

수동 임피던스 왜도 분석 기법 적용 기반 확률 밀도 분포를 통한 배터리 모듈 균형 상태 분석

안중찬*, 이미영*, 김민혁*, 양가람*, 김종훈*

충남대학교 에너지저장변환실험실*

Battery module balance state analysis based on application of passive impedance skewness analysis technique

Jongchan An*, Miyoung Lee*, Minhyeok Kim*, Yang Garam*, Jonghoon Kim*

Energy Storage Conversion Lab. Chungnam National University*

ABSTRACT

본 연구에서는 DC 신호를 AC 신호로 변환하는 STFT(Short time fourier transform; STFT) 신호처리 알고리즘을 통해 임피던스를 도출하여 왜도 기법을 적용하여 배터리 모듈(6S2P) 균형 상태를 분석하는 방법을 제안한다. 이 분석 방법은 기존 DC 데이터 기반 배터리 분석 방법과는 다르게, 전압, 전류 데이터를 시계열 도메인에서 주파수 도메인으로 변환하여 설정된 구간을 기준으로 주파수 계수를 추출하여 임피던스를 산출한다. 이를 통해 배터리 모듈의 균형과 배터리 건강상태(Stage of health; SOH)을 분석한다. 본 논문에서는 평균 값과 표준편차를 정량적으로 도출하여 SOC(Stage of charge; SOC) 영역에 따라 데이터가 평균을 중심으로 떨어진 거리를 통해 배터리의 모듈과 각 개별 셀들의 균형 상태를 분석하였다.

대칭, 비대칭 분포를 분석한다. 그리고 주행 프로파일을 통해 7개의 SOC(Stage of charge; SOC) 영역에서 추출한 임피던스 데이터를 정규화 하여 확률 밀도 분포를 통해 해당 SOC 영역에서 각 셀의 편차 값에 따른 특성들을 분석하였다.

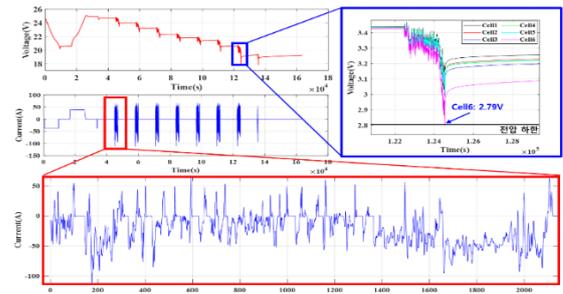


그림1 배터리 모듈(6S2P) 주행 프로파일 실험 결과
Fig.1 Battery module(6S2P) driving profile experiment results.

1. 서론

최근 전기자동차(Electric vehicle; EV) 배터리 화재 사고가 세계적으로 주목받고 있으며, 이는 배터리 관리 시스템(Battery management system; BMS)의 중요성을 강조한다. Allied Market Research에 따르면, 전기자동차 BMS 시장은 2022년 75억 달러에서 2032년까지 410억 달러로 급성장할 것으로 예상되며, 연평균 성장률은 19.1%로 전망된다. 전기자동차의 배터리 팩은 여러 개의 셀이 직렬 또는 병렬로 구성되어 있다. 직렬 구조는 하나의 셀에서 문제가 발생할 경우 전체 배터리 팩의 성능에 영향을 줄 수 있으며, 이로 인한 전압 불균형은 배터리의 효율성 및 수명을 심각하게 저하시킨다. 반면, 병렬 연결된 경우에는 셀 간 전류 불균형이 발생할 수 있어, 각 셀이 겪는 부하 차이가 용량 저하로 이어진다. 이러한 구조적 특성으로 인한 불균형은 전기자동차의 안전성과 신뢰성을 위협하는 중대한 문제로 작용하며, 이를 해결하기 위해 BMS 기술의 고도화가 필수적으로 요구된다. 따라서 본 논문에서는 배터리 성능 저하 및 균형 상태를 진단하는 새로운 접근 방식을 제시한다. 기존 DC 데이터 기반 배터리 불균형 상태 분석 방법은 배터리 내부 화학적특성을 분석하는데 한계점이 있다. 이에따라 전기자동차 주행프로파일 실험을 통해 수집된 전압, 전류 데이터를 신호처리 기법을 적용하여 임피던스를 추출한다. 배터리 모듈 내 각 셀에서 추출된 임피던스의 최대, 최소, 평균을 이용하여 왜도(Skewness)를 통해 데이터의

2. 배터리 모듈 균형 상태 분석 방법

2.1 신호처리 기반 모듈 수동 임피던스 도출

그림 1은 주행 프로파일 실험 결과이며, SOC 97%에서 11%의 간격으로 방전하여 SOC 20%까지 총 7번의 주행 패턴을 진행하였다. SOC 20% 구간에서 Cell 6번이 2.79V으로 방전 하한 전압에 도달하여 실험이 중단되었다. 따라서 Cell 6번의 이상 셀을 통해 배터리 모듈의 균형 상태를 분석하여 불균형 특성이 잘 도출되는지 분석하였다. 즉, 수집된 전류와 전압 데이터를 활용해 수식(1)을 통해 STFT(Short time fourier transform; STFT)의 신호처리 기법을 적용한다. $Z(t, \omega)$ 는 시간과 각주파수 ω 에 대한 신호의 단시간 푸리에 변환 결과이며, $f(t)$ 는 분석을 하려는 시계열 데이터이다. 그리고 $w(t - \tau)$ 는 윈도우 함수로써, 시간 도메인 신호 $f(t)$ 를 특정 시간 간격을 구간 별로 푸리에 변환을 수행할 수 있다. $e^{-j\omega t}$ 는 오일러 공식에 따른 복소 지수 함수로, 푸리에 변환에서 주파수 성분을 추출하기 위해 사용된다. 즉, 주행 프로파일에서 측정된 전류, 전압 신호에 STFT를 적용하여 시간에 따른 주파수 성분 분석을 통해 주파수 계수를 추출하고, 전압과 전류의 비율을 통한 전달함수를 계산하여 임피던스를 산출한다[1].

$$Z(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

2.2 왜도 적용을 통한 모듈 균형 상태 분석 결과

왜도는 확률 분포의 비대칭도를 측정하는 통계적 척도로서, 데이터가 평균값을 중심으로 어떻게 분포하는지를 나타낸다.

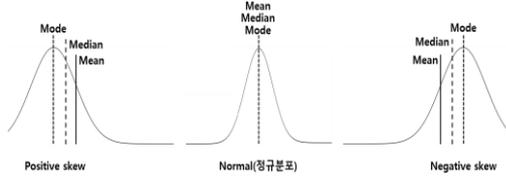


그림2 왜도 분포 분석 개략도

Fig.2 Skewness distribution analysis schematic diagram.

$$S = \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2} \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{3/2}} \quad (2)$$

왜도의 개략도는 그림2와 같다. 왜도가 0인 경우 이상적인 대칭성으로 정규분포를 나타낸다. 왜도가 0이 아닌 경우, 분포는 비대칭성으로 한 쪽 방향으로 치우침을 보인다. 본 논문에서는 식(2)에서 데이터 개수 n 과 데이터 포인트 x_i 의 값이 평균 \bar{x} 에서 얼마나 멀리 떨어져 있는지를 측정한다. 또한, 이를 표준편차로 정규화 하여 데이터가 평균을 중심으로 어떻게 분포하는지를 정량적으로 나타내었다.

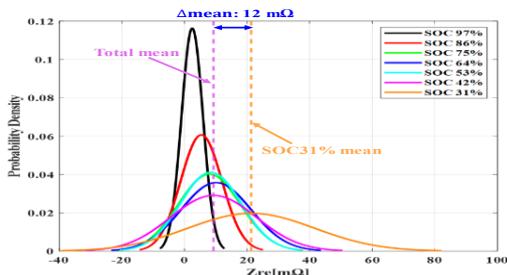


그림3 SOC 영역의 6S2P 모듈 실수부 임피던스 기반 확률 밀도 분포
Fig.3 Battery module(6S2P) real part impedance-based probability density distribution according to SOC area.

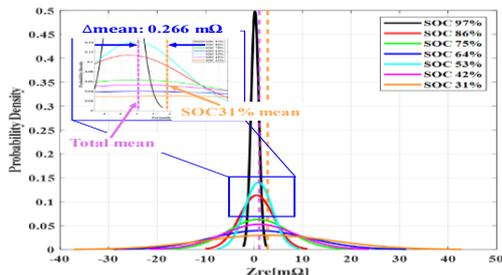


그림4 SOC 영역의 6S2P 모듈 허수부 임피던스 기반 확률 밀도 분포
Fig.4 Battery module(6S2P) imaginary part impedance-based probability density distribution according to SOC area.

그림 3은 6번 이상 셀을 포함한 배터리 모듈(6S2P)의 실수부 임피던스를 각 SOC영역에 대해 정규 분포를 적용하였다. 해당 데이터를 시각적으로 나타내기 위해 확률밀도함수(Probability density function; PDF)를 이용하여 도식화하였다. 왜도를 통해 그래프를 분석한 결과 정규 분포에서는 확률 밀도가 가장 높은 영역이 평균 값이므로 SOC가 감소함에 따라 평균 값이 오른쪽으로 상승하는 특성을 나타낸다. 특히, SOC 31%에서 평균

임피던스는 12mΩ으로 높은 편차를 보였고, 확률밀도가 낮고 넓게 분포하여 데이터가 많이 분산되어 있다는 것을 알 수 있다. 이는 임피던스 편차가 크게 나타나 배터리의 불균형을 예상할 수 있다. 그림 4는 배터리 모듈(6S2P)의 허수부 임피던스를 적용하였다. 실수부 대비 임피던스가 절반 정도 낮으며, SOC 97%에서 높은 확률밀도가 높고 좁게 분포하여 데이터가 평균 값에 밀집되어 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 SOC 31%에서는 낮은 확률 밀도를 보이며 평균과 임피던스 편차가 0.266 mΩ의 차이가 나타나 실수부와 같은 경향성을 나타낸다.

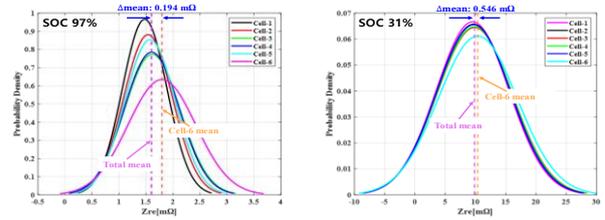


그림5 SOC 영역의 개별 셀의 실수부 임피던스 기반 확률 밀도 분포
Fig.4 Real part impedance-based probability density distribution of individual cells according to SOC area.

그림 5에서는 배터리 모듈(6S2P)의 6개의 개별 셀에 대해 임피던스 균형 상태가 안정적인 SOC 97%와 불안정한 SOC 31%를 비교하였다. SOC 97%에서는 평균 임피던스 값이 1.6mΩ이며, SOC 31%는 9.818mΩ으로 8.218mΩ 만큼 임피던스가 증가했다. 또한 평균 임피던스 기준으로 6번의 이상 셀은 임피던스는 SOC97% 대비 0.352mΩ 증가했다. 따라서 SOC가 감소함에 따라 평균 임피던스가 약 5배가 증가했고, 이상 셀 6번은 평균 임피던스에서 약 1.8배 거리가 증가하여 이는 배터리의 저항이 급격하게 변화함에 따라 배터리 불균형을 예측할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 배터리 모듈(6S2P)의 균형 상태 진단을 위해서 신호처리 기법을 적용하여 수동 임피던스를 통해 왜도 기법을 적용하였다. 데이터를 정규화 하여 확률밀도 분포를 통해 평균값과 표준편차를 기반으로 배터리 상태를 분석하였다. 결과적으로 SOC가 감소함에 따라 배터리의 임피던스 편차가 증가하였고, 해당 시점의 경우 260mV의 전압 편차가 발생하였다. 또한, 주행 프로파일 실험에서 전압 이하(2.8V) 값에 도달하였다. 향후 해당 결과를 통해 이상치에 대한 임계값 설정 기준 기법을 적용시켜 배터리 상태를 단계적으로 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문은 현대자동차(모델 융합형 기술 기반 배터리 상태 진단 기술 고도화 개발)와 한국전력연구원(R23X005-03, ESS향 물리모델-AI 결합 클라우드 기반 BMS 요소기술 개발)의 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Bernhard Liebhart, "Passive impedance spectroscopy for monitoring lithium-ion battery cells during vehicle operation", Journal of Power Sources, Vol. 449, No. 227297, ISSN. 0378-7753, 2020, Feb.