

변동 계수를 활용한 재사용 배터리 팩의 불균형 상태 분석 방안

이평연*, 강덕훈*, 김종훈*
 충남대학교 에너지저장변환실험실*

Analysis method of state-of-balance based on coefficient of variance(CV) of re-use battery pack

Pyeong-Yeon Lee*, Deokhun Kang*, Jonghoon Kim*
 Chungnam National University*

ABSTRACT

재사용을 위한 배터리 팩은 다양한 환경 조건에서 운용된 노화된 배터리 팩이며, 직병렬 조합으로 구성된 배터리 팩은 노화에 따라 셀간 불균형으로 인한 성능 저하는 필연적으로 발생된다. 이 셀간 불균형을 확인하기 위해 일반적으로 최대 셀 전압과 최소 셀 전압의 차이로 배터리 팩 내 불균형을 확인하고 있다. 하지만, 이의 방법은 최대, 최소 셀을 제외하고 다른 셀들의 정보는 미지수이며, 배터리 팩 내 셀들의 전체적인 노화로 인한 불균형인지 또는 한 개 셀로 인한 불균형이 발생하였는지에 대한 정보는 확인할 수 없다. 본 연구에서는 배터리 팩의 셀 전압의 분포에 따른 불균형 상태를 분석하기 위해 통계적 방법인 변동 계수를 적용하여 불균형을 정량화하는 인자를 추출하고 시나리오에 따라 불균형 분석 방법을 제안한다.

1. 서론

전 세계적으로 탄소 중립을 달성하기 위해 전기자동차(Electric vehicle; EV)의 수요가 증가하고 있으며, 수요 증가와 더불어 SNE 리서치에 따르면 향후 폐차 대수가 2030년 411만대에서 2040년 4,227만대로 전망하고 하고 있다. 배터리 용량 기준으로 2030년 338GWh에서 2040년 3,339GWh로 전망하고 있다^[1]. 대량의 폐배터리를 처리하기 위해 배터리의 재사용(Re-use)과 재활용(Recycle)의 연구가 활발히 진행되고 있다. 재사용은 전기자동차에 사용된 배터리 팩을 팩, 모듈 단위로 다시 사용하는 기술이며, 재활용은 셀의 분해를 통해 소재를 추출하는 기술을 의미한다. 재활용에 사용되는 배터리는 성능이 좋고 나쁨에 따라 배터리 내부 소재 추출량이 달라지지 않기 때문에 배터리 제조부터 재활용까지의 생애 전주기 평가 관점에서 탄소 배출 감소를 위해 배터리 수명을 최대한 사용하는 것이 중요하다. 재사용을 위해 한국전지산업협회의 단체 표준인 전기자동차용 리튬이온 배터리 재사용 분류 방법 및 절차를 제공하고 있다. 이 분류 절차에서 배터리 성능을 확인하기 위해 배터리 팩의 용량과 내부 저항을 측정하고 있지만, 배터리 팩은 다수의 셀이 직병렬 조합으로 구성되어 있어 셀의 제조 공차, 운용 환경 등의 차이로 인해 필연적으로 셀간 성능 차이가 발생하게 된다. 이 셀간 성능 차이는 배터리 팩의 성능에 직접적인 영향을 미쳐 가용 용량 및 출력의 감소로 이어질 수 있다. 따라서, 재사용 배터리 팩 내의 셀간 불균형 정도를 확인하는 방법이 필요하다. 일반적으로 셀간 불균형을 확인하기 위

해 배터리 팩 내 최대 셀 전압과 최소 셀 전압 차이를 사용한다. 하지만, 전압 차이를 사용하는 방법은 배터리 팩 내 셀의 전압 분포는 고려되어있지 않아 배터리 팩 내 한 개의 셀에 의한 편차인지 다수의 셀에 의한 편차인지를 확인하기 어려운 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 재사용 배터리 팩의 불균형 정도를 분석하기 위해 변동 계수(Coefficient of variance)를 활용하여 배터리 팩 내의 편차를 정량화하며, 직렬 배터리 팩을 활용하여 불균형 상태를 분석한다.

2. 배터리 팩 불균형 상태 분석 방법

2.1 변동 계수 기반 배터리 팩 불균형 분석 방법

배터리 팩 내부 불균형을 분석하기 위해 식 (1)과 같이 최대 셀 전압($U_{Max\ cell}$)과 최소 셀 전압($U_{Min\ cell}$)의 차이로 편차 정보($U_{deviation}$)를 산출한다. 하지만, 이의 방식은 셀 두 개의 차이만을 나타내는 정보이기 때문에 셀 전체의 분포를 확인하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 배터리 팩 내 셀 전체 분포에 따른 편차를 정량화하기 위해 변동 계수를 활용한 배터리 팩 불균형을 분석한다. 변동 계수는 측정 단위가 다른 두 데이터 집단의 분산도를 비교하기 위해 사용되는 통계적 방법이며, 본 연구에서 셀 전압의 분산된 정도를 정량화하기 위해 사용된다. 여기서, 변동 계수를 산출하기 위한 식은 식 (2)-(4)와 같다. 식 (2)는 셀 전압 평균($\overline{U_{Cell}}$)을 산출하며, n 은 셀의 개수, U_{Cell} 은 셀 전압을 의미한다. 식 (3)은 표준 편차를 산출하는 식이다. 마지막으로 식 (4)는 변동 계수(CV)를 구하는 수식이며, 단위의 영향을 제거하기 위해 평균에 표준 편차를 나누어 산출할 수 있다. 여기서, 실시간으로 셀간 전압을 통해 변동 계수를 산출할 수 있지만, 보다 정확한 편차를 정량화 하기 위해 ESS의 운영 범위를 고려하여 SOC 80%, SOC 50%, SOC 30%에서 변동 계수를 산출하여 비교 및 분석을 수행하였다.

$$U_{deviation} = U_{Max\ cell} - U_{Min\ cell} \quad (1)$$

$$E(U_{Cell}) = \overline{U_{Cell}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{Celli} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{Celli} - E(U_{Cell}))^2} \quad (3)$$

$$CV = \frac{\sigma}{E(U_{Cell})} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_{Celli} - E(U_{Cell})}{E(U_{Cell})} \right)^2} \quad (4)$$

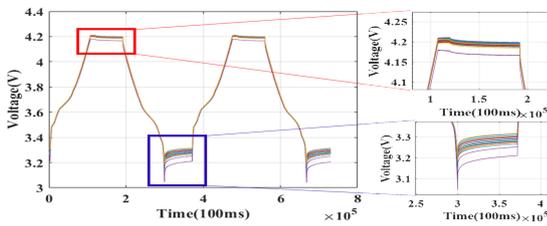
3. 배터리팩 불균형 상태 분석을 위한 검증

3.1 배터리 팩 불균형 상태 분석을 위한 시나리오

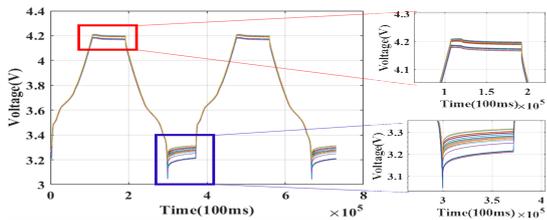
배터리 팩의 불균형 상태를 분석하기 위해 최대, 최소 셀 전압이 동일한 상태에서 분산 정도를 다르게 설정하여 시나리오를 설정하였다. 시나리오에 사용된 시험 데이터는 24S1P 배터리 팩의 만충전과 만방전이 1사이클로 구성되어 반복된다. 첫 번째 시나리오는 그림 1-(a)와 같이 배터리 팩 노화 시험 시 24개 중 1개 셀이 최소 전압을 가지며 다른 셀보다 크게 차이가 있는 상황이며, 두 번째 시나리오는 그림 1-(b)와 같이 24개 중 5개의 셀이 노화가 됨에 따라 최소 셀 전압에 인접하는 상황이다. 마지막으로 세 번째 시나리오는 그림 1-(c)와 같이 24개 중 10개의 셀이 노화가 됨에 따라 최소 전압에 인접하는 상황이다. 3가지 시나리오를 통해 배터리 팩 불균형 상태 분석을 위한 검증을 수행하였다.

3.2 시나리오를 통한 배터리 팩 불균형 상태 분석

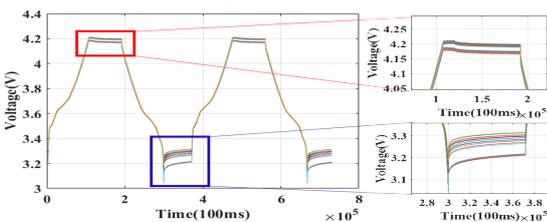
운용 범위를 고려하여 사이클별 3구간의 SOC 조건에서 변동 계수를 산출하였으며, 산출된 변동 계수는 시나리오별로 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 3구간의 SOC는 데이터의 분포에 따라 변동 계수의 경향을 확인하기 위해 추출하였으며 시나리오에 상관없이 초기에는 3구간의 SOC에서의 변동 계수는 비슷한 값을 가지지만 노화가 진행될수록 SOC 80% > SOC 20% > SOC 50% 순으로 변동 계수의 증가 폭이 크게 나타나고 있다. 여기서 운용 영역에서 전압 분포가 가장 뚜렷하게 나타나는 지점은 SOC 80%임을 의미한다. 또한, 3가지 시나리오 모두 셀간 최대, 최소 셀 전압 차이와 비슷한 경향을 보이지만, 셀 간 전압의 분포된 정도에 따라 변동 계수의 크기가 달라짐을 확인하였다. 즉, 동일한 최대, 최소 셀의 전압 차이를 가지



(a) Scenario 1

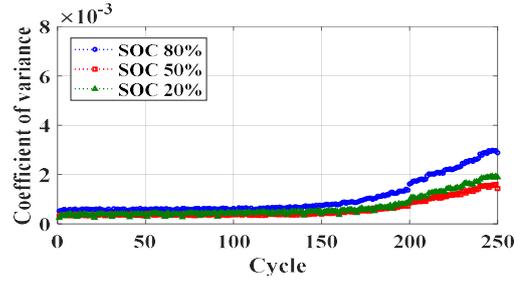


(b) Scenario 2

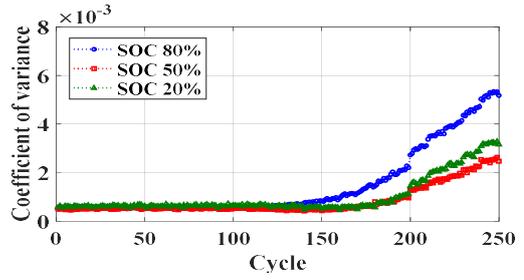


(c) Scenario 3

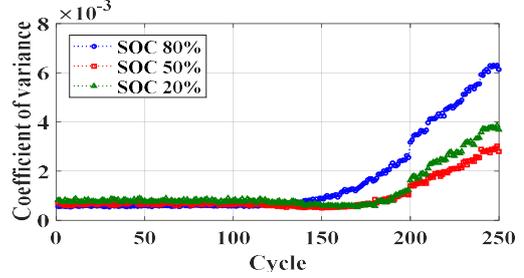
그림 1 배터리 팩 불균형 상태 분석을 위한 시나리오
Fig. 1 Scenarios for analyzing battery pack with inconsistency condition



(a) Scenario 1



(b) Scenario 2



(c) Scenario 3

그림 2 시나리오를 통한 배터리 팩의 불균형 상태 검증
Fig. 2 Verification of inconsistency battery pack according to 3 scenarios

고 있다고 하더라도 산포된 정도에 따라 배터리 불균형 상태를 분석할 수 있으며, 배터리 팩의 셀간 편차 뿐만 아니라 셀 전압의 분포된 정도를 정량적으로 분석이 가능하다.

4. 결론

본 논문은 배터리 팩의 셀간 불균형 상태를 분석하기 위해 통계적인 방법인 변동 계수를 활용하여 최대, 최소 셀 전압 차이뿐만 아니라 분포를 정량화하는 방법을 제안한다. 셀 전압의 분포에 따른 시나리오를 설계하고 제안한 방법의 검증을 수행하였으며, 편차는 동일하더라도 전압 분산 정도에 따라 변동 계수가 커짐을 확인하였다. 향후 이의 지표를 활용하여 재사용 배터리의 등급화에 기여 할 수 있을 것으로 예상된다.

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 에너지기술평가원의 지원(No. 20210501010020, MMC타입 ESS 및 재생에너지 연계 고압형 허브스테이션 핵심기기 개발)과 전력연구원(KEPRI)의 2021년 선정 기초 연구개발 과제 연구비 지원을 받아 수행한 연구과제(R21X001-3)의 연구비 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

- [1] SNE Research, <2023> Recycling/Reuse Technology Trends and Market Outlook (~2040), 2023.02.09