

재사용 배터리 팩 불균형에 따른 변동 계수 기반 SOC 추정 알고리즘 고도화

이성준*, 이평연*, 고보명*, 김종훈*
 충남대학교 에너지저장변환연구실*

Enhancement of State of Charge Estimation Algorithm Based on Coefficient of Variation for Imbalance in Reusable Battery Packs

Sungjun Lee*, Pyeongyeon Lee*, Bomyeong Ko*, Jonghoon Kim*
 Energy Storage Conversion Lab., Chungnam National University*

ABSTRACT

전기자동차의 수요 증가로 인해 향후 발생하게 될 대량의 사용 후 배터리에 대한 연구가 진행되고 있다. 사용 후 배터리는 자원을 효율적인 사용으로 주목받고 있지만, 배터리의 운용 이력에 따라 배터리의 노화 정도가 다르게 나타나며, 배터리 셀간 불균형에 따라 배터리 성능 및 수명에 영향을 미치게 된다. 따라서, 배터리 팩의 효율적이고 안전한 운용을 위해 기존 노화 뿐만 아니라 셀간 불균형을 반영한 배터리 상태 추정 기법이 필요하다. 본 연구에서는 불균형이 발생한 배터리 팩의 분석을 통해 변동 계수(Coefficient of variation; CV) 기반 불균형 지표를 추출하며, SOH와 더불어 불균형 지표를 반영한 SOC(State-of-charge) 추정 알고리즘을 제안한다.

1. 서 론

환경 보호 및 에너지 절약을 위한 노력은 현대 사회에서 중요한 이슈로 부상하고 있다. 환경 오염 문제의 심각성이 증대되면서, 탄소 중립을 향한 노력이 전 세계적으로 확대되고 있다. 이러한 맥락에서 전기자동차(Electric vehicle; EV)는 환경 친화적인 대안으로 주목받고 있으며, 그 수요는 지속해서 증가하고 있다. 이러한 추세로 인해 SNE 리서치^[1]에 따르면, 전기자동차 수요 증가로 인한 폐차 대수는 2030년에 411만 대에서 2040년에는 4,227만 대까지 급증할 것으로 예상된다. 이에 따라 EV에서 사용된 배터리의 처리 문제가 더욱 중요성이 있게 되었으며, 이를 해결하기 위해 재사용(Re-use) 배터리에 대한 연구가 진행되고 있다. 재사용 배터리는 기존에 사용된 전기자동차의 배터리를 다시 사용하는 기술로, 이는 친환경적이며 경제적인 해결책으로 주목받고 있다. 그러나 재사용되는 배터리는 제작된 초기 상태보다 노화가 진행되어 필연적으로 셀 간 불균형이 발생한 상태일 확률이 높다. 직렬 연결 배터리 팩에서 셀 간 불균형이 발생하게 되면 한 개의 셀 또는 다수의 셀의 성능 저하로 인해 배터리 팩의 성능이 저하되는 현상이 발생하게 된다. 배터리 팩 내 셀간 불균형이 발생한 상태에서 운용되면 배터리 수명에도 영향을 미치게 된다. 이러한 이유로 배터리 팩에서의 SOC(State-of-charge) 추정을 위해서는 노화 및 셀간 불균형의 고려가 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 재사용 배터리 팩의 불균형을 반영하기 위해 변동 계수(Coefficient of variation; CV)를 활용하여 셀 간 불균형을 정량화하고, 셀 간 불균형과 SOH를 모두 반영한 SOC 추정 방안을 제안한다.

2. 배터리 팩 불균형 인자 추출 방법

2.1 변동 계수 기반 배터리 팩 불균형 인자 추출

본 논문에서는 통계적 기법인 변동 계수를 사용한 불균형 진단 방안을 제안한다. 변동 계수는 변이 계수 또는 상대 표준 편차로도 표현 가능하며, 데이터에 대한 상대적 변동을 측정하거나 데이터의 산포도를 확인하는데 용이한 방안이다. 식 (1)은 셀 용량의 평균(m)을 산출하기 위한 수식으로, n 은 셀의 개수, U_{Celli} 은 i 번째 셀 용량을 의미한다. 식 (2)는 셀 용량의 표준 편차(σ)를 산출하는 수식이다. 식 (3)은 변동 계수를 산출하는 수식으로 단위계가 같은 표준 편차와 평균을 나누어 단위의 영향을 제거한다^[2]. 이때 변동 계수는 0에 가까울수록 산포도가 크지 않으며 1에 가까울수록 산포도가 커지는 것을 의미한다. 배터리의 경우 셀 간 노화 정도가 다르므로 배터리 팩 노화가 진행되어 셀 간 불균형이 증가할 때 변동 계수의 값이 증가하는 것을 의미한다. 0(안정)~1(불안정)의 변동 계수를 식(4)과 같이 100(안정)~0%(불안정)로 환산하는 수식이며 셀 간 불균형이 증가하여 모듈이 불안정해지는 것을 의미하는 불균형 인자(SOB)로 나타내었다.

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{Celli} \tag{1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_{Celli} - m}{m} \right)^2} \tag{2}$$

$$CV = \frac{\sigma}{m} \tag{3}$$

$$SOB = (1 - CV) \times 100 \tag{4}$$

3. 셀 간 불균형을 고려한 SOC 추정 방안

3.1 제안하는 SOC 추정 알고리즘

SOC 추정 시, 배터리의 초기 용량으로 인한 초깃값 오차가 발생한다. 초기에는 용량이 일치하여 오차가 작지만 배터리의 노화가 진행됨에 따라 배터리의 용량이 감소하여 SOC 추정 오차가 증가하게 된다. 그림 1은 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 *Degradation factor*를 통한 용량 정보 갱신을 나타내는 순서도이며, *Degradation factor*를 초기 용량 값과 곱하여 용량 정보를 수정하여 SOC 추정 정확도를 향상시켰다.

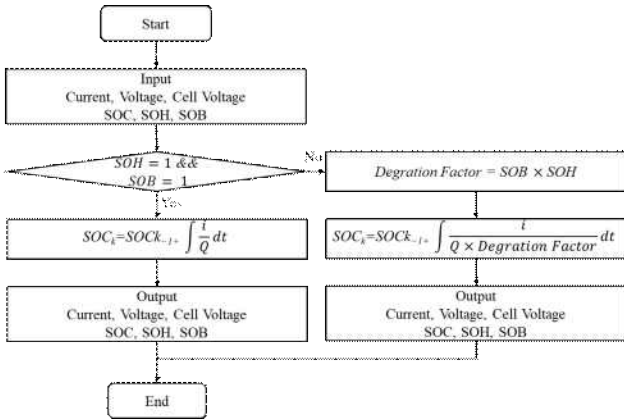


그림 1 제안하는 SOC 추정 방안 순서도
Fig. 1 Flowchart of the proposed SOC estimation method

3.2 제안하는 SOC 추정 알고리즘 검증

제안된 SOC 추정 알고리즘의 정확도를 확인하기 위해 4가지 시나리오를 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째 시나리오는 초기 용량을 적용한 확장 칼만 필터 알고리즘 (Extended Kalman filter; EKF)만을 사용한 SOC 추정 방안이다. 두 번째 시나리오는 초기 용량에 SOH를 반영하여 노화 용량을 활용한 SOC 추정 방안이며, 세 번째 시나리오는 초기 용량에 SOB를 반영한 노화 용량을 사용한 SOC 추정 방안이다. 네 번째 시나리오에서는 초기 용량에 SOH와 SOB를 통해 계산된 *Degradation factor*를 반영하여 노화 용량을 사용한 SOC 추정 방안이다. 알고리즘 검증을 위해 1/3 C-rate로 상한과 하한 전압을 반복해서 도달하는 SOH 94%인 10S3P 재사용 배터리 팩 노화 시험 데이터를 사용하였다. 그림 2은 이러한 SOC 추정 시뮬레이션 결과이다. 그림 2에 보이는 것처럼 노화 용량 반영 전에는 4가지 시나리오 모두 일치하지만, 노화 용량 반영 후에는 노화 용량이 반영되지 않은 EKF SOC의 추정 정확도가 감소한 것을 확인하였다. 그림 3은 시뮬레이션 추정 오차 결과를 나타내었다. 시뮬레이션 결과를 토대로 그림 4에서 시나리오별 SOC 최대 추정 오차율 및 평균 제곱근 오차(Root mean square error; RMSE)를 나타낸 것이다. 각 시나리오에서 SOC 최대 추정 오차율은 각각 약 2.6%, 2.1%, 2.3%, 2.0% 이내이며, RMSE는 약 0.76, 0.66, 0.61, 0.60 이내인 것을 확인했다. 초기 용량을 적용한 EKF SOC 대비 용량 정보를 갱신한 나머지 시나리오의 최대 추정 오차율 및 RMSE가 감소한 것을 확인했다. 특히 Degradation factor를 반영한 네 번째 시나리오의 경우 SOC 최대 추정 오차율은 약 0.6%, RMSE는 약 0.17 감소한 것을 확인하였다.

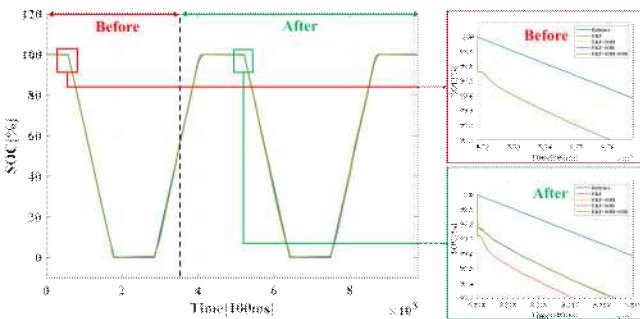


그림 2 SOC 추정 정확도 비교
Fig. 2 SOC estimation accuracy comparison

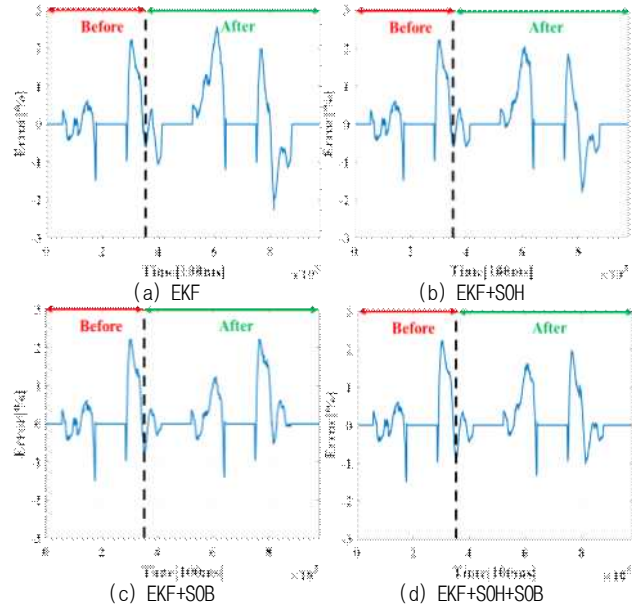


그림 3 알고리즘별 SOC 추정 오차율
Fig. 3 SOC estimation error by algorithm

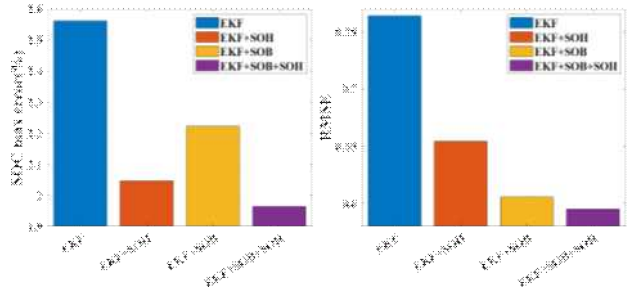


그림 4 SOC 최대 추정 오차율 및 RMSE
Fig. 4 SOC maximum estimation error and RMSE

4. 결과

본 논문에서는 노화 인자를 추출하여 배터리 팩의 SOC 추정 알고리즘을 고도화하는 방안을 제안했다. 배터리 팩의 노화가 진행됨에 따라 동시에 불균형도 발생하는데, 이를 변동 계수를 통해 고려함으로써 추정 정확도를 향상시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 추후 연구에서는 불균형 추정뿐만 아니라 불균형 예측을 통해 잔여 수명 예측 알고리즘의 정확도를 높일 수 있는 연구를 수행할 예정이다.

본 논문은 유라코퍼레이션의 지원(Rigid PCB Pattern Fuse 설계사양 기반 제품설계 및 설계가이드 도출) 및 한국전력연구원(R23X005-03, ESS향 물리모델-AI 결합 클라우드 기반 BMS 요소기술 개발) 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

- [1] SNE Research, <2023> Recycling/Reuse Technology Trends and Market Outlook (~2040), 2023.02.09.
- [2] 이평연, 강덕훈, 김중훈, "변동 계수를 활용한 재사용 배터리 팩의 불균형 상태 분석 방안," 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 616-617, 2023.