

ESS 배터리 화재 방지를 위한 Fuzzy Logic 기반 상대적 퇴화도 추정 기법 연구

김수안* 한동호* 김종훈*,
충남대학교

Relative degradation grade Estimation based on Fuzzy logic algorithm for ESS battery fire protection

Suan Kim* Dongho Han* Jonghoon Kim*
Chungnam National University*

ABSTRACT

최근 ESS 배터리의 화재로 이를 사전에 방지할 수 있는 알고리즘의 중요성이 부각되고 있다. 본 논문에서는 배터리 퇴화 실험 결과 프로파일에서 특성을 보여 퇴화 factor로 선정한 배터리 내부 저항, 방전 용량을 입력으로 하여 이를 Fuzzy Logic 으로 구현하여 배터리의 퇴화 상태를 추정한다.

1. 서론

최근 리튬 이온 배터리의 사용량은 꾸준히 증가하고 있으며, 다양한 어플리케이션으로 사용 되고 있다. 특히 신재생 에너지와의 연계로 ESS(Energy Storage System)의 사용량이 국내/외를 막론하고 증가하고 있다. 이와 함께 다양한 이슈들이 발생하고 있으며, 특히 최근 들어 화재 사고가 빈번히 일어나는 추세이다. ESS의 폭발 사고는 리튬 이온 배터리의 내부 화학적 상태와 밀접한 연관성을 가진다. 신재생 에너지의 불규칙적인 전력 공급으로 인한 충전 및 방전이 반복되면서 ESS를 구성하는 리튬 이온 셀의 내부 상태가 변화하는데 이는 리튬 이온 셀의 퇴화를 의미한다.^[1] ESS는 다수의 배터리 셀이 직렬 및 병렬로 구성되어 있으며, 배터리의 특성상 다수의 셀 중 일부 셀이 불량이거나 비정상 상태에서 운전(고온, 과전압, 과전류)하여 하나의 셀이라도 수명에 손상을 미치게 되면 시스템 전체에 영향을 주게 된다. 셀 간 수명 불균형, 즉, 특정 셀의 퇴화로 인해 손상된 셀을 기준으로 전체 시스템의 성능 저하가 나타나게 되며, 심각한 경우 사용 불가 상태가 되어 폭발 및 화재의 위험이 커지게 된다. 이 같은 화재 사고를 사전에 방지할 수 있는 화재 예방 알고리즘은 필수적이다. 이와 관련하여 배터리 화재 원인을 사전에 감지하여 방지하는 것이 중요하다. 배터리 화재의 다양한 원인 중 하나는 위 같은 특정 셀의 퇴화이다. 따라서 셀의 퇴화에 기여하는 factor를 사전에 감지하여 사용자에게 그 퇴화 상태를 알리면 배터리 화재를 최소화 할 수 있게 된다.

본 논문에서는 배터리 사이클 실험 결과 경향성을 보여주는 두 개의 퇴화 factor를 선정하여, Fuzzy Logic을 이용해 셀의 퇴화도를 추정하도록 한다. 이를 통해 특정 셀이 퇴화 위험 범주 내에 속하게 되는 것을 경시 관찰하여, 배터리 발화를 미연에 방지할 수 있다.

2. 전기적 특성 실험 및 퇴화 인자 선정

리튬 이온 배터리의 퇴화 factor 선정을 위해 1C-rate의 전류를 인가하여 만충 및 만방이 반복되도록 총 300Cycle의 충전/방전 실험을 진행했다. 그림 1은 해당 사이클 실험의 전류 및 전압 프로 파일을 나타낸다. 실험 결과 프로파일을 사용하여 리튬 이온 배터리의 방전 직후 내부저항을 계산하였고, 방전 용량은 전류 적산법을 사용하여 도출 하였다. 이는 식 (1)에 나타내었다.

$$Discharge\ Capacity = \int i_{discharge} dt \quad (1)$$

실험 결과 그림 2 및 그림 3과 같이 경향성을 보여주는 두 개의 퇴화 factor를 선정했다. 배터리 방전 용량, 배터리 내부 저항의 두 개의 파라미터를 Fuzzy Logic의 입력으로 사용하여 퇴화도를 도출하도록 한다.

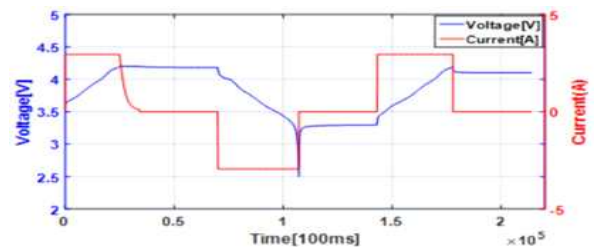


그림 1 사이클 실험의 전류 및 전압 프로파일
Fig. 1 Voltage and current profile of cycle experiment

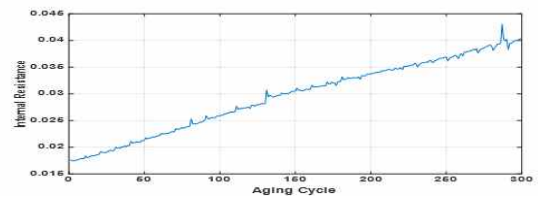


그림 2 사이클 실험에 따른 배터리 저항 증가
Fig. 2 Increase of internal resistance for cycle experiment

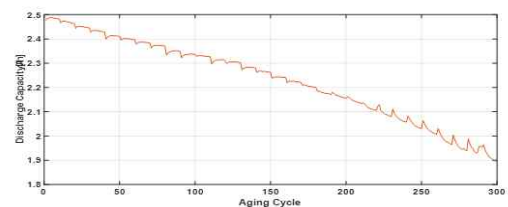


그림 3 사이클 실험에 따른 방전 용량 감소
Fig. 3 Decrease of discharge capacity for cycle experiment

3. Fuzzy Logic을 활용한 퇴화도 추정



그림 4 퍼지 이론을 사용한 추론 시스템
Fig. 4 Inference system using Fuzzy theory

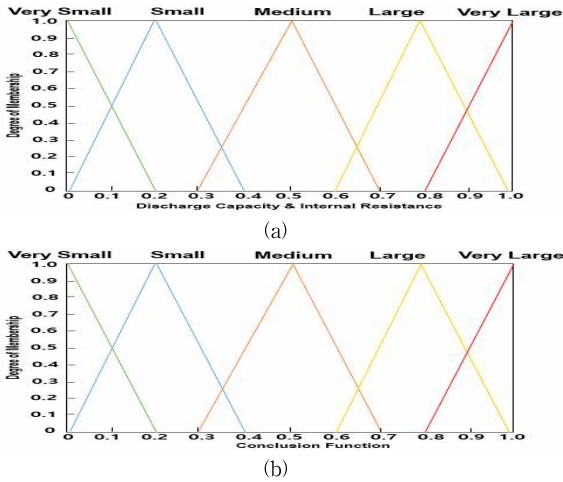


그림 5 (a) 방전 용량과 내부 저항의 멤버십 함수
(b) 결론 함수
Fig. 5 (a) Membership function of discharge capacity and internal resistance
(b) Conclusion function

그림 4는 Fuzzy Logic이 적용되는 순서도를 나타낸다.^[2] 배터리 싸이클 실험 데이터 프로파일에서 증가 및 감소의 특정 경향성을 보여 퇴화 factor로 선정한 배터리 내부 저항과 방전 용량 데이터가 배터리 퇴화도에 관한 퍼지 집합 각각에 포함되는 수준에 대해 멤버십 함수를 결정하여 그림 5와 같이 구현했다. 두 개의 factor는 각각의 멤버십 함수에 적용되어 퍼지화 되며, 퍼지화 된 각각의 입력 값에 대해서는 OR 연산을 사용한다.

배터리 내부 저항과 방전 용량 factor를 그림 5와 같이 각각의 5개의 집합으로 구성하여 Fuzzy Rule을 도출하는데 사용하였다. Fuzzy Rule은 각 factor에 대해 5개의 규칙을 반영하여 총 25 개로 선정하였으며 이는 표 1에 나타내었다.

표 1 퇴화도에 관한 퍼지 규칙표
Table 1 Fuzzy Rules for degradation grade

Rules for fuzzy logic		
Internal Resistance	Discharge Capacity	Aging Degree
Very Small	Very Large	Very Small
Very Small	Large	Very Small
Very Small	Medium	Small
⋮	⋮	⋮
Very Large	Medium	Very Large
Very Large	Small	Very Large
Very Large	Very Small	Very Large

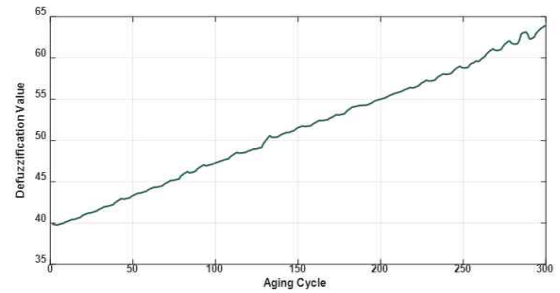


그림 6 퍼지 로직을 활용한 퇴화도 추정
Fig. 6 Estimation of degradation grade using Fuzzy Logic

$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (2)$$

역퍼지화는 퍼지 출력 값을 실제로 사용하기 위해 등가의 정확한 값(Crisp value)으로 나타낸다. 퍼지 규칙을 적용하여 해당되는 값들이 연산되어 최종적으로 각각의 퍼지 집합에 해당되는 소속도(Membership value)를 보여주는 수치 값이 도출된다. 역퍼지화 방법에는 무게 중심법, 맘다니 추론법이 있으며, 본 논문에서는 OR조건을 통해 도출된 25개의 Fuzzy Rule에 대한 결과들을 무게 중심법을 통해 역퍼지화 하여 최종 결과 값인 배터리의 퇴화도를 도출하도록 한다. 무게 중심법을 이용한 방법은 퍼지 규칙의 결과로 수직선으로 통합되어 있는 집합을 무게가 같은 두 부분으로 가르는 방식으로 하여, 수학적으로 무게중심을 구하는 방법과 같다. 이는 식 (2)에 나타내었다. Fuzzy Rule 및 무게 중심법 적용 결과 도출된 싸이클 시험에 대한 퇴화도는 그림 6과 같으며, 이를 통해 싸이클 시험을 진행하면서 배터리가 퇴화됨을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 최근 중요한 이슈로 떠오르고 있는 ESS 배터리 발화 사고에 대해 사전에 그 위험을 검출, 방지할 수 있는 Logic 구현을 목적으로 하며, 리튬 이온 배터리의 퇴화 상태를 사전에 판단할 수 있는 방법을 제안한다. 배터리 싸이클 실험 결과 경향성을 보이는 배터리 내부 저항과 방전 용량 factor를 Fuzzy Logic에 구현하여 배터리 퇴화 상태를 추정해 사용자에게 알려줌으로써 ESS 배터리의 화재를 미연에 방지할 방법을 제안한다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. ((No. 20182410105280))

참고 문헌

- [1] Xueyuan Wang, Xuezhe Wei, Haifeng Dai, " Estimation of state of health of lithium-ion batteries based on charge transfer resistance considering different temperature and state of charge", Journal of Energy Storage, Volume 21, p. 618-631, Feb 2019
- [2] Xiyun Yang, Hong Yue, Jie Ren, "Fuzzy Empirical Mode Decomposition for Smoothing Wind Power with Battery Energy Storage System", IFAC-PapersOnLine, Volume 50, p. 8769-8774, July 2017