

리튬이온 배터리 환경조건별 동적 프로파일 및 단주기 푸리에 변환 기반 유사 전기화학 임피던스 분광법 도출 및 운영환경 분류

이미영*, 김민혁*, 안종찬*, 양가람*, 김종훈*
 충남대학교 에너지저장변환연구실*

Derivation of pseudo-electrochemical impedance spectroscopy (PEIS) and classification of operating environment based on lithium-ion battery dynamic profile and short time Fourier transform

Miyoung Lee, Minhyeok Kim*, Jongchan An*, Garam Yang*, Jonghoon Kim*
 Energy Storage Conversion Lab., Chungnam National University*

ABSTRACT

배터리는 화학적 반응에 의해 생성된 에너지를 전기 에너지로 변환하여 구동하는 전력변환 장치이다. 화학적 반응은 온도 조건, 부하 조건 등 다양한 환경조건에 의해 발생하는 메커니즘이 상이하다. 하지만 단순 전기적 신호만으로는 전기화학적 현상을 분석하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 시계열 신호를 주파수 신호로 변환하는 신호처리 알고리즘을 적용하여 유사 전기화학 임피던스 분광법(Pseudo electrochemical impedance spectroscopy; PEIS)을 도출하였으며, 이를 기반으로 배터리의 환경조건을 분석하였다.

1. 서론

전기차(Electric vehicle; EV) 시장 성장에 따라 동적 구동 장치인 배터리가 많은 각광을 받고 있다. 그 중 에너지 밀도 및 친환경성, 오랜 수명 등으로 리튬이온 배터리가 많이 적용되고 있다. 하지만 리튬이온 배터리의 경우 리튬이온과 전자의 산화 환원 반응에 의해 생성된 화학 에너지를 전기 에너지로 변환하여 사용하는데, 이때 배터리가 구동되는 환경 조건, 특히 온도 및 부하조건에 의해 발생하는 열화 메커니즘이 상이하다. [1] 이러한 상이한 열화 메커니즘으로 인해 주행 환경에 따라 급격한 용량감소를 유발하며, 심화될 경우 화재 발생까지 연결된다. 이러한 급격한 고장에 대한 영향성을 사전 진단하기 위해 다양한 고장 진단 기법들이 연구되고 있다. 하지만 기존 고장 진단 기법들은 단순 이상치 처리에 국한되어 있으며, 이마저도 배터리 관리 시스템(Battery management system; BMS)에서 수집한 전기적 신호인 전류, 전압, 온도 신호에 의존한다. [2] 이러한 전기적 분석의 한계를 보완하기 위해 전기화학적 분석을 가능하게 하는 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical impedance; EIS) 기법을 적용할 수 있다. 하지만, EIS는 주파수에 따른 교류 신호 인가에 의한 응답 특성을 분석하는 기법이기 때문에 주파수 분석기와 같은 별도의 장치가 필요하다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 시계열 특성을 주파수 특성으로 변환하는 신호처리 알고리즘을 적용하였다. 이를 유사 전기화학 임피던스 분광법(Pseudo electrochemical impedance spectroscopy; PEIS)라고 정의하였으며, 이를 기반으로 다양한 환경조건에 노출된 배터리의 환경 조건을 분류하였다. 이에 대한 내용을 그림 1에 나타내었다.

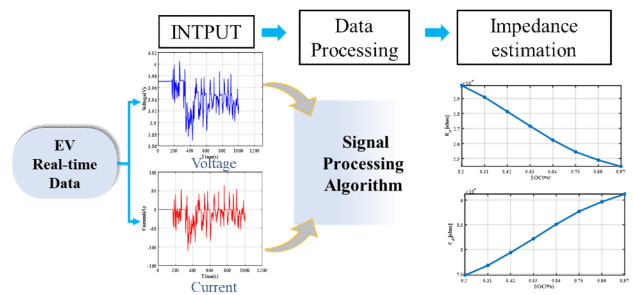


그림 1 리튬이온 배터리 동적 프로파일 및 신호처리 기반 PEIS 추출 모식도

Fig. 1 A schematic flowchart of PEIS extraction based on signal processing and dynamic profile of lithium-ion battery

2. 신호처리 알고리즘 기반 유사 전기화학 임피던스 분광법 추출

신호처리 알고리즘은 오일러 공식을 기반으로 시계열 특성을 주파수 영역에서 분석할 수 있게 시계열 데이터를 주파수 영역으로 변환하는 알고리즘이다. 본 연구에서는 별도의 주파수 분석 장비 없이 동적 프로파일을 배터리에 적용하여 수집한 시계열 데이터를 주파수 영역으로 변환하는 단주기 푸리에 변환(Short time Fourier transform; STFT) 알고리즘을 적용하였다.

2.1. 단주기 푸리에 변환 알고리즘

리튬이온 배터리는 전기화학적 메커니즘에 의해 구동되며, 메커니즘 분석을 위한 주파수 분석이 필요하다. 특히, 전기화학적 메커니즘은 주파수 영역에 따라 상이하다. 따라서 본 연구에서는 푸리에 변환과 같은 전체 시계열 데이터를 적용하는 것이 아닌 분석을 원하는 일정 시간을 설정해 푸리에 변환을 수행하는 단주기 푸리에 변환 알고리즘을 선정하였다. 단주기 푸리에 변환 알고리즘은 수식 1과 같이 표현할 수 있다.

$$F^{win}(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s)g(s-t)e^{-j\omega s} ds \quad (1)$$

수식 1의 f(s)는 변환을 위한 전체 시계열 데이터의 일부 시간 간격으로, 변환을 원하는 시계열 영역을 선택해 STFT를 적용한다. 리튬이온 배터리의 유의미한 특성은 중간 주파수 영역인 1~300Hz 특성을 분석함으로써 얻을 수 있다. g(s-t)는 주파수 변환을 위한 윈도우 함수이다. 따라서 본 연구에서는 총

1s 단위로 샘플링된 총 길이 2129s의 데이터 중 1~300s 데이터 구간을 선정해 STFT를 수행하여 PEIS를 도출하였다.

2.2 유사 전기화학 임피던스 분광법

전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical impedance spectroscopy; EIS)은 주파수 영역에 따른 내부 임피던스 특성을 분석함으로써 물질이 보유한 고유의 전기화학 특성을 분석하는 기법이다. 하지만 EIS의 경우 별도 주파수 분석 장비가 필요하기 때문에 실제 환경에서 적용하기 어렵다는 한계가 있다. 따라서 본 연구는 주파수와 주기의 역수 관계라는 관계성을 이용해 주기가 있는 시계열 데이터에서 주파수 특성 추출을 통해 유사 임피던스를 도출하여 배터리의 환경 특성을 분석하였다.

2.2.1 동적 프로파일 기반 배터리 환경조건 실험

리튬이온 배터리의 유사 임피던스를 도출하기 위해서는 주기가 있는 전류/전압 신호가 필요하다. 따라서 주기성을 갖는 동적 프로파일을 설계하여 환경조건에 따른 실험을 수행하였다. 설계한 환경조건은 고온, 상온, 고전류 환경이며 해당 환경조건에 노출되었을 경우 동적 프로파일에 따른 전류/전압 신호를 신호처리 알고리즘의 입력 데이터로 하였으며, 이를 그림 2에 나타내었다. 동적 프로파일은 1회 인가 시 배터리 충전 상태(State-of-charge; SOC)가 11% 감소하는 프로파일이다.

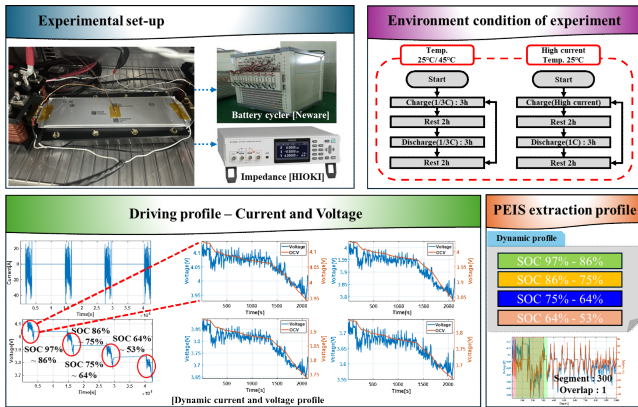


그림 2 환경조건별 PEIS 추출을 위한 배터리 실험 셋업

Fig. 2 Battery experiment setup for extraction of PEIS according to the environment condition

2.2.2 동적 프로파일 신호처리 알고리즘 적용 결과

각 환경조건별 동적 프로파일을 적용하여 SOC 영역에 따라 수집한 전류/전압 프로파일을 STFT 알고리즘에 적용한 PEIS 결과를 실제 EIS 결과와 비교하여 그림 3에 나타내었다.

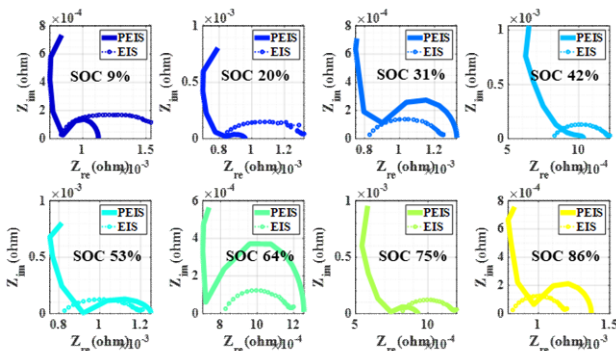


그림 3 SOC영역에 따른 리튬이온 배터리 PEIS 및 EIS 비교

Fig. 3 Comparison of PEIS and EIS according to SOC range of Lithium-ion battery

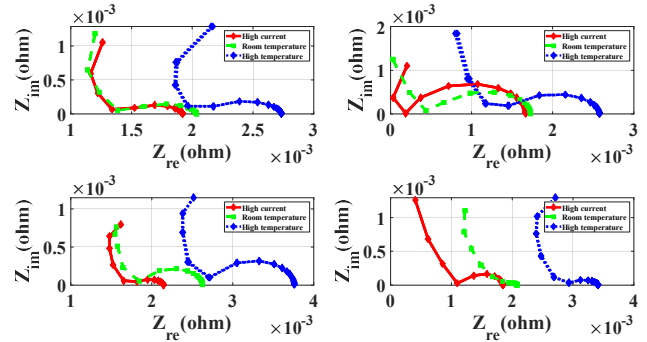


그림 4 환경조건별 리튬이온 배터리 PEIS 결과

Fig. 4 Results of PEIS extraction according to environment condition of Lithium-ion battery

PEIS의 경우, 주파수 분석을 수행하여 임의로 생성한 데이터이기 때문에 기존 EIS와 동일한 영역을 분석할 수는 없지만, 반원 영역, 0점 주파수 영역 등을 PEIS의 형상을 통해 분석할 수 있다. 그 결과 상온 환경에서 운영된 배터리의 경우, 반원 영역이 고온 환경 대비 크게 나타남을 확인할 수 있으며 고온 환경의 경우, 반원 영역이 작고 0점 주파수 영역이 상온 대비 작게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 노화가 진행됨에 따라 고온 영역의 경우 0점 주파수 영역이 지속적으로 오른쪽으로 이동함을 확인할 수 있으며, 고전류의 경우 반원의 높이가 증가함을 확인할 수 있다. 즉, 기존 EIS의 정성 분석 기법을 PEIS에 적용할 경우에도 동일한 변화 메커니즘이 발생함을 확인할 수 있으며, 이를 통해 환경 조건을 분류할 수 있음을 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 리튬이온 배터리에 동적 프로파일을 인가하여 수집한 전류/전압 데이터를 단주기 푸리에 변환 알고리즘 기반 시계열 데이터를 주파수 영역으로 변환하였다. 변환한 PEIS 데이터를 기반으로 리튬이온 배터리가 운영된 환경조건을 분석하였으며, 각 환경조건에 따라 PEIS 패턴이 상이하게 나타남을 확인하였다. 향후 해당 환경조건에서 노화된 배터리의 PEIS 패턴을 기반으로 분류기를 설계하여 시계열 데이터만으로 환경조건별 전기화학적 메커니즘을 분류할 예정이다.

본 논문은 한국전력연구원(R23X005-03, ESS향 물리모델-AI 결합 클라우드 기반 BMS 요소기술 개발)과 산업기술평가관리원의 재원으로 인지컨트롤스(No. 20015572, 전기차 급속 충전 및 고출력 운전 대응을 위한 상변화 물질 적용 배터리 팩 열관리 기술 개발)의 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Xiong, Rui, et al. "Lithium-ion battery aging mechanisms and diagnosis method for automotive applications: Recent advances and perspectives." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 131 (2020): 110048.
- [2] Lipu, MS Hossain, et al. "Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook." *Journal of Cleaner Production* 292 (2021): 126044.