

배터리 팩 내부 셀간 편차를 고려하여 안전 상태를 판별할 수 있는 새로운 SOF 알고리즘 제안 연구

김건우*, 신승화*, 이성준**, 강모세***, 백종복***, 김종훈*

충남대학교 에너지저장변환실험실*, 조선대학교 기계시스템미래자동차공학부**, 한국에너지기술연구원***

A study on the proposal of new SOF algorithm suggesting safety state of battery pack considering cell-to-cell deviation

Gunwoo Kim*, Seunghwa Sin*, Sungjun Lee**,

Mose Kang***, Jongbok Baek***, Jonghoon Kim*

Chungnam National University*, Chosun University**, Korea Institute of Energy Research***

ABSTRACT

배터리 팩을 구성하는 단위 셀들은 전기화학적 특성으로 인해 다양한 내부 파라미터들이 동일한 값을 가지지 않고 편차가 있으며, 편차가 심할 경우 과방전 및 과충전의 원인이 될 수 있다. 기존의 연구된 SOF (State-Of-Function) 알고리즘의 경우 SOC (State-Of-Charge), SOH (State-Of-Health)와 같은 파라미터를 하나의 수식으로 정의하여 배터리 팩의 가용 전력을 예측하는 지표로서 사용되어 왔으나, 본 논문에서 제안하는 새로운 SOF 알고리즘은 배터리 팩 내부의 단위 셀간 파라미터들의 편차를 하나의 수식으로 정의하여 배터리 팩의 안전 상태를 나타낼 수 있는 지표로서 활용한다. SOF 알고리즘을 통해 배터리 팩의 안전 상태를 확인하고 검증하기 위해 21700 NMC ($LiNiMnCoO_2$) 계열의 고용량 배터리를 14S40P로 구성된 배터리 팩을 사용했다.

1. 서론

유엔 기후 변화 회의를 통해 채택된 파리 협정으로 인해 전 세계적으로 온실 가스 감축을 위한 화석 연료의 사용량 감소 및 대체 에너지원 개발이 진행 중이다. 이러한 과정에서 리튬이온배터리는 화석 연료를 대체하기 위한 좋은 대안으로써 각광받고 있으며, 현재 전기자동차(EV), 에너지 저장 시스템(ESS), 등과 같이 다양한 어플리케이션에 많이 사용되고 있다. 한 개의 셀이 가지는 에너지 밀도, 전력 밀도, 등 효율성 측면에서 배터리 제조 기술이 크게 발전했지만, 단위 셀만을 사용하여 어플리케이션이 요구하는 사양을 충족시키기에는 부족하다. 따라서 하나의 단위 셀이 아닌, 여러 개의 셀을 직렬 및 병렬로 구성된 배터리 팩이 사용되고 있다. 이때 배터리 팩을 구성하는 단위 셀들은 전기화학적 특성으로 인한 전압, SOC (State-Of-Charge), SOH (State-Of-Health), 저항, 등과 같이 다양한 파라미터들의 불균형이 나타나며, 이는 배터리 팩의 전체적인 효율을 저하시키며, 과충전, 과방전의 원인이 될 수 있다. ESS 화재사고 조사결과 보고서에 따르면, 2019년 9월 강원도 평창에서 발생한 ESS 화재사고의 경우에는 EMS(Energy Management System)에서 저전압, 이상고온, 렉 전압 불균형, 등의 현상이 발생하였으며, 배터리 팩을 구성하는 단위 셀들간의 전압 편차가 400mV 이상 발생한 것을 확인할 수 있다. 따라서 배터리 팩 내부 셀간 편차들을 지속적으로 모니터링하여 현재 배터리 팩의 안전 상태를 확인하는 것이 중요하다.

기존 연구된 SOF 알고리즘은 SOC와 SOH를 하나의 수식으로 정의하여 배터리 팩의 가용 전력을 예측하는 지표로 사용되

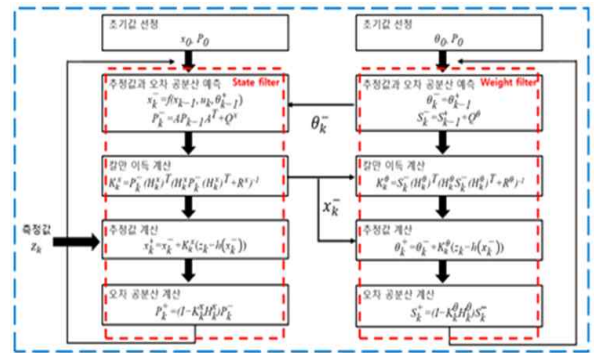


그림 1 이중 확장 칼만 필터의 순서도

Fig. 1 Dual extended Kalman filter flowchart

어 왔으나^[1], 본 논문에서는 배터리 팩을 구성하는 단위 셀들의 내부 파라미터의 편차들을 활용하여 현재 배터리 팩의 안전 상태를 판단할 수 있는 새로운 SOF (State-Of-Function) 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제시하는 SOF 알고리즘은 SOC, SOH, 전압, 저항과 같은 네 가지 파라미터들을 하나의 수식으로 정의하여 배터리의 안전 상태를 판단할 수 있는 지표로서 사용된다. 각각의 파라미터들에 표준 편차를 활용한 가중치를 선정하고, 평균값 대비 편차가 가장 크게 발생한 대푯값을 선정하여 가중치를 곱해줌으로써 각각의 파라미터들의 안전 상태를 확인할 수 있다. SOF 추정 알고리즘을 통해 배터리 팩의 안전 상태를 판단하기 위해 21700 NMC ($LiNiMnCoO_2$) 계열의 고용량 배터리가 14S40P로 구성된 배터리 팩을 사용하였으며, 검증을 위하여 초기 단위 셀간 편차가 크게 나타나는 배터리 팩을 사용하였다.

2. 배터리 팩 내부 셀간 편차 데이터 추출

2.1 이중 확장 칼만 필터를 활용한 SOC, SOH 추정

본 논문에서 배터리 팩 내부 셀간 편차 데이터로써 SOC와 SOH를 사용한다. 배터리 팩을 구성하는 단위 셀들 각각의 SOC와 SOH를 추정하기 위해 이중 확장 칼만 필터를 사용한다. 칼만 필터란 선형시스템의 상태변수를 예측하는 알고리즘이며, 비선형 시스템에 적용하기 위해 고안된 알고리즘이 확장 칼만 필터이다. 이중 확장 칼만 필터는 두 개의 확장 칼만 필터를 병렬로 구성하여 서로 다른 특성을 가지는 두 개의 상태 변수들을 추정할 수 있는 알고리즘이다. 이중 확장 칼만 필터는 그림 1과 같은 순서로 진행된다. SOC는 배터리의 현재 충전상태를 나타내는 지표로, 식 (1)과 같이 정의된다. SOH는 배

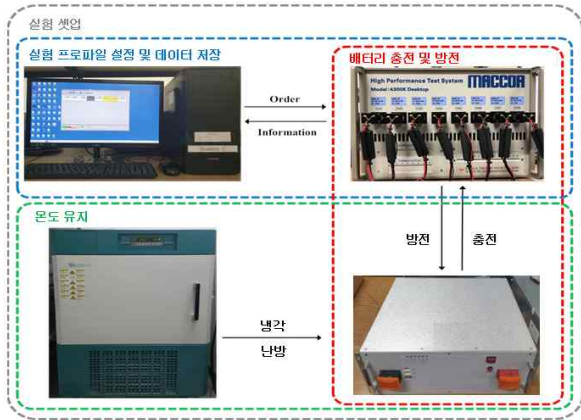


그림 2 실험 셋업
Fig. 2 Test set-up

터리의 수명 상태를 나타내는 지표로, 이중 확장 칼만 필터를 활용하여 추정된 용량값은 식(2)에 표현된 것처럼 SOH로 환산된다. 빠른 시간 안에 값이 변하는 SOC와 다르게 용량은 오랜 시간에 걸쳐 변화하는 변수이며, 용량의 변화에 대해서 정확한 수학적 모델링이 어렵기 때문에 시스템 노이즈를 통해 보정됨을 확인할 수 있다. 일반적으로 배터리의 초기 용량 대비 80%의 용량값을 가질 때 EOL(End Of Life)에 도달했다고 정의하며, 식(2)의 우변 분모에 C_{aged} 로 표현된다. C_{Fresh} 는 배터리의 초기 용량값을 의미하고, $C_{current}$ 는 현재 용량값을 나타낸다.

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \frac{\Delta t}{C_{current}} i_{s,k} \quad (1)$$

$$SOH = \frac{C_{current} - C_{aged}}{C_{Fresh} - C_{aged}} \quad (2)$$

2.2 센싱 데이터 기반 단위 셀 전압 측정

배터리의 충전 상태 및 건강 상태를 나타내는 지표인 SOC와 SOH는 직접적인 측정이 불가능한 반면에, 단위 셀들의 전압은 센서를 사용하여 직접 측정이 가능하다. 전압 편차가 발생한 상황에서 완저 충전 또는 완전 방전시 개별 단위 셀들의 과전압 및 저전압을 고려하지 못할 경우 다음과 같은 위험이 발생할 수 있다. 과전압의 경우 양극과 전해질을 분해하여 가스를 발생시키거나, 열을 발생시킬 수 있으며, 저전압의 경우 음극에 리튬 침적 및 덴드라이트를 형성하여 내부단락의 위험을 초래한다. 따라서 셀간 전압 편차를 SOF 알고리즘의 변수로써 사용한다. 병렬로 구성된 배터리들의 경우 동일한 전압값을 나타내기 때문에 직렬로 구성된 14개의 단위 셀 전압을 측정하여 활용한다.

2.3 전압 데이터 기반 단위 셀 저항 계산

배터리의 저항 또한 전압과 다르게 센서를 통해 직접적인 측정이 불가능하다. 배터리에 전류가 인가되면 전압이 하강하거나 상승하게 된다. 이때의 전압 변화량을 전류값으로 나눈으로써 배터리의 저항을 계산할 수 있다. 저항의 경우 배터리가 노화됨에 따라 크게 영향을 받아 변화가 뚜렷하게 나타나는 파라미터중 하나이다. 배터리의 저항 증가는 방전 전압을 낮추고, 방전 시간을 단축시키며, 배터리 팩의 전력 손실을 유발한다. 이 과정에서 방전 전압이 낮아질 경우, 저전압을 유발할 수 있는 위험이 있기 때문에 SOF 알고리즘의 변수로써 선정하였다. 측정된 14개의 단위 셀 전압을 통해 저항값을 계산하여 알고리즘에 적용할 수 있다.

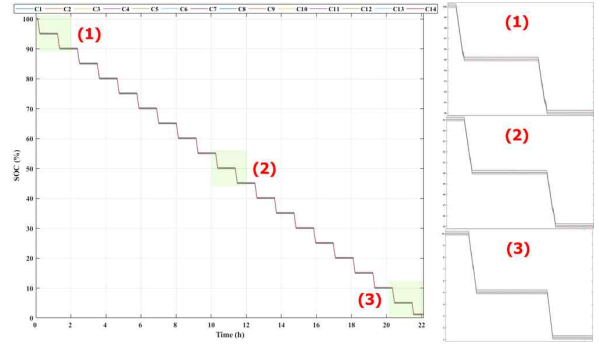


그림 3 SOC 추정 결과 및 구간 별 셀간 편차
Fig. 3 SOC estimation results and cell-to-cell SOC deviation

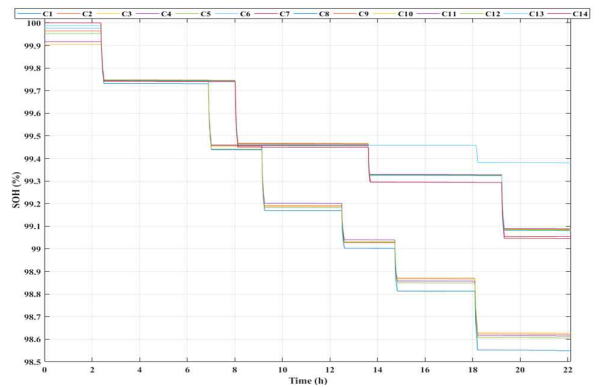


그림 4 SOH 추정 결과 및 구간 별 셀간 편차
Fig. 4 SOH estimation results and cell-to-cell SOH deviation

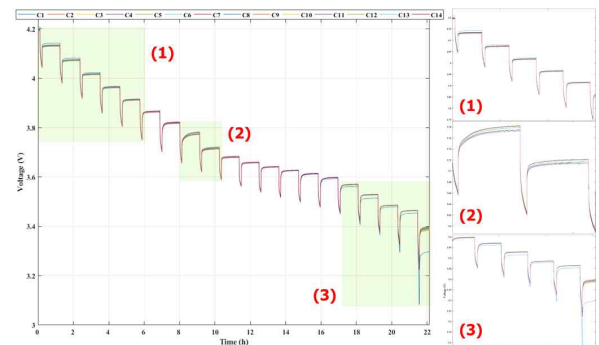


그림 5 셀간 전압 편차
Fig. 5 Cell-to-cell voltage deviation

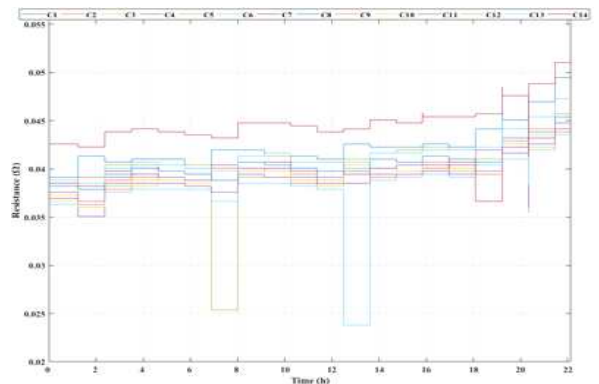


그림 6 셀간 저항 편차
Fig. 6 Cell-to-cell resistance deviation

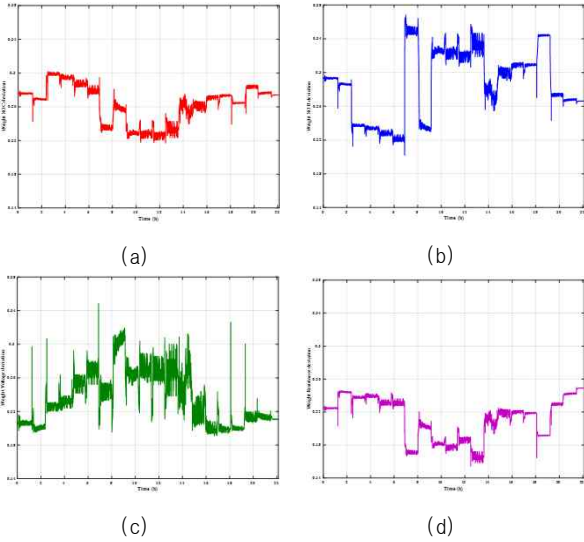


그림 7 파라미터별 실시간 가중치 선정 결과 (a) SOC, (b) SOH, (c) 전압, (d) 저항

Fig. 7 Results of real-time weight selection of each parameters (a) SOC, (b) SOH, (c) Voltage, (d) Resistance

3. 안전 상태 제시를 위한 새로운 SOF 알고리즘

3.1 가중치 선정

SOF의 수식을 구성하는 파라미터들의 가중치를 각각 선정하고, 적용하여 최종적으로 얻은 값을 통해 배터리의 안전 상태를 제시할 수 있다. 가중치는 표준편차를 기준으로 실시간 업데이트되며, 모든 파라미터는 정규화를 통해 데이터의 범위를 0과 1사이의 값을 가지도록 변환된다. 이때 식(3)과 같이 모든 파라미터들의 표준편차의 비율로 가중치를 선정한다. 식(3)의 n은 선정된 파라미터의 개수를 나타내며, std는 파라미터의 표준편차를 나타낸다.

$$weight_{factor_n} = \frac{std_{factor_n}}{\sum_{i=1}^n std_{factor_i}} \quad (3)$$

3.2 대푯값 산정 및 SOF 계산

가중치를 적용되기 위한 각 파라미터들의 대푯값을 선정할 때 평균을 기준으로 가장 큰 편차를 가지는 값을 산출한다. 모든 파라미터들이 편차가 크게 나타나지 않는다면 평균과 비슷한 값을 나타내기 때문에 SOF값은 0에 가까운 값을 나타낼 것이며, 편차가 큰 파라미터는 높은 가중치와 더불어 큰 값을 가져가게 되며 1에 가까운 SOF 값을 나타낸다. 본 논문에서 SOF를 통해 안전 상태를 제시할 때, 50% 미만의 경우 안전, 50% 이상 70% 미만의 경우 경고, 70% 이상 90% 미만의 경우 위험, 90% 이상의 경우 매우 위험으로 정의하였으며, 식(4)와 같이 계산할 수 있다. 식(4)의 x는 대푯값, w는 가중치를 나타낸다.

$$SOF = w_1 \times x_1 + w_2 \times x_2 + w_3 \times x_3 + w_4 \times x_4 \quad (4)$$

4. 배터리 팩 실험 결과

배터리 팩을 구성하는 단위 셀들의 파라미터들을 산출하기 위한 실험 셋업은 그림 2와 같다. 배터리의 충방전기에 실험 프로파일을 적용하고, 실험 결과를 저장하기 위한 PC, 명령을 받아 배터리를 충전 또는 방전을 진행하는 충방전기, 배터

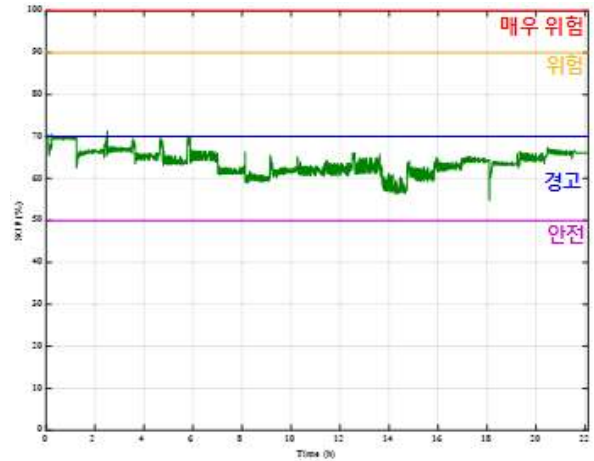


그림 8 SOF 추정 결과

Fig. 8 The results of SOF estimation

리의 외기 온도를 상온으로 유지시켜주기 위한 온도 챔버가 사용되었다. SOF 알고리즘의 검증에 위해 셀간 파라미터 편차가 큰 배터리 팩을 사용하였다. 그림3, 4, 5, 6은 각각 검증 프로파일에서 측정된 셀간 파라미터 편차를 나타내는 그래프이며, 그림 7은 각각의 파라미터들의 표준편차를 활용하여 실시간으로 가중치를 선정한 결과이다.

5. SOF 추정 알고리즘 시뮬레이션 결과

검증 프로파일은 배터리가 완전 충전 상태에서 완전 방전 상태까지 SOC를 5%씩 감소시키면서 각각의 방전 이후에 두 시간의 휴지기간을 적용한 프로파일이다. SOF 알고리즘에 사용된 네 개의 파라미터들의 편차가 큰 데이터를 사용했기 때문에 평균 63.9%의 SOF값을 가지며, 초기 셀간 편차가 크게 나타나기 때문에 안전 구간이 아닌 경고 구간에서의 SOF 값이 나타났다. 또한 완전 충전 구간에서 최대값 71.29%를 나타내면서 배터리 팩이 위험한 상황을 확인할 수 있다.

6. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 배터리의 가용 전력을 예측하는 기존의 SOF 추정 알고리즘과는 다르게 단위 셀들의 내부 파라미터들을 하나의 수식으로 정의하고, 가중치를 적용하여 배터리 팩의 안전 상태를 제시하는 알고리즘을 제안한다. 배터리 팩을 구성하는 단위 셀들의 파라미터들을 정규화를 통해 표준편차를 구하고, 이 표준편차의 비율을 통해 각 파라미터에 적용할 가중치를 산출한다. 계산된 SOF값을 통해 배터리의 안전 상태를 확인할 수 있으며, 안전을 위협하는 원인을 확인할 수 있다. 향후 연구 방향으로는 안전도를 제시하는 기준에 대한 타당성을 제시하여 본 논문에서 제시하는 알고리즘을 통해 산출되는 안전 상태의 기준에 대한 신뢰성을 확보하는 것이며, 배터리 팩의 안전 상태를 판단함에 있어서 다양한 파라미터를 추가하여 신뢰성을 보장할 수 있는 알고리즘을 제시하는 것이다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20182410105280)
본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20011596)

참고 문헌

[1] Cabrera-Castillo, Eliud, Florian Niedermeier, and Andreas Jossen. "Calculation of the state of safety (SOS) for lithium ion batteries." *Journal of Power Sources* 324 (2016): 509-520.