

사용 후 배터리 건강 상태 신속 추정을 위한 다중 건전성 지표 추출 및 엔트로피 가중치 방법 기반 알고리즘 개발

이동철*, 이평연*, 공태현*, 국강현*, 김종훈*
충남대학교 에너지저장변환연구실*

Development of Algorithms Based on Multiple Health Indicators Extraction and Entropy Weight Method for Rapid Estimation of Used Battery State of Health

Dongcheol Lee*, Pyeongyeon Lee*, Taehyeon Gong*, Ganghyeon Kook*, Jonghoon Kim*
Energy Storage Conversion Lab., Chungnam National University*

ABSTRACT

본 논문은 사용 후 배터리의 SOH 신속 추정을 위해 부분 방전하여 추출된 다중 건전성 지표(Health indicator; HI)를 활용한 다중 HI 회귀 모델을 제안한다. 최적의 부분 방전 구간과 다중 HI를 선정하기 위해 피어슨 상관관계수(Pearson correlation coefficient; PCC)를 사용하였다. 또한 비선형적인 다중 HI의 가중치를 산정하기 위해 엔트로피 가중치 방법(Entropy weight method; EWM)을 적용하였다. EWM 기반 다중 HI 회귀 모델을 설계하여 INR21700-33j 검증용 셀 3개로 SOH 추정 성능 및 소요 시간을 비교 분석하였다. EWM 기반 다중 HI의 SOH 추정 오차 및 소요 시간은 모두 1% 미만, 10분 이내이며 소요 시간과 SOH 추정 성능은 Trade-off 관계임을 확인하였다.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 이상기후 발생률이 증가하고 있다. 산업화 이전과 비교했을 때 이산화탄소(CO₂) 농도가 급격히 높아지면서 지구 온난화가 심각한 문제로 대두되고 있다. 이에 따라 화석 연료를 대체하고 탄소 중립 등 친환경 에너지로의 전환이 필수적으로 요구되며 에너지 수요를 충족시키기 위한 새로운 방법들이 강조되고 있다. 여러 대안 중 리튬이온 배터리(Lithium-ion battery; LIB)가 주목받고 있으며 높은 에너지 밀도와 긴 배터리 수명을 가지고 있어 전기 자동차(Electric vehicle; EV)에 널리 사용되고 있다. 이에 따라 리튬이온 배터리 기반 EV 수요가 급증하면서 사용 후 배터리 시장 규모도 지속적으로 성장할 것으로 예상된다. 증가하는 사용 후 배터리를 적절하게 처리하지 않고 방치하거나 매립·소각할 경우 환경오염을 초래할 수 있다. 그렇기에 사용 후 배터리팩 내 모듈 일부를 수리 및 교체해 EV에 다시 탑재하여 재제조하거나 에너지저장장치(Energy storage system; ESS) 등으로 재사용된다. EV에서 수거된 사용 후 배터리를 재제조 및 재사용이 가능한 순환 자원으로 지정하고 제품으로 취급하기 위해선 성능 평가를 거쳐야 한다. 사용 후 배터리 성능 평가를 위해 배터리 건강 상태(State of health; SOH) 검사를 진행한다. 배터리 SOH 검사 방법은 기본적으로 완전 방전을 통해 수행되며 상온(25°C)에서 정격 용량에 해당하는 C/3의 정전류 방전율로 용량을 측정한다. 해당 검사 방법은 SOH 추정 정확도는 가장 우수하지만, 비용이 매우 많이 들고 2~3일 정도 긴 시간이 소요되는

단점이 존재한다. SOH 추정 정확도와 소요 시간은 Trade-off 관계이기에 증가하는 사용 후 배터리 시장에 따라 모든 배터리의 SOH를 완전 방전을 통해 추정하는 것이 어려운 상황이다. 따라서 사용 후 배터리 사업의 경제성을 확보하기 위해서는 정확하고 빠른 SOH 추정 방법이 무엇보다 중요하다. SOH 추정 정확도는 유지하면서 소요 시간은 줄일 방법을 제안하기 위해 본 연구는 배터리 부분 방전 과정에서 발생하는 전압, 전류 정보를 기반으로 열화 상태를 간접적으로 나타내는 건전성 지표(Health indicator; HI)를 추출하여 SOH를 신속 추정한다. HI는 MVF(Mean voltage fall-off), VIEDTD(Voltage interval of equal discharging time difference) 및 TIEDVD(Time interval of equal discharging voltage difference)를 추출하였다. 또한 HI를 추출할 때 완전 방전하면 시간과 비용이 증가하기에 부분 방전을 통해 HI를 추출하는 것이 실용적이며 효과적이다. 배터리 열화 정도를 적절하게 대변할 수 있는 최적의 부분 방전 구간을 파악하기 위해 여러 부분 방전 구간에서 다양한 HI를 추출하고 SOH와의 상관성을 평가하기 위해 피어슨 상관관계수(Pearson correlation coefficient; PCC)를 사용하였다. PCC를 통해 선정된 HI를 활용하여 다중 HI 회귀 모델을 설계하고 SOH 추정 성능과 소요 시간을 비교 분석하였다. 하지만 선정된 다중 HI가 비선형적인 특성을 가지는 경우, SOH와의 선형 관계를 제대로 반영하지 못한다. 따라서 비선형적인 관계를 분석하는 엔트로피 가중치 방법(Entropy weight method; EWM)을 적용하였다^[1]. EWM은 비선형적인 다중 HI를 분석하고 엔트로피가 낮은 HI에 높은 가중치를, 엔트로피가 높은 HI에 낮은 가중치를 부여하여 EWM 기반 다중 HI 회귀 모델을 통해 SOH 신속 추정 성능 및 소요 시간을 비교 검증하였다.

2. 배터리 SOH 신속 추정을 위한 실험 구성

2.1 배터리 전기적 특성 실험 구성

본 연구에서 사용 후 배터리 SOH 신속 추정을 위한 다중 선형 회귀 모델 설계를 위해 Samsung INR21700-33J 셀을 사용하였다. 배터리 열화 실험을 위해 상온(25°C)의 챔버에서 CC-CV(Constant current-constant voltage) 충전 및 CC(Constant current) 방전을 수행하였다. 실험 구성도는 그림 1에 나타내었다. 총 738 Cycle의 열화 진행 후 SOH를 계산하였다. SOH는 식 (1)과 같이 계산한다. $C_{present}$ 는 현재 용량을 의미하며, $C_{initial}$ 는 초기 용량을 나타낸다.

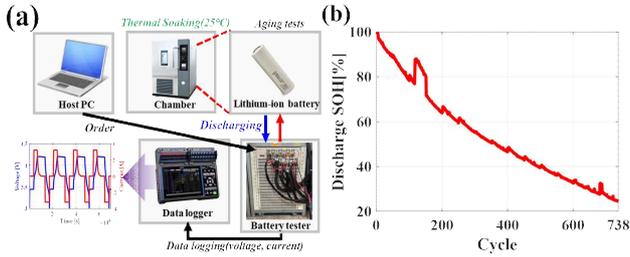


그림 1 (a) 배터리 전기적 특성 실험 구성도, (b) 방전 용량
Fig. 1 (a) Experiment configuration for electrical characteristics test, (b) Discharge capacity

C_{aged} 는 초기 용량의 80%이며 $C_{present}$ 가 초기 용량의 80%까지 열화가 진행되면 SOH는 0이 된다.

$$SOH_{capacity} (\%) = \frac{C_{present} - C_{aged}}{C_{initial} - C_{aged}} \times 100\% \quad (1)$$

3. 사용 후 배터리 건강 상태 신속 추정을 위한 건전성 지표 선정

3.1 SOH 추정을 위한 HI 추출

사용 후 배터리 건강 상태 신속 추정을 위해 본 논문은 전기적 특성 실험을 통해 수집된 738 Cycle의 방전 구간에서 HI를 추출하였다. HI는 열화에 따른 배터리 SOH를 반영하며 저항 및 용량 성분으로 분류할 수 있다. 배터리 열화가 진행될수록 내부 저항이 증가하여 단자 전압이 상승하는 현상을 반영한 저항 성분의 HI인 MVF, VIEDTD를 추출하였다. MVF는 특정 방전 구간 내에서 도출된 전압 강하 평균이며 VIEDTD는 특정 방전 구간의 시작점과 끝 지점의 전압 차이이다. 또한 열화가 진행될수록 배터리 가용 용량이 감소하여 특정 방전 구간에서 소요되는 방전 시간이 감소하는 현상을 반영한 용량 성분의 HI인 TIEDVD를 추출하였다. TIEDVD는 특정 방전 구간에서 소요되는 방전 시간을 나타낸다. 저항 및 용량 성분의 HI 추출 방법은 그림 2와 식 (2) ~ (4)에 나타내었다.

$$MVF = \frac{\sum_{i=1}^N (V_0 - V_i)}{N} \quad N = |t_1 - t_2| \quad (2)$$

$$VIEDTD = |V_{t_1} - V_{t_2}| \quad (3)$$

$$TIEDVD = |t_1 - t_2| \quad (4)$$

3.2 부분 방전 구간 별 피어슨 상관계수 및 HI 선정

배터리 SOH를 추정하기 위해 완전 방전을 수행하여 추출된 HI를 활용하면 높은 SOH 추정 성능을 확보할 수 있다. 하지만 완전 방전을 수행하는데 소요되는 시간은 오래 걸리며 충방전 비용 또한 증가하게 된다. 그렇기에 SOH 추정 성능을 어느 정도 확보하면서 신속하게 HI를 추출하는 것이 중요하다. 이를 위해 완전 방전이 아닌 부분 방전을 수행하여 HI를 추출하였다. 본 논문은 부분 방전 구간을 12가지로 나눠서 분석하였다. 부분 방전 시작 전압을 4.1V부터 0.1V씩 감소시켜 3.6V까지 설정하고, 해당 전압에서의 방전 시간을 5분과 10분으로 구분하여 총 12개의 부분 방전 구간에서 MVF, VIEDTD, TIEDVD를 추출하였다. 각 방전 소요 시간(5분, 10분)에 따른 최적의 부분

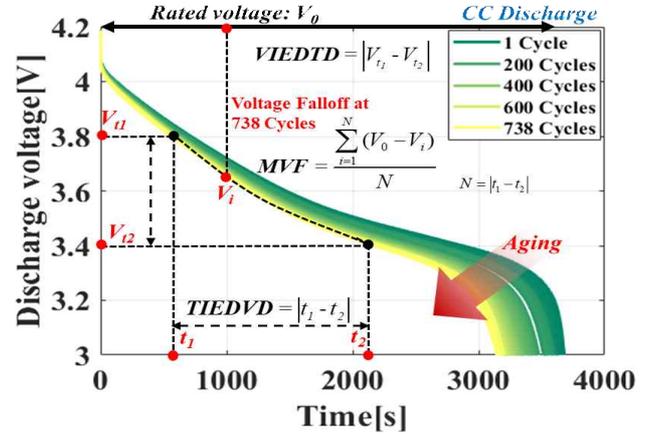


그림 2 사이클 별 방전 곡선에서의 HI 추출 방법
Fig. 2 HI extraction method in cycle-specific discharge curves

표 1 사이클에 따른 부분 방전 구간 별 피어슨 상관계수
Table 1 Pearson correlation coefficient for each partial discharge interval according to the cycle

No.	Interval	MVF	VIEDTD	TIEDVD
1	4.1V-5min	0.89	0.916	0.92
2	4.0V-5min	0.914	0.931	0.933
3	3.9V-5min	0.936	0.944	0.951
4	3.8V-5min	0.915	0.938	0.948
5	3.7V-5min	0.9	0.925	0.94
6	3.6V-5min	0.892	0.906	0.925
7	4.1V-10min	0.922	0.925	0.946
8	4.0V-10min	0.937	0.94	0.956
9	3.9V-10min	0.941	0.962	0.972
10	3.8V-10min	0.938	0.955	0.967
11	3.7V-10min	0.912	0.951	0.962
12	3.6V-10min	0.911	0.942	0.955

방전 구간에서의 HI를 선정하기 위해 PCC 기법을 사용하였다. PCC 기법은 두 변수 간 선형적인 상관관계를 수치화하는 방법으로, 상관계수는 +1과 -1 사이의 값을 가진다. 두 변수의 상관성이 높을수록 상관계수는 절댓값 1에 가깝고 선형적인 상관관계가 없으면 0에 가깝다. 상관계수 분석 결과는 표 1에 나타내었으며 3.9V에서 5분 방전 시에 추출된 MVF는 0.936, VIEDTD는 0.944, TIEDVD는 0.951로 가장 높았다. 또한 3.9V에서 10분 방전 시 추출된 MVF는 0.941, VIEDTD는 0.962, TIEDVD는 0.972로 가장 높았다. 따라서, 3.9V에서 5분 및 10분 방전 시에 상관계수가 높았던 상위 2개의 HI인 VIEDTD와 TIEDVD를 최종적인 다중 HI로 선정하였다.

3.3 엔트로피 가중치 방법을 적용한 최적 다중 HI

선정된 다중 HI가 비선형적인 특성을 가지는 경우, SOH와의 선형 관계를 제대로 반영하지 못하기에 비선형적인 관계를 분석하여 각 다중 HI에 가중치를 부여하는 기법이 필요하다. 따라서 선정된 다중 HI에 섀넌(Shannon)의 정보이론을 기반으로 한 EWM을 적용하여 비선형적인 다중 HI를 분석하고 엔트로피가 낮은 HI에 높은 가중치를, 엔트로피가 높은 HI에 낮은 가중치를 부여하였다. 가중치가 높게 산정되는 HI는 주요 HI로 평가된다. n 은 사이클에 따른 부분 방전 구간에서 추출한 HI 개수이고, m 은 가중치를 산정할 다중 HI 개수이다. 먼저 사이클에 따른 다중 HI를 식 (5)와 같이 행렬(D)로 표현 후 식

(6)과 같이 Min-max normalization 정규화를 수행한다. 다중 HI를 정규화한 후 각 다중 HI의 엔트로피값을 산출하기 위해 식(7), (8)과 같이 계산한다. 계산된 엔트로피값 기반으로 식 (9)를 통해 다중 HI의 다양성(d_j)과 가중치(w_j)를 산정하였다. 3.9V에서 5분 및 10분 방전 시 상관계수가 높았던 상위 2개의 다중 HI인 VIEDTD와 TIEDVD의 가중치를 표 2에 나타내었다.

$$D = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,j} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{i,1} & \dots & x_{i,j} \end{pmatrix} \quad x_{ij} = (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m) \quad (5)$$

$$norm_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (6)$$

$$p_{i,j} = \frac{norm_{i,j}}{\sum_{i=1}^n norm_{i,j}} \quad (7)$$

$$E_j = - \frac{\log(n)}{\sum_{i=1}^n p_{i,j} \ln p_{i,j}} \quad (8)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (d_j = 1 - E_j) \quad (9)$$

표 2 최적 다중 HI 엔트로피 가중치 결과
Table 2 Optimal multiple HI entropy weight results

Time	Entropy Weight(w_j)	
	VIEDTD(w_2)	TIEDVD(w_3)
5min	0.877	0.123
10min	0.121	0.879

4. 사용 후 배터리 건강 상태 신속 추정 모델

4.1 EMW 기반 다중 HI 회귀 모델 소개

INR21700-33J 셀 3개를 사용 후 배터리로 가정하여 EWM 기반 다중 HI 회귀 모델을 검증하였다. 선정된 부분 방전 구간에서 검증용 셀 3개를 방전하여 수집되는 전압, 전류 데이터가 모델에 입력되면 해당 배터리 성능을 대변하는 다중 HI가 추출된다. 추출된 다중 HI는 모델 내 전기적 특성 실험으로부터 설계된 다중 HI Lookup table과 비교하여 유사한 HI에 해당되는 SOH가 출력된다. 이렇게 출력된 SOH가 산정된 가중치에 의해 융합 SOH가 최종적으로 도출된다. EMW 기반 다중 HI 회귀 모델 흐름도는 그림 3에 나타내었다.

4.2 소요 시간 대비 EMW 기반 다중 HI SOH 추정 성능 분석

선정된 부분 방전 구간에서 검증용 셀 3개를 5분 방전하여 추출된 HI의 SOH 추정 성능 오차는 MVF(4.21%, 4.319%, 3.704%), VIEDTD(0.31%, 0.33%, 0.38%), TIEDVD(0.744%, 0.467%, 0.766%), EWM(0.176%, 0.235%, 0.244%)과 같이 산출되었다. 그리고 10분 방전하여 추출된 HI의 SOH 추정 성능 오차는 MVF(1.406%, 1.377%, 1.394%), VIEDTD(0.51%, 0.283%, 0.334%), TIEDVD(0.39%, 0.117%, 0.286%), EWM(0.286%, 0.069%, 0.212%)과 같이 산출되었다. HI를 추출하기 위해 소요된 시간이 길어질수록 SOH 추정 성능은 향상되었고 소요 시간과 성능의 Trade-off 관계를 확인하였다.

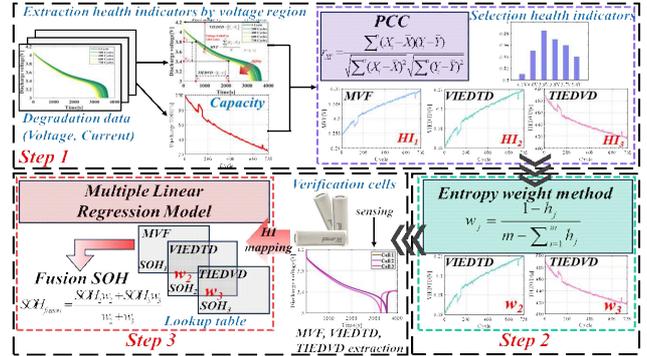


그림 3 EWM 융합 SOH 신속 추정 흐름도
Fig. 3 EWM fusion SOH rapid estimation flowchart

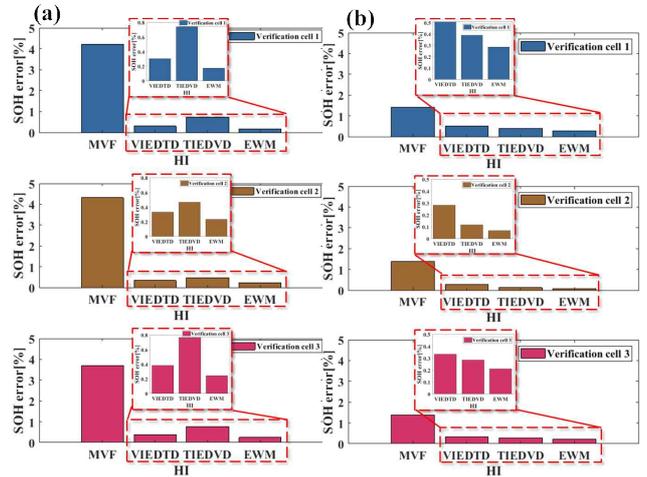


그림 4 소요 시간 (a) 5분, (b) 10분 별 EWM 기반 다중 HI 회귀모델 SOH 신속 추정 오차
Fig. 4 Time required (a) 5 minutes and (b) 10 minutes of EWM-based multiple HI regression model SOH rapid estimation error

5. 결론

증가하는 사용 후 배터리의 SOH 신속 추정을 위해 완전 방전이 아닌 부분 방전을 하였다. 여러 부분 방전 구간에 따른 방전 소요 시간(5, 10분) 별 추출된 MVF, VIEDTD, TIEDVD의 HI 중 PCC 기법을 통해 3.9V에서 5, 10분 방전한 VIEDTD, TIEDVD를 다중 HI로 선정하였다. 사이클에 따른 비선형적 거동을 반영하기 위해 EWM 기반 가중치를 산정 후 최종적으로 EMW 기반 다중 회귀 모델을 설계하였다. 검증용 셀 3개를 통해 제안된 SOH 신속 추정 모델을 검증하였고 EMW 기반 다중 HI의 추정 성능이 모두 0.3% 이내임을 확인하였다. HI를 추출하기 위한 소요 시간과 SOH 추정 성능은 Trade-off 관계이므로 장단점을 분석하여 핵심 요소를 결정하는 것이 중요하다.

본 논문은 현대자동차(모델 융합형 기술 기반 배터리 상태 진단 기술 고도화 개발)와 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(No. 2022-1711152629, 대규모 분산 에너지 저장장치 인프라의 안전한 자율운영 및 성능 평가를 위한 지능형 SW 프레임 워크 개발)의 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

[1] He, Ning, et al. "A fusion framework for lithium-ion batteries state of health estimation using compressed sensing and entropy weight method." ISA transactions 135 (2023): 585-604.