

리튬이온전지의 열폭주 발생 메커니즘을 고려한 ESS 화재감지 알고리즘에 관한 연구

최형석^{**}, 김기영^{*}, 김경화^{*}, 김지명^{*}, 노대석^{*}

^{*}한국기술교육대학교, ^{**}티팩토리

e-mail:elroi91@tfactory.kr

Fire Detection Algorithm in ESS by Considering Thermal Runaway Mechanism for Li-ion Battery

Hyoung-Seok Choi^{**}, Gi-Young Kim^{*}, Kyung-Hwa Kim^{*}, Ji-Myung Kim^{*} and Dae-Seok Rho^{*}

^{*}Korea University of Technology and Education, TFactory^{**}

요약

2015년 유엔기후변화회의에서 채택된 ‘파리 협정’ 이후, 전 세계가 탄소중립 정책에 따라 신재생에너지원 및 에너지저장장치(energy storage system, ESS)의 설치가 크게 증가하고 있지만, 국내에서는 2017년 8월부터 시작된 에너지저장장치의 화재사고를 시작으로 현재까지 총 36건이 발생하여, 관련 업계에 큰 타격을 주고 있는 실정이다. 여기서, 에너지저장장치를 구성하는 리튬이온전지에서 열폭주(thermal runaway)가 발생하면 일반적인 소화 방법으로는 진압하기 어려우므로, 리튬이온전지의 열폭주로 인한 화재가 발생하거나 확산되기 전의 이상징후를 감지해야 하며, 배터리 열폭주에 의한 화재 사고와 기타 요인에 의해 발생한 비(非) 배터리 화재를 구분하여 상황에 맞는 화재 진압방식을 적용해야 한다. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온전지 특성을 고려한 ESS 화재감지 알고리즘을 제시하여 리튬이온전지의 열폭주 전 이상징후를 조기에 감지하고 ESS 화재를 구분하는 방안을 제안한다. 이를 바탕으로 리튬이온전지 열폭주 시험 및 비배터리 화재 시험을 수행한 결과, 본 논문에서 제안한 ESS 화재감지 알고리즘이 배터리 열폭주에 의한 화재 사고와 비(非) 배터리 화재 사고를 구별하여 진단할 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

2015년 유엔기후변화회의에서 채택된 ‘파리 협정’ 이후, 국내에서도 탄소중립 정책을 실시함에 따라 신재생 에너지원 및 에너지저장장치(energy storage system, ESS)의 설치사례가 증가하고 있지만, 2017년부터 시작된 에너지저장장치의 화재사고가 관련 산업계에 악영향을 끼치고 있다 [1,2]. 에너지저장장치의 화재는 리튬이온전지의 열폭주(thermal runaway)로 인해 피해가 커지며, 열폭주가 연쇄적으로 발생하게 되면 화재를 진압할 수 없는 것이 현실이다. 또한 PCB나 전선 등에서 발생한 비(非)배터리 화재를 진압하기 위해 동작한 소화설비 때문에 ESS의 피해가 발생할 수 있으므로, 배터리 열폭주와 비배터리 화재를 구분하여 대응해야 하고, 이를 위해서는 리튬이온전지의 특성을 고려한 ESS 화재감지 및 판단기술이 필요하다. 따라서, 본논문에서는 ESS 화재 이상징후를 조기에 감지하고 화재 종류를 구분하기 위하여, 리튬이온전지의 열폭주 메커니즘을 고려한 ESS 화재감지 알고리즘을 제안하고, 이를 바탕으로 리튬이온전지 열폭주 시험을 수행한 결과, PLC에서 리튬이온전지

의 벤팅을 감지하여 발생한 화재가 리튬이온전지의 열폭주임을 확인할 수 있었으며, 케이블 화재 시험을 수행한 결과, PLC에서 리튬이온전지의 벤팅 없이 발생한 화재임을 인지하여 비배터리 화재임을 확인할 수 있어, 제안한 ESS 화재감지방안이 화재 방지에 유용함을 확인할 수 있었다.

2. ESS용 리튬이온전지의 열폭주 메커니즘

에너지저장장치의 ESS 화재는 단전지 1개의 열폭주로부터 발생하여 확산되는 것이며, 그림 1과 같이 전지의 열폭주는 일정한 단계를 거쳐 발생하게 된다. 전지에 열적, 전기적 또는 기계적 충격이 가해지고, 이것이 검출되거나 제어되지 못하여 전지에 지속적인 충격이 발생하면 내부 온도가 상승하여 전해질이 끓어오르게 된다. 전해질이 기화되면 전지 내부 압력이 증가하게 되고, 일정 단계를 지나면 전지 표면이 개방되거나 터지는 벤팅(venting) 현상이 발생하여 전해질 증기 및 분해가스가 외부로 배출된다. 여기서, 전해질 증기는 벤트시 초기에 전해질이 기화되어 나오는 것이고, 분해가스는 전해질 성분의 분자들이 고온/고압에 의해 분해되어 생성되는

것이며, 전해질 증기와 분해가스를 통칭하여 오프가스로 명명한다 [3]. 전지마다 벤팅이 발생하는 위치가 있는데, 이는 구조적으로 리튬이온전지 내부 압력 증가 시 안전하게 압력을 배출하기 위함이다. 원통형, 각형 리튬이온전지에서는 설계된 특정 위치에서 벤트가 발생하고, 파우치 전지에서는 극판과 가까운 위치에서 벤트가 발생한다. 초기에는 전해질이 기화된 증기가 다량 배출되다가 시간이 지날수록 분해가스의 배출량이 증가한다.



[그림 1] 리튬배터리의 열폭주 메커니즘

벤팅 이후 열폭주까지 일정 시간이 존재하는데 이를 골든타임(golden time)이라고 할 수 있으며, 스트레스가 지속되면 전지 내부 온도 증가로 분리막이 녹게 되고 결국 내부단락이 일어난다. 내부 단락이 시작되면 다량의 반응가스(연기)가 배출되고, 이후 고열에 의해 점화가 되어 화재가 발생하는데 이것을 열폭주라 한다. 리튬이온전지의 열폭주는 내부 에너지가 모두 소진될 때까지 끊임없이 열과 산소를 만들어내므로, 일반적인 소화 장비로는 소화할 수 없다. 이러한 전지의 열폭주는 인접 전지로 열적 충격을 가해 화재를 전파하며, 전지 근처에 농축되어 있던 가연성 가스가 화재에 개입하여 큰 폭발로 이어질 수 있다.

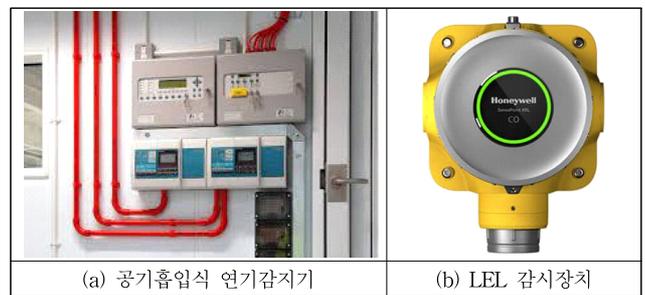
3. 리튬이온전지의 열폭주 메커니즘을 고려한 ESS 화재감지 알고리즘

3.1 기존 ESS 화재 감지장치의 문제점 및 오프가스 감지장치의 필요성

대부분의 ESS의 경우, 화재 감지를 위한 설비로 연기감지기를 사용하고 있다. 특히 그림 2(a)의 공기흡입식 연기감지기는 배터리 랙과 같은 중요 위치에 배관 및 샘플링 파이프를 설치하여 주변 공기를 흡입한 후, 메인 연기감지기에서 공기를 조사(照射)하여 입자를 분석하고 화재를 판단하는 장비이다. 공기흡입식 연기감지기는 능동적인 시스템으로 오작동율이 적고 화재를 조기에 감지할 수

있어, 최근 ESS 화재감지기로 각광받는 추세이지만, 리튬이온전지의 열폭주로 인한 화재와 PCB, 전선 등의 비배터리 화재를 구분하지 못한다.

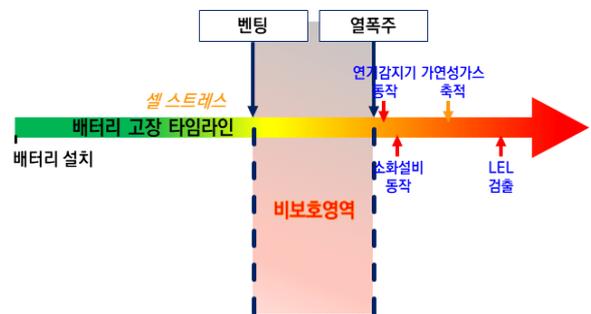
폭발하한계(lower explosion limit, LEL) 감시장치는 납축전지에서 가연성 가스가 농축되는 것을 감지하는 설비로, ESS에서는 화재 발생 시 가연성 가스가 폭발하한계를 넘어서는지 감지하는 장치이다. 하지만 LEL 감시장치로는 리튬이온전지 벤팅 시 배출되는 전해질 증기나 분해가스를 조기에 감지하기 어렵고, LEL 알람이 발생하는 시점이 이미 화재가 확산된 이후이기 때문에 ESS 화재를 조기에 감지하는 용도로 사용하기는 어려운 실정이다. 따라서 조기에 오프가스를 감지하는 장치가 반드시 필요하다.



[그림 2] ESS 화재 감지장치

3.2 리튬이온전지의 열폭주 메커니즘을 고려한 ESS 화재감지 알고리즘

상기의 기설 ESS 화재감지 장치들은 모두 화재가 발생한 이후에 감지가 가능하다. 이러한 장치들은 ESS에서 화재가 발생한 경우, 열폭주 전 이상징후인 벤팅을 고려하지 않고 열폭주 이후의 상황만을 감지하기 때문에 비(非)배터리 화재와 구분이 어렵다. 그림 3은 벤팅, 비보호영역, 열폭주의 타임라인을 보여준다.



[그림 3] 리튬이온전지의 화재 타임라인

본 논문에서는 리튬이온전지의 벤팅 시 발생하는 전해질 증기와 분해가스 검출을 통하여 비보호영역을 리튬이온전지의 열폭주 전 이상징후 검출영역으로 정의한다. 먼저, 표 1은 리튬이온전지의 벤팅을 감지할 수 있는 오

프가스 검출 센서와, 화재를 감지할 수 있는 공기흡입식 연기감지기를 활용하여, 리튬이온전지의 벤팅, 열폭주와 비배터리 화재를 구분하는 방안을 나타낸 진리표이다.

[표 1] ESS 화재 구분 방안

ESS 상태	오프가스 감지	화재 감지기
정상	X	X
비배터리 화재 발생	X	O
배터리 벤팅 발생	O	X
배터리 열폭주 발생	O	O

화재 구분방안을 기반으로, 리튬이온전지의 열폭주 메커니즘을 고려한 ESS 화재감지 알고리즘을 구체적으로 제시하면 다음과 같다.

[Step 1] 리튬이온전지의 벤팅을 감지할 수 있는 오프 가스 검출 센서와, 화재를 조기에 감지할 수 있는 공기흡입식 연기감지기를 설치하고, 이를 모니터링하는 PLC를 구성한다.

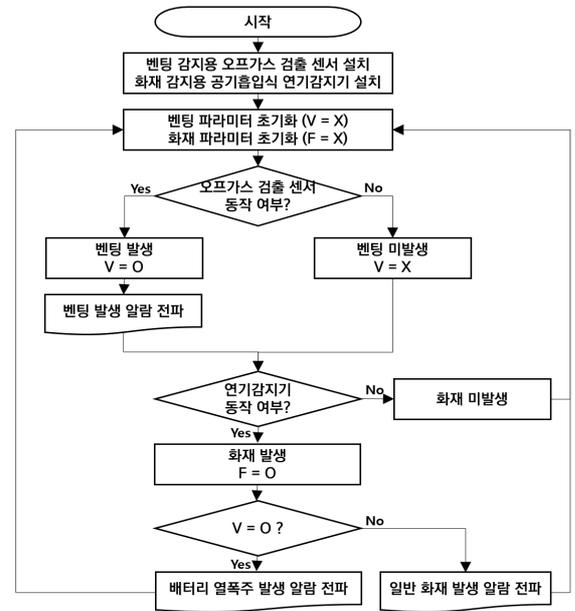
[Step 2] 벤팅 상태를 판단하기 위한 파라미터 V를 초기화하고(V=X), 화재 상태를 판단하기 위한 파라미터 F를 초기화한다(F=X).

[Step 3] PLC에서 오프가스 검출 센서의 동작 상태를 지속적으로 모니터링하여, 오프가스 검출 센서에서 알람 발생 시 벤팅 파라미터를 검출 상태로 변경하고(V=O), PLC에서는 벤팅이 발생함을 알람으로 전파한다. 만약 오프가스 검출 센서에서 알람이 발생하지 않았으면 벤팅 파라미터를 미검출 상태로 변경한다(V=X).

[Step 4] PLC에서 공기흡입식 연기감지기의 동작 상태를 지속적으로 모니터링 하고, 연기감지기에서 화재알람이 발생하였을 시 화재 파라미터를 검출 상태로 변경한다(F=O). 만약 연기감지기에서 화재 알람이 발생하지 않았으면 화재 파라미터를 미검출 상태로 변경한다(F=X).

[Step 5] PLC에서 벤팅 파라미터와 화재 파라미터를 비교하여, 화재 파라미터가 검출 상태일 시 벤팅 파라미터가 검출 상태이면(F=O, V=O) 리튬이온전지 열폭주 알람을 전파하고, 벤팅 파라미터가 미검출 상태이면(F=O, V=X) 비배터리 화재 알람을 전파한다. 이후 [Step 2]로 이동하여 판단 알고리즘을 반복한다.

상기 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 4와 같다.



[그림 4] 열폭주 메커니즘을 고려한 ESS 화재감지 알고리즘

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

리튬이온전지의 열폭주 메커니즘을 고려한 ESS 화재 감지방안의 유용성을 확인하기 위하여, 리튬이온전지 열폭주 시험과 케이블 발화를 통한 비배터리 화재 시험을 수행한다. 표 2는 각 시험조건을 상세하게 나타낸 것이다. 리튬이온전지 열폭주 시험은 UL9540A 시험방법을 참고하여, 국내 원통형 리튬이온전지를 외부가열하여 진행하고, 케이블 화재 시험은 일반 LAN케이블을 강제 발화하여 진행한다. 리튬이온전지의 벤팅을 감지하기 위하여 Nexceris사의 오프가스 검출 센서를 사용하였으며, 화재를 감지하기위해 Xtralis사의 공기흡입형 연기감지기를 사용하였다. 두 시험 모두 안전을 확보하기 위해, 배터리 열폭주시험 전용 챔버에서 수행하였으며, 배기 및 집진 설비를 갖춘 환경을 구축하였다 [4].

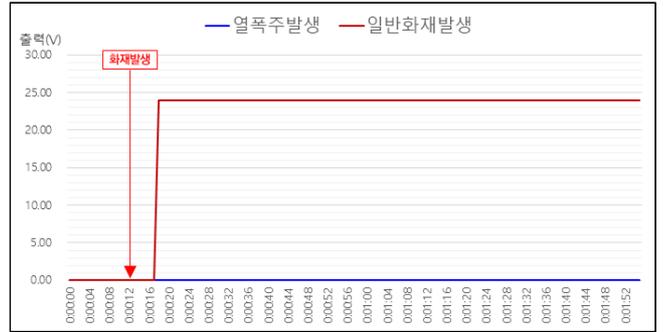
[표 2] 화재감지 시험 조건

항목	리튬이온전지 열폭주 시험	케이블 화재 시험
시험 환경	배터리 화재시험 전용 챔버	
시험 시료	18650 원통형 셀	UTP(LAN) 케이블
발화 조건	배터리 외부 가열	강제 발화
사용 센서	오프가스 검출: Nexceris 社 오프가스 검출 센서 화재연기 감지: Xtralis 社 공기흡입형 연기감지기	

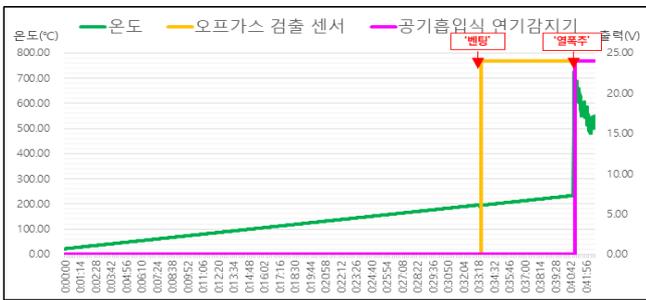
4.2 리튬이온전지 열폭주 감지시험

상기의 시험 조건에 따라, 리튬이온전지의 열폭주에 의한 화재 사고 특성을 분석하기 위하여, 열폭주 감지시험을 수행한 결과는 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 시험시작 후 33분경, 벤팅이 발생하여 오프가스 검출 센서에 알람이 발생하였고, 약 7분 후 열폭주가 발생하였으며, 공기흡입식 연기감지기에 화재검출 알람이 발생하였다. 따라서, 알고리즘이 적용된 PLC에서는 그림 6과 같이 열폭주 발생 시 리튬이온전지 열폭주 발생 알람이 나타난 것을 알 수 있어, 본 논문에서 제안한 알고리즘이 리튬이온전지의 열폭주에 의한 화재 사고를 정확하게 감지할 수 있음을 확인하였다.

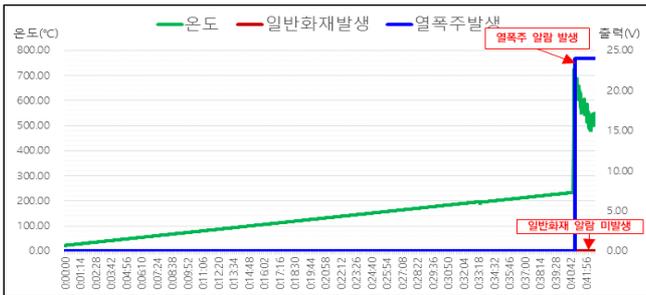
재 사고를 배터리 열폭주에 의한 화재 사고와 정확하게 구별하여 감지할 수 있음을 확인하였다.



[그림 7] 케이블 화재 시험 PLC 알람 발생 그래프



[그림 5] 리튬이온전지 열폭주 시험 센서 동작 그래프



[그림 6] 리튬이온전지 열폭주 시험 PLC 알람 발생 그래프

4.2 비 배터리 화재 감지시험

시험 시작 12초 경, 케이블에 강제로 불을 붙이고 챔버에 위치시켰고, 약 5초 뒤 그림 7과 같이 PLC에서 비배터리 화재 알람이 발생하였다. 시험이 종료될 때까지 열폭주 발생 알람은 발생하지 않았다.

상기의 시험 조건에 따라, 기타 요인에 의한 비 배터리 화재 사고 특성을 분석하기 위하여, 비 배터리 화재 감지 시험을 수행한 결과는 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 시험 시작 12초 경, 케이블에 강제로 불을 붙인 뒤 챔버에 위치시켰고, 약 5초 뒤 그림 7과 같이 PLC에서 비배터리 화재 알람이 발생하였다. 하지만, 시험이 종료될 때까지 열폭주 알람은 발생하지 않았으므로, 본 논문에서 제안한 알고리즘이 기타 요인에 의한 비 배터리 화

5. 결 론

본 논문에서는 ESS 화재 이상정후를 조기에 감지하고 화재 종류를 구분하기 위하여, 리튬이온전지의 열폭주 메커니즘을 고려한 ESS 화재감지 알고리즘을 제안하였다. 또한, 제안한 알고리즘을 바탕으로 리튬이온전지 열폭주 시험을 수행한 결과, PLC에서 리튬이온전지의 벤팅을 감지하여 발생한 화재가 리튬이온전지의 열폭주임을 확인할 수 있었다. 한편, 케이블 화재 시험을 수행한 결과, PLC에서 리튬이온전지의 벤팅 없이 발생한 화재임을 인지하여 비배터리 화재임을 확인할 수 있어, 제안한 ESS 화재감지 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No. 20213030160080)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 산업통상자원부, “ESS 사고원인 조사결과 및 안전강화 대책 발표”, 보도자료, 2019.06.
- [2] 장홍제 외, “에너지저장장치의 안전성 확보를 위한 화재요인 분석 및 표준.안전기준 개발방향 연구”, 표준인증안전학회지, 2019.09.
- [3] Nexceris, LLC, “Off-gas detection for Lithium-ion Battery System”, Data Pack for NFPA855 Committee, July 11, 2018.
- [4] UL, “Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems”, UL9540A, 2018.01.