

리튬이온 배터리 열화 및 운용 조건에 따른 EIS 기반 SOH 추정 알고리즘 최적 열화 인자 도출

이재형*, 김재영*, 김종훈*
 충남대학교 에너지저장변환연구실

Optimal Health Indicator Extraction for SOH estimation based on EIS of Lithium-ion battery Degradation and Operating Condition

Jaehyeong Lee*, Jaeyoung Kim*, Jonghoon Kim*
 Energy Storage Conversion Lab., Chungnam National University*

ABSTRACT

현재 전기자동차(Electric vehicle; EV)와 같은 다양한 전력 변환 장치 분야에 적용되고 있는 리튬이온 배터리(Lithium-ion battery; LIB)에 대한 건강 상태(State-of-health; SOH) 추정은 안정적이고 효율적인 배터리 사용을 위해 매우 중요한 요소이다. 본 논문에서는 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS) 기반 배터리 건강 상태 추정 시 정확도 향상을 위한 임피던스 별 주파수 구간을 선정하여 최적 열화 인자를 도출하였다. 주파수 의존 파라미터들의 경향성을 분석하여 열화 인자 산정을 최적화하였으며 열화에 따른 최적 주파수 구간은 임피던스 편차가 최대인 구간, 배터리 충전 상태(State-of-charge; SOC) 영역 별 주파수 구간 내 임피던스 편차가 최소화된 구간, 환경 온도 변화 별 주파수 구간 내 임피던스 편차가 최대화된 구간을 선정하였다.

인자를 도출하였다. 이를 위해 다양한 운용 조건에서 변화하는 주파수 의존 모델 파라미터들의 경향성 분석 및 최대/최소 편차 발생 구간을 확인하였다. 배터리 열화 및 충전 상태(State-of-charge; SOC) 영역, 환경 온도 조건에 따라 주파수 별로 발생하는 임피던스 변화량을 분석하여 최적 주파수 구간 도출을 진행하였다. 배터리 열화에 따른 최적 주파수 구간은 임피던스 변화가 가장 크게 발생하는 구간으로 선정하였고, SOC에 따른 최적 주파수 구간 선정은 최소 임피던스 편차가 발생하는 구간으로 선정하였다. 환경 온도에 따른 최적 주파수 구간은 온도 고정 시 SOH 추정 성능의 강건성을 고려해 임피던스 차이가 최대로 발생하는 구간으로 설정하였다. 각 조건에 대해 도출된 주파수 영역을 종합하여 최종적으로 실수 임피던스(Z_{real}) 10Hz 및 허수 임피던스($Z_{imaginary}$) 60Hz 주파수 영역에서, Magnitude의 경우 10Hz, Phase의 경우 100Hz에서 SOH 추정 모델에 적용되는 최적 열화 인자를 도출하였다.

1. 서 론

온실가스와 오염물질을 배출하는 내연기관 자동차의 환경 문제를 해결하기 위해 리튬이온 배터리(Lithium-ion battery; LIB)는 대안책으로 주목받고 있는 전기자동차(Electric vehicle; EV)의 주 동력원으로 사용되고 있다^[1]. 또한 높은 에너지 밀도, 낮은 자가 방전, 가벼운 무게와 충전 가능한 특징을 가지고 있어 휴대용 전자기기, 에너지 저장 장치(Energy storage system; ESS)등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 따라서 리튬이온 배터리의 사용량이 급증하게 되면서 배터리 건강 상태(State-of-health; SOH)에 대한 추정을 통해 적절한 관리가 요구된다. 또한 최근 수명이 다한 폐배터리 발생으로 인해 재사용 시장이 성장함에 따라 동일한 SOH 상태를 갖는 배터리끼리 분류하여 재사용 배터리 어플리케이션을 설계하는 것이 필요하다. 그러나 현재 EV 및 ESS의 배터리 관리 시스템(Battery Management System; BMS)에 적용되는 배터리 셀 및 팩을 단순히 전압, 전류, 온도만 측정하는 방식으로는 리튬이온 배터리의 내부적인 열화 원인에 대해 진단 및 예측하기 매우 어렵다. 따라서 운용 조건 별 배터리 내부 상태에 대해 전기적인 요소뿐만 아니라 내부 전기화학적 상태에 대한 분석이 필수적이다. 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical impedance spectroscopy; EIS)은 고주파수에서 저주파수까지 미소 전류/전압 신호를 인가하여 도출되는 임피던스를 통해 전기화학 시스템의 내부 화학적 특성을 분석하는 기법으로 주파수 영역에 따라 전기화학적 현상을 확인할 수 있어 기존 전기적 모델의 한계를 보완할 수 있다는 장점이 있다^[2]. 본 연구에서는 전기화학 임피던스 분광법을 활용하여 배터리 건강 상태 추정 정확도 향상을 위한 최적 열화

2. 배터리 내부 상태 및 환경 온도에 따른 EIS 기반 임피던스 변화 경향성 분석

2.1 배터리 열화에 따른 내부 임피던스 변화량 분석

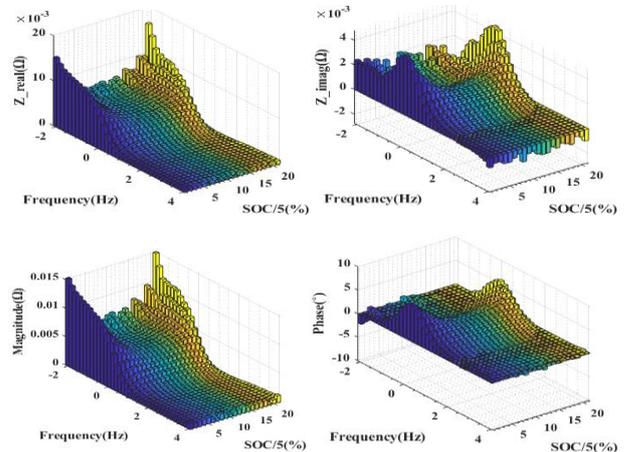


그림 1 배터리 노화에 따른 주파수 별 임피던스 변화
 Fig. 1 Impedance variation of frequency range according to battery aging

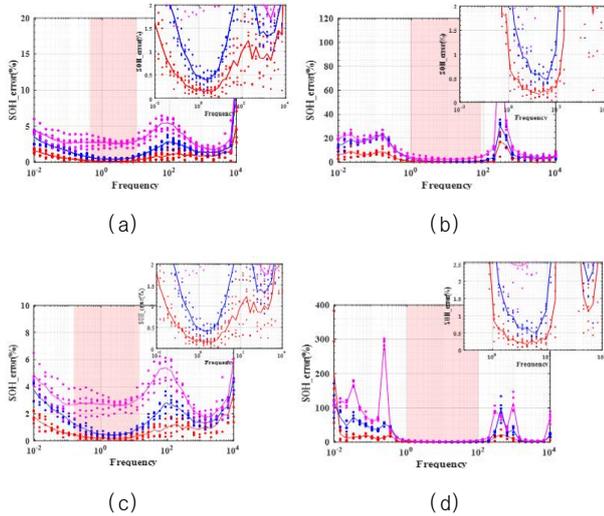


그림 2 SOC에 따른 주파수 별 임피던스 변화 (a) Z_{real} (b) $Z_{imaginary}$ (c) Magnitude (d) Phase

Fig. 2 Impedance variation of frequency range according to SOC (a)

Z_{real} (b) $Z_{imaginary}$ (c) Magnitude (d) Phase

배터리 SOH 추정 모델 성능의 강건성을 위해 배터리의 노화가 진행됨에 따라 임피던스 변화가 크게 발생하는 주파수 영역의 설정이 필요하다. 해당 영역의 도출을 위해 각 사이클 (70, 130, 170, 210, 250Cycle)별 임피던스 변화량을 SOC 0~100% 구간 및 전기자동차의 일반적인 전압 운용 영역인 SOC 20%에서 80%까지 구간과 비교 분석하였다. 실수 임피던스(Z_{real})와 Magnitude의 경우, 노화가 진행됨에 따라 변화량이 가장 크게 발생하는 주파수 영역은 10Hz 이하 영역이고 허수 임피던스($Z_{imaginary}$)와 Phase의 경우, 1~316Hz 사이 영역에서 변화가 크게 발생하는 것으로 확인하였다. 이를 그림 1에 나타내었다.

2.2 SOC에 따른 내부 임피던스 변화량 및 SOH 추정 기대 오차 분석

본 논문에서 선정한 SOC 영역 50~60%, 40~70%, 20~80% 3가지 영역에서 임피던스 측정 결과에 대한 비교 분석을 진행하였다. 각 사이클 구간에서 주파수 별 최대 발생 임피던스 편차를 기반으로 SOH 추정 기대 오차를 도출하여 각 주파수 별 SOC 영역에 따른 모델 추정 성능을 확인하였다. SOH 추정 기대 오차는 식 (1) 및 (2)와 같이 산출할 수 있으며, $Z_{increase}$ 는 70cycle에서 250cycle까지 열화 진행 시 발생하는 임피던스 증가량, $SOH_{decrease}$ 는 동일한 조건에서 감소하는 SOH 감소량, $Diff_{max}$ 는 SOC 영역 별 측정되는 각 파라미터의 최대 기대 편차, SOH_{error} 는 SOH 추정 기대 오차값을 의미한다.

$$Z_{increase} : SOH_{decrease} = Diff_{max} : SOH_{error} \quad (1)$$

$$SOH_{error} = \frac{SOH_{decrease} - Diff_{max}}{Z_{increase}} \quad (2)$$

Z_{real} 과 Magnitude의 경우, 0.2~10Hz 영역에서 SOH 추정 기대 오차가 가장 낮게 발생하였고, $Z_{imaginary}$ 와 Phase의 경우, 2~100Hz 영역에서 가장 낮게 발생하는 것을 확인하였다. SOC 50~60% 구간의 상기 주파수 영역에서 발생하는 SOH 추정 기대 오차는 약 0.5%이하로 확인되며, SOC 40~70% 구간에서는 1% 이하로 나타났다. 이를 그림 2에 나타내었다.

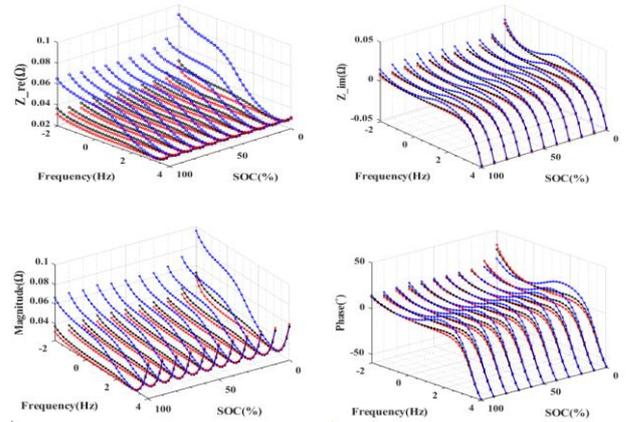


그림 3 환경 온도에 따른 주파수 별 임피던스 변화

Fig. 3 Impedance variation of frequency range according to environment temperature

2.3 환경 온도에 따른 내부 임피던스 변화 분석

SOH 추정 정확도를 향상시키기 위해서는 측정 온도에 따른 EIS 변화량을 분석하여 이를 보정하는 것이 필수적이다. 주파수 구간별 온도에 따른 임피던스 값의 차이가 크게 발생할수록 SOH 추정 모델의 성능에 대한 강건성을 확보할 수 있어 임피던스 변화량이 가장 크게 발생하는 구간을 최적 주파수 구간으로 선정하였다. Z_{real} 과 Magnitude의 경우, 임피던스 변화가 가장 크게 발생하는 구간은 100Hz 이하이며, $Z_{imaginary}$ 와 Phase의 경우, 1~100Hz 영역에서 변화량이 가장 크게 발생하는 것을 확인하였다. 이를 그림 3에 나타내었다.

3. 결론

본 논문은 배터리 열화 및 SOC, 환경 온도에 따른 EIS 기반 임피던스 변화 경향성 분석을 진행한 후 해당 조건들에 따른 최적 주파수 구간을 선정하고 각 임피던스 별 최적 열화 인자를 도출하였다. 최종적으로 도출된 주파수는 Z_{real} 과 $Z_{imaginary}$ 의 경우 각각 10Hz, 60Hz 구간을 선정하였고, Magnitude의 경우 10Hz, Phase의 경우 100Hz 주파수를 최적 주파수 구간으로 선정하였다. 추후 SOH 추정 시 도출된 인자를 반영하여 추정 알고리즘의 정확도를 높이는 연구를 진행할 예정이다.

이 논문은 한국전력연구원(R22X001-2, PCS AC측 불평형 보상과 DC측 품질개선 알고리즘 설계 및 셀 열화원인제거 냉각방식 제안 기초연구)과 산업기술평가관리원의 재원으로 오토실리콘(No. 200116167, 전기자동차 배터리의 내부 상태, 폭발 위험, 잔존 수명, 교체 시기를 예측하는 배터리 안전 진단 시스템 (BDS) SoC 개발)과 현대자동차(모델 융합형 기술 기반 배터리 상태 진단 기술 고도화 개발)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고 문헌

- [1] Pastor-Fernández, Carlos, et al. "A comparison between electrochemical impedance spectroscopy and incremental capacity-differential voltage as Li-ion diagnostic techniques to identify and quantify the effects of degradation modes within battery management systems." Journal of Power Sources 360 (2017): 301-318.
- [2] Leduc, Hugo, et al. "Real-Time Under-Load Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Analysis and Modeling." ECS Meeting Abstracts, No.20, P1584, IOP Publishing, 2020