

세분화된 지표 및 보간 기법을 활용한 에너지저장장치 SOH 추정

심민주, 이성규, 이상력, 황상원, 이태윤, 김종훈*

충남대학교, *충남대학교

tlawlgus752@naver.com, kyu008520@gmail.com, asas5529@naver.com, jk071744@naver.com, taeyun9272@gmail.com, *whdgns0422@cnu.ac.kr

State-of-Health Estimation for Energy Storage Systems Using Discriminative Health Indicators and Interpolation Techniques

Sim Min Ju, Lee Seong Kyu, Lee Sang Ryuk, Hwang Sang Weon,

Lee Tae Yun, Kim Jong Hoon*

Chungnam National Univ., * Chungnam National Univ.

요약

본 논문은 리튬이온 배터리는 에너지 저장 시스템(Energy storage system; ESS)과 전기차(Electric vehicle; EV)의 핵심 기술이지만, 장기간 운용 시 성능 열화가 발생하기 때문에 정밀한 상태건전도(State-of-health; SOH) 추정이 필요하다. 본 연구에서는 충·방전 전압-시간 특성으로부터 세분화된 건전성 지표(Health indicator; HI)를 정의하고, 결측 데이터를 보완하기 위해 잡음 제거 자동 인코더(Denoising autoencoder; DAE) 기반 보간 기법을 적용하였다. 약 1,400 사이클의 INR21700-33J 셀 데이터를 분석한 결과, 세분화된 건전성 지표는 결측 상황에서도 활용 가능했으며, 시계열 신경망 중 GRU(Gated recurrent unit) 모델이 가장 우수한 성능(MAE(Mean absolute error) 2.24, RMSE(Root mean squared error) 2.74, R^2 0.97)을 보였다. 제안된 방법은 불완전한 에너지 저장 시스템 운용 데이터 환경에서도 SOH 추정의 신뢰성과 정확성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

전 세계적인 기후 변화와 환경 규제 강화로 인해 탄소중립을 목표로 한 에너지 전환이 가속화되고 있으며, 재생에너지 확대와 전력 계통 유연성 확보가 핵심 과제로 부각되고 있다. 특히 태양광·풍력과 같은 변동성 재생에너지의 비중 증가로 인해 전력 수급 불균형 문제가 심화되고 있으며, 이를 보완하기 위한 에너지 저장시스템(Energy Storage System; ESS)의 역할이 전력 시스템에서 핵심 요소로 자리잡고 있다. ESS는 주파수 조정, 퍼크 부하 저감, 재생에너지 출력 안정화 등 다양한 계통 서비스를 수행할 수 있어 그 중요성이 지속적으로 확대되고 있다.

ESS의 핵심 저장 장치는 리튬이온 배터리(Lithium-ion Battery; LIB)로, 높은 에너지 밀도와 우수한 출력 특성으로 전기차, 분산형 전원, 마이크로그리드 등 다양한 분야에 적용되고 있다 [1]. 그러나 LIB는 반복적인 충·방전 과정에서 필연적으로 열화가 진행되며, 이는 용량 감소와 내부저항 증가로 이어져 성능 저하 및 안전 문제를 유발할 수 있다. 따라서 배터리의 건강상태(State-of-Health; SOH)와 잔여 수명(Remaining Useful Life; RUL)을 정확하게 추정하기 위한 기술이 필수적이다.

SOH 및 RUL 추정을 위해서는 배터리 열화 특성을 반영하는 건전성 지표(Health Indicator; HI)의 정의가 중요하다. 기존 연구에서는 전압, 전류, 충·방전 시간, 임피던스 기반 HI가 주로 사용되었으나, 이러한 지표는

특정 전압 구간이나 정형화된 운용 조건을 전제로 하는 경우가 많아 실제 ESS 환경에 적용하는 데 한계가 존재한다. 실제 ESS는 기상 조건과 부하 변화에 따라 비정형적인 충·방전 패턴을 보이며, 이로 인해 특정 전압 구간의 데이터가 결측되거나 HI 산출이 불가능한 문제가 빈번히 발생한다. 이러한 데이터 불일치는 SOH 추정 신뢰도를 저하시킨다.

이에 본 연구에서는 세분화된 전압-시간 기반 HI 정의와 Denoising Autoencoder(DAE)를 활용한 결측 구간 보간 기법, 그리고 시계열 딥러닝 기반 SOH 추정 모델을 결합한 ESS 전용 SOH 추정 프레임워크를 제안한다. 전압 구간을 세분화하여 HI 산출 가능성을 확대하고, DAE를 통해 비선형적 열화 패턴을 반영한 결측 구간 복원을 수행하였다. 이후 복원된 HI를 기반으로 SOH 예측 모델을 학습하였다.

본 연구는 비정형·불규칙한 ESS 운영 데이터 환경에서도 안정적인 SOH 추정을 가능하게 하며, 재생에너지 기반 전력 시스템의 신뢰성과 ESS 운영 효율 향상에 기여할 수 있는 실질적인 대안을 제시한다.

II. 본론

2.1. 건전성 지표 추출 및 세분화과정

본 논문에서는 리튬이온 배터리(INR21700-33J, 1C-rate, 25°C, 1,428 사이클)의 장주기 실험 데이터를 기반으로 SOH를 대변할 수 있는 HI를 추출하였다. MVF(Mean voltage falloff), VIED(C)TD(Voltage

interval of equal discharge(charge) time difference), TIED(C)VD(Time interval of equal discharge(charge) voltage difference)과 같이 전압·시간 특성 기반 HI 를 도출한 결과, 사이클이 진행될수록 충·방전 도달 시간이 감소하는 열화 현상이 확인되었다. 그러나 실제 ESS 환경에서는 기상 조건, 부하 패턴 등 여러가지 요인으로 인해 불규칙한 데이터와 HI 의 결측이 발생하여 기존 고정된 전압에서 추출한 HI 활용하여 SOH 를 추정에 제약이 있었다. 이를 해결하기 위해 HI 를 전압 구간(0.01V·0.1V 단위)과 시간 조건(30 초·100 초 경과)별로 세분화하여 불규칙한 데이터 범위에서도 HI 를 추출 가능하도록 하였고, 상관성 분석을 통해 상관계수가 0.9 이상인 222 개의 HI 를 최종 선정하였다. 그 결과 HI 산출 불가능 구간 비율은 41%에서 12%로 줄었으며, SOH 추정 모델의 RMSE(Root mean squared error)도 5.2%에서 3.6%로 개선되어, 제안된 세분화 HI 체계가 불규칙적인 데이터 분포·결측 데이터 환경에서도 SOH 추정의 정확성을 높일 수 있음을 확인하였다.

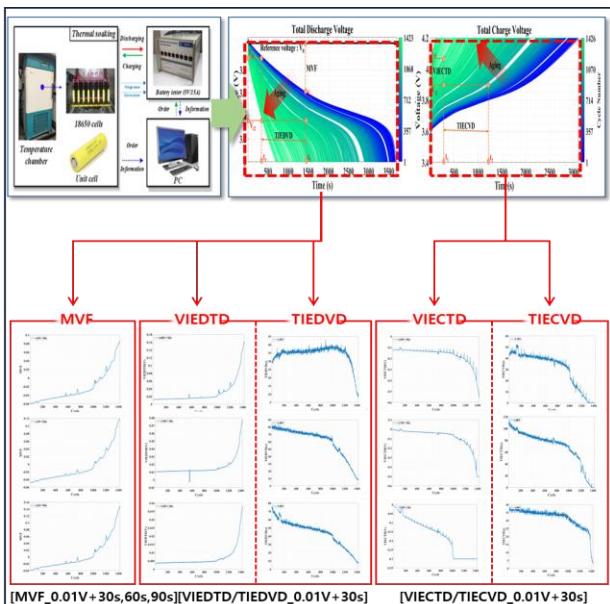


그림 1. 건전성 지표 세분화 과정

2.1. 건전성 지표 경향성 및 보간 방안

본 논문에서는 33J 셀 장주기 열화 데이터를 기반으로 cycle 간 HI 경향성을 분석하고, 이를 ESS 데이터 보간에 적용하였다. 열화가 진행됨에 따라 전체적인 경향성을 유지하지만 HI 의 값이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 전북 지역 ESS 1년치 데이터를 분석한 결과, 날씨에 따라 다양한 전압 범위를 확인할 수 있었다. 날씨에 따른 전압 범위에 따라 HI 의 결측 문제가 발생함을 확인하였다. 결측 상황을 모사하기 위해 33J 셀의 열화 데이터를 활용하였으며, 단순 선형 보간과 GAN(Generative adversarial network) 기반 기법의 한계를 보완하기 위해 DAE 를 적용하였다. DAE 를 적용한 결과, HI 의 시계열적 경향성을 반영한 결측 데이터 복원이 가능함을 MAE 1.16, RMSE 5.05, MAPE 4.33%, R² 0.55로 확인하였다. 이후 보간된 데이터를 기반으로 RNN, LSTM, GRU 모델을 적용해 SOH 를 추정한 결과, GRU 가 MAE 2.24, RMSE 2.74, R² 0.97로 가장 우수한 성능을 보여 장기 열화 패턴 추정에 가장 적합함을 확인하였다.

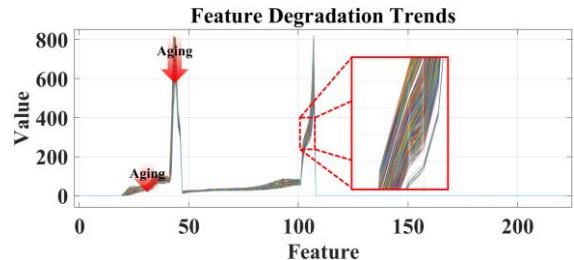


그림 2. 노화에 따른 HI 경향성 분석

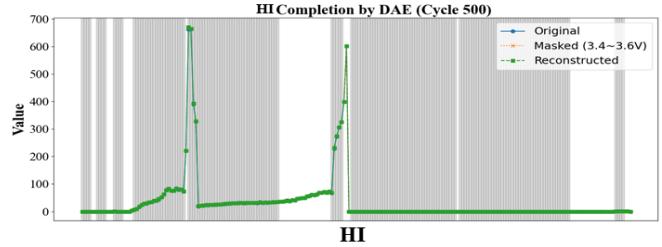


그림 3. DAE 모델을 활용한 보간 결과

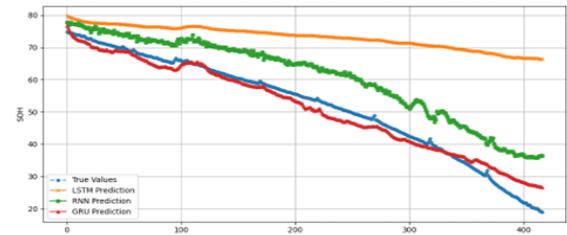


그림 4. 보간 데이터 기반 SOH 추정 결과

III. 결론

본 논문에서는 ESS SOH 추정을 위해 세분화된 HI 와 DAE 기반 보간 기법을 제안하였다. 불규칙한 운용 데이터와 HI 결측 환경에서도 DAE 보간을 통해 단순 보간 대비 SOH 추정의 안정성과 정확성이 향상됨을 확인하였다. 기존 고정 전압 구간 HI 로는 불가능했던 SOH 추정이 보간 데이터 적용을 통해 가능해졌으며, 제안 기법의 유효성과 적용 가능성을 검증하였다. 향후에는 다양한 운용 조건과 다중 모달 데이터 융합을 통해 SOH 및 RUL 예측 성능을 더욱 고도화할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2024년도 에너지기술평가원의 재원으로
지부과워(No.00426149, 수냉식 적용 리튬전지 패킹 및
안전제어 강화기술)의 지원과, 산업기술평가관리원의 재원으로
인지컨트롤스(No.00404229, 직접냉각 기술 적용 80 kWh
이상급 대용량 배터리 열관리 기술개발)의 지원을 받아
수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Marcos, David, et al. "Comprehensive requirements for an Interoperable BMS." *HORIZON 2* (2024): 01-04.