIS는 고주파부터 저주파까지 교류 신호를 배터리에 인가하여 배터리의 임피던스를 측정하는 방법이다. 측정된 임피던스 데이터는 나이퀴스트 선도 및 물리적으로 설명 가능한 등가회로 모델로 표현할 수 있다. 등가회로 모델의 특성 변수를 통해 배터리의 노화나 상태를 진단하는 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서 사용한 등가회로 모델은 그림 1과 같으며, 인덕턴스(Inductance; L) 성분은 고주파에서 배터리와 연결된 전선에 의한 저항을 나타내며, 전해질, 접촉 저항을 의미하는 직렬 저항(Equivalent series resistance; R_s), 나이퀴스트 선도의 반원에서 추출할 수 있는 RC 병렬 회로는 전극 계면에서 산화 및 환원 반응 때문에 발생하는 전하전달 저항(charge transfer resistance; R_{ct})과 이중층 캐패시턴스(Double layer capacitance; C_{dl})를 의미하며, 마지막으로 와버그 임피던스(Warburg impedance; Z_w)로 구성된다.

2.2 배터리 특성 인자 추출을 위한 시험 조건

배터리의 고장 상황을 모사하기 위해 열폭주의 발생 조건 중 하나인 고온(60°C)에서의 만충과 만방이 반복되는 프로파일로 이루어진 장기 노화 시험(Cycle life test)을 수행하였다. 항온 챔버를 사용하여 외기 온도를 60°C로 유지하고, 그림 2와 같이 1C-rate를 적용하여 만충과 만방을 수행하며, 사이클마다 전기화학적 임피던스 분광법을 수행하였다. EIS는 배터리의 특성 인자를 추출하기 위해 사이클별 만충 및 만방의 충전 상태(State-of-charge; SOC)에서 측정하고, 정전압 제어(Potentiostatic) 방법을 통해 전압의 진폭이 5mV인 교류 파형을 인가하여 10kHz-100mHz까지 측정하였다.



(a) Nyquist plot (SOC 100%)



(b) Nyquist plot (SOC 0%)

그림 3 사이클에 따른 나이퀴스트 선도 (170 사이클)
Fig. 3 Nyquist plot based on EIS by cycle (170 cycle)

2.3 전기화학적 임피던스 분광법 기반 배터리 특성 인자 분석

그림 3은 만충과 만방 후 휴지 기간에 측정된 나이퀴스트 선도를 나타낸다. 그림 3-(a)는 SOC 100%에서의 사이클별로 추출하였으며, 시간이 흐를수록 오른쪽으로 이동하는 크기가 증가하며, 이는 전해질에서 발생하는 저항을 나타내는 R_s 가 증가하고 있음을 의미한다. 그림 3-(b)는 SOC 0%에서의 사이클별 나이퀴스트 선도를 나타내며, 초기에는 저항의 변화가 크지 않았지만, 고온에서 지속적인 운용 시 나이퀴스트 선도가 오른쪽으로 이동하며, 직렬 저항이 급격하게 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 그림 4는 고온 환경에서의 등가회로 모델의 파라미터를 추출한 결과를 나타낸다. R_s 과 R_{ct} 를 비교하면 R_s 의 경우 고온에 대해서 150 사이클 이후로 급격하게 저항의 증가가 일어남을 확인할 수 있지만, R_{ct} 에서는 급격한 변화는 보이지 않으며 일정하게 증가함을 확인할 수 있다. 이의 결과는 고온 환경에서 운용되는 어플리케이션은 R_s 의 값을 사용하여 배터리 상태를 진단할 수 있음을 의미한다.

3. 배터리 이상 탐지를 위한 이동 평균 추세선을 활용한 이상 탐지 기법

3.1 이동 평균 추세선을 활용한 이상 탐지 기법

이상 탐지의 연구는 시계열 데이터를 사용하고 시계열 데이터는 특정 시간, 사이클 패턴을 통해 모델을 만들어 이 패턴을 벗어나면 이를 이상 현상으로 탐지하게 된다. 본 연구에서는 EIS 기반 등가회로 모델의 R_s 를 활용하여 이동 평균 추세선을

통해 신뢰구간을 설정하고 신뢰구간을 벗어나는 경우 이상치로 판단하는 이상 탐지 방법을 제안한다. 신뢰구간을 좁게 잡으면 민감하게 반응하여 이상치를 검출하게 되어 신뢰성이 떨어지는 이상 탐지가 될 수 있다. 본 논문에서는 오탐을 방지하기 위해 데이터의 표준편차(σ)를 이용하여 신뢰구간을 설정하였다. 또한, 이동 평균 추세선은 식 (1)과 같이 산출할 수 있으며, n 은 윈도우의 크기, x 는 입력 데이터, \bar{x} 는 이동 평균의 값을 의미한다. 이동 평균 추세선으로부터 $\pm 3\sigma$ 로 식 (2), (3)과 같이 신뢰구간을 설정하였다. R_s 의 데이터가 상한, 하한 신뢰구간을 벗어나게 되면 이상으로 판단하는 이상 탐지를 수행한다.

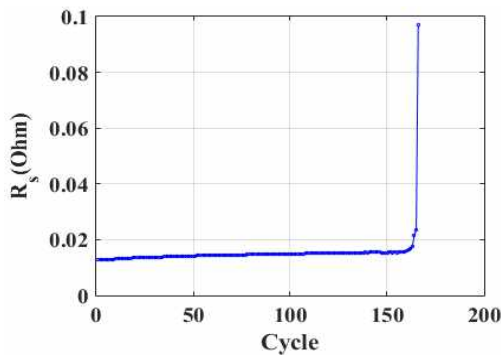
$$\bar{x}_k = \frac{x_{k-n+1} + x_{k-n+2} + \dots + x_k}{n} \quad (1)$$

$$\text{Upper control limit} = \bar{x}_k + 3\sigma \quad (2)$$

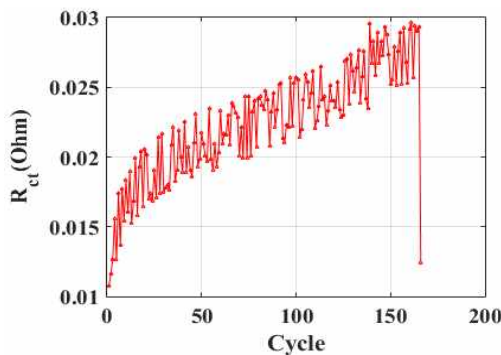
$$\text{Lower control limit} = \bar{x}_k - 3\sigma \quad (3)$$

3.2 이동 평균 추세선을 활용한 이상 탐지 결과

그림 5는 EIS로부터 추출된 R_s 의 파라미터를 사용하여 이동 평균 추세선을 적용한 신뢰구간을 산출한 결과이다. 그림 5-(a)는 배터리가 수명을 다할 때까지의 이상 탐지를 수행한 결과를 나타낸다. 그림 5-(b)는 신뢰구간을 벗어나는 부분을 확대한 그림이며, 139 사이클까지는 신뢰구간을 넘어가는 R_s 는 없지만, 139 사이클 이후로 R_s 의 값이 기존 패턴과 달리 값이 변동되기 시작하면서 신뢰구간을 벗어나는 데이터를 확인할 수 있다. 160 사이클 이후 배터리 열폭주가 발생하게 되었을 때 R_s 가 상한 신뢰구간을 벗어나는 것을 확인할 수 있다.

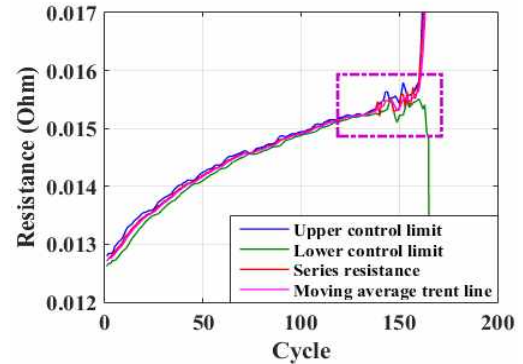


(a) Series Resistance (SOC 0%)

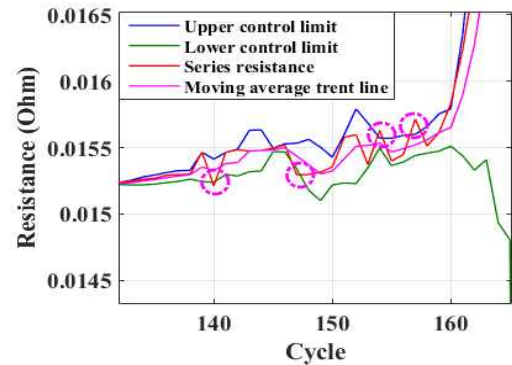


(b) Charge transfer resistance (SOC 0%)

그림 4 전기화학적 임피던스 분광법 기반 등가회로 모델 파라미터 추출 (SOC 0%)
Fig. 4 Extraction of ECM parameter based EIS (SOC 0%)



(a) 0-170 cycle (SOC 0%)



(b) 130-165 cycle (SOC 0%)

그림 5 직렬 저항 기반 이동 평균 추세선을 이용한 이상 탐지 결과 (170 cycle)

Fig. 5 Result of anomaly detection result using moving average trend line (170 cycle)

4. 결론

고출력 배터리의 안전성을 향상하기 위해 이상 고온을 모사하여 고온의 환경에서 장기노화시험을 수행하였으며, 전기화학적 임피던스 분광법을 통해 고온에서 배터리가 받는 영향을 분석하였다. EIS 기반 등가회로 모델의 특성 인자를 활용한 이상 탐지 기법을 제안하였으며, 열폭주가 발생한 데이터를 활용하여 이상 탐지 기법을 검증하였다. 향후, 다른 고장의 상황에서도 본 이상 탐지가 가능한지에 대해 검증할 예정이다.

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2018R1C1B6004482) (No. 2020R1F1A1076204).

참고 문헌

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, Announcement of ESS accident cause and safety measures, pp. 1~11. Jun. 2019.
- [2] Wilke, Stephen, et al. "Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: an experimental study" Journal of Power Sources, 340, 51-59. 2017.