

배터리 열화 예측을 위한 Stress model 기반 열화 모델 설계 방안 연구

신승화*, 조상우*, 이상력*, 김종훈*
 충남대학교 에너지저장변환연구실*

A study on the design of the stress model-based degradation model for battery degradation prediction

Seunghwa Sin*, Sangwoo Cho*, Sangryuk Lee*, Jonghoon Kim*
 Energy Storage Conversion Lab., Chungnam National University*

ABSTRACT

리튬이온 배터리의 열화는 비선형적으로 발생하므로 용량 예측에 어려움이 따른다. 배터리 용량 예측을 위해 인공지능 모델이 주목받고 있다. 데이터 기반의 인공지능 모델은 학습 데이터의 양과 질이 중요하다. 하지만 배터리의 변동적인 실제 동작 환경으로 인해 사이클에 따른 학습 데이터를 형성하는데 제한된다. 또한 운용 범위를 고려한 학습 및 예측에 사용될 인자 선정이 요구된다. 따라서 랜덤 포레스트를 통해 학습 데이터를 확장하여 한정적인 학습 데이터를 보완하고, 용량 예측을 위한 중요 인자를 선정한다. LSTM은 보완된 학습 데이터를 학습하고, 중요 인자에 대한 용량 예측을 진행한다.

1. 서론

세계적으로 탄소 배출량을 줄이기 위한 친환경 정책이 도입되면서, 리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도와 긴 수명 등의 장점으로 인해 주목받고 있다. 그러나 리튬이온 배터리는 보관 및 사용 환경에 따라 성능이 저하되는 현상이 나타날 수 있다. 리튬이온 배터리의 경우, 현재 용량이 초기 용량 대비 약 80%에 도달하면 배터리의 수명 임계점(End-of-life; EOL)에 도달했다고 판단한다. EOL에 근접한 배터리는 용량이 급격하게 감소하며, 이로 인해 어플리케이션에서 갑작스러운 중단이나 폭발과 같은 사고가 발생할 수 있다. 따라서 어플리케이션을 효율적이고 안정적으로 운용하기 위해서는 배터리의 정확한 용량 감소 예측이 필요하다. 하지만 배터리의 현재 용량 상태를 추정하는 것이 아닌, 미래 시점의 열화에 따른 배터리 용량 감소를 예측하는 것은 다양한 요인을 고려할 필요가 있다. 배터리의 실제 운용 환경에서는 배터리의 내부 온도가 즉각적으로 변화하며, 배터리의 온도는 배터리 내부 상태에 큰 영향을 미친다. 또한, 배터리의 충전 상태(State-of-charge; SOC)의 범위 및 방전 깊이(Depth-of-discharge; DOD) 그리고 전류 크기(C-rate) 등이 계속 변화한다. SOC 범위, DOD, C-rate, 온도 등은 배터리 열화에 영향을 미치는 열화 인자(Stress factor)로 알려져 있다. 이러한 요인들로 인해, 보유하고 있는 소량의 데이터를 활용하여 미래의 배터리 열화를 예측하는 것은 현재 배터리의 용량을 추정하기보다 어렵다. 따라서 본 논문에서는 배터리의 다양한 운용 조건을 고려한 열화 실험을 진행하고, 이를 기반으로 배터리 열화에 영향을 미치는 열화 인자에 대한 Stress model을 설계한다.

실험 채널	1	2	3	4	5	6
종류	DOD	DOD	DOD	C-rate	C-rate	C-rate
Level	L	M	H	L	M	H
조건	20%	50%	80%	0.5C	1C	2C

30% ~ 80% (평균 55%)

그림 1 배터리 열화 실험 조건
 Fig. 1 Battery degradation experiment conditions

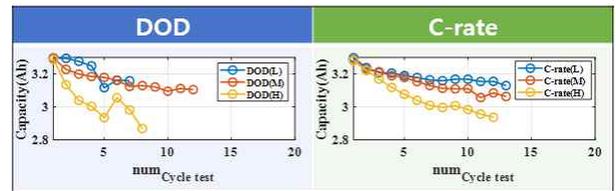


그림 2 배터리 열화 실험 조건 별 결과
 Fig. 2 Results of degradation experiment conditions

2. 배터리 열화 실험

Stress model은 열화 인자가 배터리 열화에 미치는 영향성을 나타낼 수 있다^[1]. Stress model 설계를 위해, 다양한 운용 환경을 고려한 열화 실험을 한다. 운용 환경은 열화 인자의 다양한 조합을 통해 모사한다. 본 논문에서 고려한 열화 인자는 DOD와 C-rate이다. 각 열화 인자 별로 3가지의 Level을 설정하였다. 설정한 배터리 열화 실험 조건은 그림 1과 같다. DOD 열화 실험의 경우, C-rate는 1C로 고정하였다. C-rate 열화 실험의 경우, DOD는 50%로 고정하였으며 평균 SOC는 55%에 해당한다. 따라서 열화 실험의 1 사이클은 SOC의 전 범위를 포함하지 않으므로, 20 사이클마다 용량 측정 실험을 별도로 진행하였다. 20 사이클마다 측정된 열화 실험의 용량은 그림 2와 같다. 하지만 열화 실험에서 1 사이클에 대한 기준이 다르므로, 사이클의 기준을 통일하기 Equivalent full cycles(EFC)를 적용하였으며 그림 3과 같다^[2]. DOD의 조건에 따라 사이클 수가 변화하는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 DOD가 100%일 경우를 1 사이클로 통일하였다. EFC를 적용한 열화 실험 결과는 그림 4와 같다.

실험 종류	조건	SOC range	Cycle		Cycle(EFC)
	20%	20% ~ 100%	50 x (12) = 600	0.8배	480
DOD	50%	50% ~ 100%	50 x (12) = 600	0.5배	300
	80%	80% ~ 100%	50 x (11) = 550	0.2배	110
C-rate	0.5C	30% ~ 80%	50 x (6) = 300	0.5배	150
	1C	30% ~ 80%	50 x (11) = 550	0.5배	275
	2C	30% ~ 80%	50 x (7) = 350	0.5배	175

그림 3 사이클 기준 통일을 위한 EFC 적용 과정
Fig. 3 Process of applying EFC

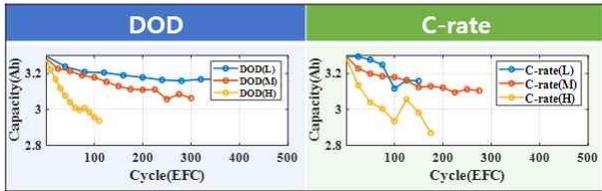


그림 4 열화 실험 데이터의 EFC 적용 결과
Fig. 4 Results of applying EFC to experiment data

3. Stress model 및 열화 모델 설계

배터리의 SOH는 사이클이 진행됨에 따라 감소하며, 이를 표현하기 위한 열화 모델은 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SOH = p_{SEI} \cdot e^{-r_{SEI} \cdot f_d} + (1 - p_{SEI}) \cdot e^{-f_d} \quad (1)$$

p_{SEI} , r_{SEI} 는 배터리의 고체 전해질 계면층(Solid electrolyte interphase; SEI) 형성으로 인한 열화 경향성을 나타내며, 이들에 대한 용량 커브의 피팅을 통해 추출할 수 있다. f_d 는 배터리의 열화율을 의미하며, 수식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_d = S_{DOD}(DOD) \cdot S_C(C) \quad (2)$$

배터리 열화 실험 데이터를 기반으로 열화 인자 별 Stress model을 설계한다. 수식 (3)은 DOD Stress model을 나타낸다.

$$S_{DOD}(DOD) = (k_{DOD_1} \cdot DOD^{k_{DOD_2}} + k_{DOD_3})^{-1} \quad (3)$$

수식 (1) 내 k_{DOD_1} , k_{DOD_2} , k_{DOD_3} 는 DOD Stress model을 결정하는 가속 계수이며, DOD 조건에 대한 EOL 도달까지의 사이클 수로 이루어진 그래프와의 피팅을 통해 결정된다. 수식 (4)는 C-rate Stress model을 나타낸다.

$$S_C = e^{k_C(C - C_{ref})} \quad (4)$$

수식 (2) 내 k_C 는 C-rate Stress model의 가속 계수이며, C-rate 조건별 사이클에 대한 용량 데이터의 f_d 의 평균값으로써 결정된다. 최종적으로 설계된 열화 인자별 Stress model은 그림 5와 같다. 설계된 Stress model은 열화 인자의 변화에 따라 값이 변화하며, 수식 (2)를 통해 f_d 를 결정한다. 만약 DOD와 C-rate가 큰 값을 가진다면 f_d 도 커지며, 비례하게 배터리의 열화 속도가 증가한다. 설계한 열화 모델을 통해 열화 인자별 배터리 열화 실험 데이터에 대한 시뮬레이션은

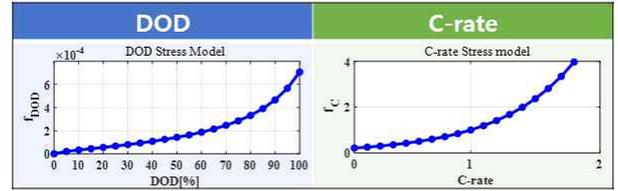


그림 5 열화 인자 별 Stress model
Fig. 5 Stress model by stress factor

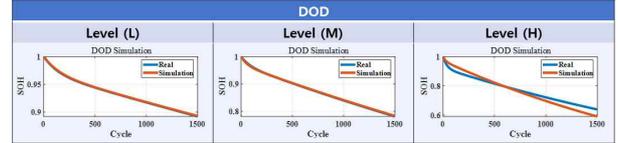


그림 6 DOD 열화 실험 데이터에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Simulation results for DOD experiment data

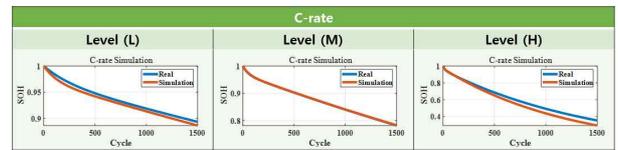


그림 7 C-rate 열화 실험 데이터에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Simulation results for C-rate experiment data

진행하였으며 각각 그림 6과 그림 7에 해당한다. 열화 모델의 시뮬레이션 결과는 1% 이내의 오차를 나타낸다.

4. 결론

본 논문은 배터리 용량 예측을 위해 Stress model 기반 열화 모델 설계를 진행하였다. Stress model은 열화 인자가 배터리 열화에 미치는 영향성을 나타낼 수 있다. Stress model 설계를 위해, 열화 인자의 조합을 통해 다양한 운용 조건을 설정하고 열화 실험을 진행하였다. 또한 상이한 DOD 조건을 고려하여 EFC를 적용하였다. 설계된 Stress model을 통해 계산되는 f_d 는 배터리의 열화 속도를 결정한다. 최종적인 열화 모델의 시뮬레이션 결과, 높은 정확도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서의 열화 모델은 필터 또는 머신러닝 모델을 사용하지 않고, 다량의 열화 실험 데이터를 기반으로 설계된다. 따라서 열화 실험 데이터의 양과 정확도가 중요하며, 실제 운용 데이터를 통한 검증이 요구된다.

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(No. 20210501010020)과 한국에너지기술연구원의 지원을 받아 수행되었음.(C3-2426, 배터리 건강 상태 추정을 위한 특성 분석 및 알고리즘 연구)

참고 문헌

- [1] Xu, B., Oudalov, A., Ulbig, A., Andersson, G., & Kirschen, D. S. (2016). Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment. IEEE Transactions on Smart Grid, 9(2), 1131-1140.
- [2] Jenu, S., Hentunen, A., Haavisto, J., & Pihlatie, M. (2022). State of health estimation of cycle aged large format lithium-ion cells based on partial charging. Journal of Energy Storage, 46, 103855.