

폐배터리 안전성 평가를 위한 부분 방전 곡선 내 Fuzzy logic 기반 분류 알고리즘 개발

고은진*, 한동호*, 김보민*, 김종훈*
 충남대학교 에너지저장변환연구실*

Development of Fuzzy Logic-Based Classification Algorithm in Partial Discharge Curve for Safety Evaluation of Retired Battery

Eunjin Ko*, Dongho Han*, Bomin Kim*, Jonghoon Kim*
 Energy Storage Conversion Lab., Chungnam National University*

ABSTRACT

본 논문은 폐배터리의 안전성을 평가하기 위해 Fuzzy logic를 기반 분류 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 NMC(Nickel-manganese-cobalt) 배터리 데이터를 사용하였다. 배터리 셀 편차를 안전성 기준으로 설정하고, 셀 불균형이 발생한 배터리를 검출하기 위해 내부 저항과 전압 곡선 기울기 변화를 입력 변수로 선정했다. 제안된 분류 알고리즘 방법은 셀 불균형이 발생한 배터리를 검출 정확도로 알고리즘 성능을 확인하였다.

1. 서론

리튬이온 배터리(Lithium-iron-battery; LIB)는 친환경적인 에너지 솔루션을 제공하며 전기 자동차의 주 전력원으로 공급되고 있다. 리튬 이온 배터리는 초기 용량 기준 용량이 80% 이하로 떨어지면, 안전 문제와 전력 요구량을 충족하지 못해 사용이 중단되고 폐기된다^[1]. 이러한 폐기된 배터리는 에너지 저장 시스템(Energy storage system; ESS)과 같이 배터리 성능에 대한 요구사항이 낮은 용도로 재사용할 수 있다. 그러나 폐배터리는 신제품 배터리에 비해 에너지 밀도, 셀 편차 등 일관성이 좋지 않다. 불일치는 배터리 성능 및 안전성 측면에서 열 폭주, 폭발 위험 등 문제가 발생할 수 있다. 따라서 배터리 내부 특성에 따라 재사용과 재활용으로 분류하는 연구가 필요하다. 배터리 재사용은 배터리의 안전성을 확보하여 유효 수명을 연장하고 재활용으로 니켈, 망간, 리튬 등을 추출하여 자원 보존을 통한 환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있다.

본 논문에서는 Fuzzy logic 기반 폐배터리의 안전성 평가를 위해 새로운 기준을 제안하며 분류 알고리즘이 설계된다. 배터리 셀 전압 편차를 안전성 기준으로 설정하여, 셀 불균형이 발생한 배터리를 ref 데이터로 배터리 방전 곡선 내 특성을 분석했다. 내부 저항과 전압 곡선 기울기 변화를 입력 변수로 선정되어, 설계된 분류 알고리즘은 셀 불균형이 발생한 배터리 검출 정확성을 확인하여 알고리즘 성능에 대해 평가하였다.

2. 데이터 수집 및 분류 인자 추출

2.1 데이터 수집 및 인자 추출

수집된 배터리 팩 방전 데이터는 NMC(Nickel-manganese-cobalt) 배터리로 0.4 C-rate에서 정전류(Constant current; CC) 방전을 진행하였으며 이는 그림 1 (a)에 나타내었다.

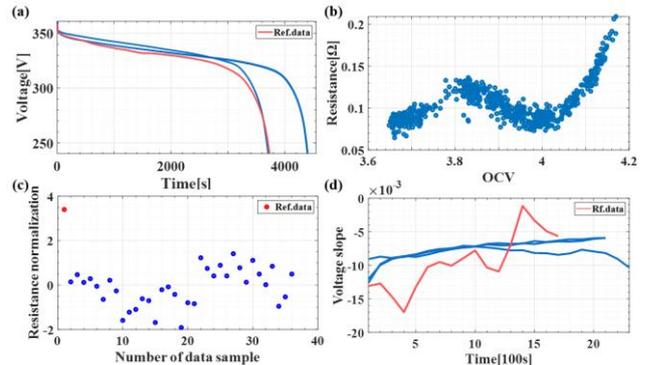


그림 1 방전 데이터 분석 (a) Ref.data와 정상 data의 방전 곡선, (b) OCV에 따른 확산저항 (c) 동일 OCV에 대한 확산 저항 산점도, (d) Ref.data와 정상 data의 전압곡선 기울기 변화량

Fig. 1 Analysis of discharge data (a) discharge curves of Ref.data and normal data, (b) diffusion resistance according to OCV, (c) scatter plot of diffusion resistance for the identical OCV, (d) variation in voltage curve slope of Ref. data and normal data

전기적 내부 상태를 반영하는 내부 저항을 추출하기 위해 1-RC ECM (Equivalent circuit Model) 모델을 선정하여 추출하였다. 내부 저항은 충전 상태(State-of-charge; SOC)에 따라 비선형적인 특성을 보이며 분석하는 데이터는 입고된 폐배터리를 방전한 데이터로 방전 시작 SOC가 다양하다. 본 논문에서는 SOC와 연관성이 높은 개방 회로 전압(Open circuit voltage; OCV)을 도출하여 분석을 진행하였다. 추출된 내부 저항은 그림 1 (b)와 같이 OCV에 따른 확산 저항(R_{diff}) 값을 나타내며, OCV의 영향을 보정하기 위해 동일 OCV 간에 R_{diff} 를 Z-score 정규화 과정을 진행하여 -4부터 4 사이의 값으로 변환하였다. Z-score 정규화 방법은 평균에서의 표준 편차의 배수로 값을 조정하여 평균으로부터 얼마나 떨어져 있는지를 나타냄으로써 OCV에 따른 저항 값을 정규화 방법을 거쳐 정량화하고, Ref 배터리의 R_{diff} 특성을 명확하게 나타낼 수 있다. 그림 1 (c)는 동일한 OCV인 배터리에서 R_{diff} 값을 Z-score 정규화를 통해 산출된 값을 나타내며 Ref 배터리는 정상 배터리보다 동일 OCV 내에서 R_{diff} 가 높은 것을 확인하였다.

Ref 배터리에서 전압 곡선의 기울기가 급격하게 변하는 것을 그림 1 (a)에서 확인할 수 있다. 이러한 특징을 추출하기 위해 100초 간격으로 전압 곡선을 선형 회귀를 통해 기울기 값을 도출하였다. 그림 1 (d)는 100초 간격으로 산출된 배터리 전압 기울기 변화량을 나타내며 Ref 배터리가 급격하게 기울기가 변하는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 확산 저항과 기울기 변화량의 최댓값을 입력 변수로 선정하였다.

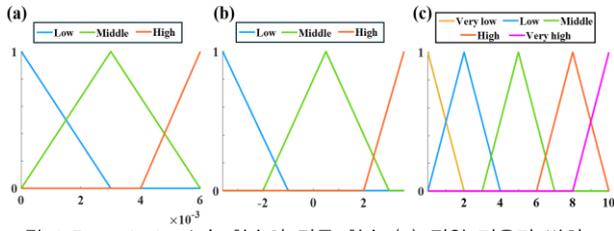


그림 2 Fuzzy logic 소속 함수와 결론 함수 (a) 전압 기울기 변화 최댓값 소속 함수, (b) 확산 저항 소속 함수, (c) 결론 함수
 Fig. 2 Membership functions and conclusion function for fuzzy logic (a) membership function for the maximum voltage slope variation, (b) membership function for the diffusion resistance, (c) conclusion function

3. Fuzzy logic 기반 분류 알고리즘 설계

3.1 Fuzzy logic 소속 함수 및 역퍼지화

Fuzzy logic은 인간의 판단과 추론을 모방하여, 이분법적인 논리로 다루기 모호한 개념이나 상황을 정량적으로 표현하는 방법이다^[2]. 불확실성을 숫자로 표현하기 위해 소속 함수를 구성하며 값은 0에서 1 사이의 값으로 표현된다. 각 집합은 언어적 용어로 그림 2와 같이 (저항/기울기가) 작음(Low), 적당함(Middle), 큼(High)으로 구성되었다. Fuzzy 규칙은 if-then으로 표 1과 같이 구성하여 입력 변수에 대한 소속 함수 결과를 역퍼지화로 정량적 수치화한다. 역퍼지화 방법은 맘다니 추론(Mamdani inference) 방법으로 Fuzzy 집합에서 얻은 소속도의 적분 면적 계산을 통해 무게 중심을 출력 값으로 계산된다.

표 1 Fuzzy logic 규칙

Table. 1 Rule for fuzzy logic

If Resistance is High and Maximum slope variation is High , then Safety is Very low
If Resistance is High and Maximum slope variation is Middle , then Safety is Low
If Resistance is High and Maximum slope variation is Low , then Safety is Middle
If Resistance is Middle and Maximum slope variation is High , then Safety is Low
If Resistance is Middle and Maximum slope variation is Middle , then Safety is Middle
If Resistance is Middle and Maximum slope variation is Low , then Safety is High
If Resistance is Low and Maximum slope variation is High , then Safety is Middle
If Resistance is Low and Maximum slope variation is Middle , then Safety is High
If Resistance is Low and Maximum slope variation is Low , then Safety is Very high

3.2 Fuzzy logic 기반 분류 결과

본 논문에서 제안한 Fuzzy logic 기반 분류 알고리즘을 통한 맘다니 추론 방법을 통해 역퍼지화한 값으로 도출되었으며 그림 3에 나타내었다. 안전성 평가에 따른 셀 불균형이 발생한 배터리 5개가 역퍼지화된 결과값으로 알고리즘 성능을 확인하였다.

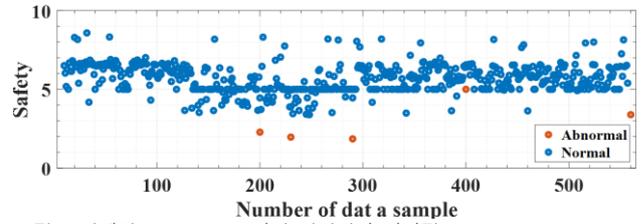


그림 3 설계된 Fuzzy logic 기반 역퍼지화 결과값

Fig. 3 Designed fuzzy logic-based defuzzification results

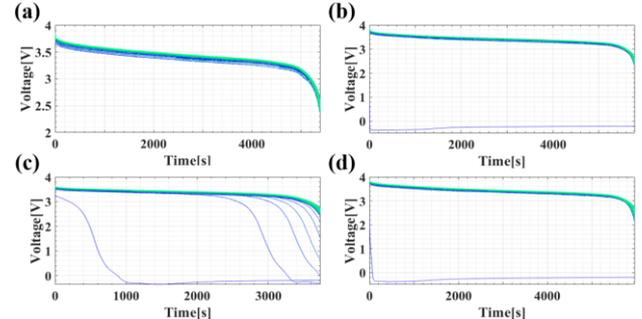


그림 4 역퍼지화 결과값에 따른 셀 전압 곡선 (a) 안전성 높은 셀 전압 곡선, (b), (c), (d) 안전성이 낮은 셀 전압 곡선

Fig. 4 Cell voltage curve according to defuzzification result (a) cell voltage curve with high safety (b), (c), (d) cell voltage curves with low safety.

안전성에 대해 1부터 10 사이의 값으로 도출되며, 10에 가까울수록 배터리의 안전성이 높고 1에 가까울수록 배터리 안전성이 낮은 것을 의미한다. 안전성이 매우 높음에 해당하는 배터리의 셀 간 전압 편차는 일정한 것을 확인하였으며, 이는 그림 4 (a)에 나타났다. 셀 불균형이 발생한 배터리의 안전성 평가 결과값은 매우 낮음 3개, 낮음 1개, 적당함 1개로 도출되며 매우 낮음에 해당하는 셀 전압은 그림 4 (b), (c), (d)에 나타났다. 결과적으로 셀 불균형 배터리 5개에서 4개가 결과값이 낮음에서 검출되며 알고리즘 정확도가 80%로 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 폐배터리 분류를 위해 Fuzzy logic 기반 맘다니형 추론법을 통해 안전성 평가를 진행하였다. 알고리즘 설계를 위해 내부 저항 및 새로운 기준으로 전압 곡선 기울기 변화를 제안하였으며 Fuzzy 소속 함수 및 규칙을 통해 분류하였다. 제안된 분류 알고리즘의 성능은 셀 불균형이 발생한 배터리 검출 정확도 80%이었다. 향후, 분류 기준으로 용량을 통한 더 높은 정확도의 분류 알고리즘을 설계한다.

본 논문은 현대자동차(LFP 배터리의 SOC 추정 BMS 알고리즘 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)과 GS건설㈜의 지원을 받아 에너지머티리얼즈㈜의 방전데이터를 활용하여 수행되었음.

참고 문헌

[1] Hua, Yang, et al. "Sustainable value chain of retired lithium-ion batteries for electric vehicles." *Journal of Power Sources* 478 (2020): 228753.
 [2] Adams, Edward S., and Daniel A. Farber. "Beyond the formalism debate: Expert reasoning, fuzzy logic, and complex statutes." *Vand. L. Rev.* 52 (1999): 1241.