리튬이온배터리의 화재발생메커니즘을 고려한 ESS 화재감지 알고리즘에 관한 연구

최형석*,**, 황소연**, 김남현***, 김현재***, 노대석*
*한국기술교육대학교, **(주)티팩토리, ***한국산업기술시험원
e-mail: elroi91@tfactory.kr

A Study on Fire Detection Algorithm in ESS by Considering Fire Mechanism for Li-ion Battery

Hyoung-Seok Choi*,**, So-yeon Hwang**, Nam-Hyun Kim***, Hyun-Jae Kim***, Dae-Seok Rho*
*Korea University of Technology and Education, **TFactory,Inc., ***Korea Testing Laboratory

요 약

정부의 녹색성장 및 탄소 중립 정책에 따라, 대용량 ESS(energy storage system)의 보급이 급속히 확산되고 있지만, 2017년 8월부터 시작된 ESS의 화재사고로 인하여 관련 업계가 큰 타격을 받고 있다. 이에 정부의 권고사항과 배터리 제조사의 화재대응 대책이 적용되고 있지만, 여전히 ESS의 화재가 발생하고 있다. 한편, ESS의 화재는 한번 발생하면 쉽게 진압되기 어렵고, 대규모 화재로 이어질 가능성이 높은데, 그 이유는 ESS에 사용된 리튬이온배터리의 화재 특성이 일반 화재 특성과 큰 차이가 있기 때문이다. 또한, ESS 화재의 발생 단계에 따라 조기에 진압하거나 화재 확산을 방지해야 하는데, 현재는 ESS의 화재 발생단계를 구분할 수 있는 방안이 없어 화재 발생 시 ESS가 전소될 가능성이 많은 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 ESS용 리튬이온배터리의 화재를 예방하거나 조기에 검출하기 위하여, ESS용 리튬이온배터리의 화재 특성을 분석하고, 이를 기반으로 리튬이온배터리의 화재 이상징후를 선정하며, 이를 정확하게 검출할 수 있는 방안을 제안한다. 또한, 화재 발생단계를 구분하여 판단하는 ESS 화재감지 알고리즘을 제시하고, 제안한 알고리즘의 유효성을 검증할 수 있는 모의 화재시험장치를 구현한다. 이를 토대로 ESS 화재 모의시험을 수행한 결과, 리튬이온배터리의 화재 이상징후를 조기에 검출하고 ESS 화재단계를 정확하게 구분할 수 있어 제안한 알고리즘의 유효성을 확인하였다.

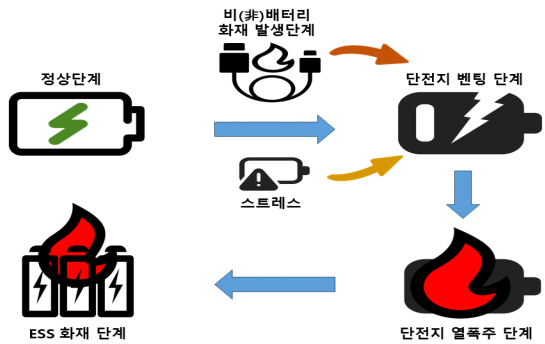
1. 서 론

2015년 유엔기후변화회의에서 채택된 '파리 협정' 이후, 국내에서도 탄소중립 정책을 실시함에 따라 에너지저장장치(energy storage system, ESS)의 설치사례가 증가하고 있지만, 2017년부터 시작된 에너지저장장치의 화재사고가 관련 산업계에 악영향을 끼치고 있다. 리튬이온배터리의 화재와 일반 화재의 특성에 큰 차이가 있는데, 일반 화재의 경우, 적절한 소화장비를 사용하면 가연성 물체가 전소하기 전에 화재를 진압할 수 있지만, 리튬이온배터리 기반의 에너지저장장치에서 발생하는 화재는 리튬이온배터리의 열폭주(thermal runaway)로 인해 화재가 급속하게 확산되며 인접한 배터리에 전이되어, 여러 대의 에너지저장장치에서 열폭주가 연쇄적으로 발생할 수 있다[1]. 이러한 ESS 화재는 발생 단계에 따라 조기에 진압하거나 화재 확산 방지를 해야 하는데, 현재는 ESS의 화재 발생단계를 구분할 수 있는 방안이 없어 화재 발생 시 ESS가 전소되는 실정이다. 이를 위해서는 리튬이온배터리의 특성을 고려한 ESS 화재감지 및 판단기술이 필요하다[2-3]. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온배터리 ESS의 화재 발생메커니즘을 분석하고 이를 바탕으로 리튬이온배터리의 화재 이상징후를 분석하여 검출 방안을 제시하며, ESS 화재 발생단계를 판단하여 구분하는 알고리즘을 제안한다. 또한, 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 ESS 화재 시험장치를 구성하고, 화재 단계를 구분하는 특성분석 시험을 수행한 결과, 제안한 알고리즘이 리튬이온배터리의 화재 이상징후를 검출하고 ESS 화재 발생단계를 구분함을 확인하여, 본 논문의 유용성을 알 수 있었다.

2. 리튬이온배터리 ESS의 화재 발생 메커니즘

리튬이온배터리의 화재 발생 메커니즘은 그림 1과 같은 단계로 구분할 수 있다. 정상동작 단계는 리튬이온배터리를 비롯한 ESS 구성 장치들이 고장 없이 정상적으로 동작하는 단계이며, 비(非)배터리 화재 발생단계는 리튬이온배터리의 개입 없이 화재가 발생하는 단계로, 과부하로 인한 케이블, 부스바 등의 화재, 장치의 결함이나 과열로 발생하는 화재 등을 예로 들 수 있다. 이 단계에서 조기에 화재를 진압하지 않는다면, 리튬

이온배터리에 열적 스트레스를 가하게 되어 화재가 발생할 수 있다. 한편, 단배터리 벤팅 단계는 리튬이온배터리의 단배터리가 열적, 전기적, 물리적 요인에 의하여 지속적으로 스트레스를 받아 벤팅이 발생하는 단계이다. 이 단계에서 시스템 긴급정지(emergency stop)나 메인 전력 차단 등의 적절한 대응조치를 취하지 않을 경우, 배터리 열폭주 발생단계로 이어질 수 있다. 또한, 단배터리 열폭주 단계는 리튬이온배터리의 벤팅 단계 이후 열폭주가 발생하는 단계이다. 여기서, 단배터리의 열폭주는 인접 배터리로 열적 스트레스를 전파하여 연쇄적인 열폭주를 일으키기 때문에, 조기에 열폭주를 감지하여 냉각 또는 소화 등의 화재진압을 시도해야 한다. 마지막으로, ESS화재 발생단계는 리튬이온배터리의 열폭주로 인한 단배터리의 화재가 인접 배터리로 열충격을 주어 모듈, 랙 단위로 확산하는 단계이다. 여기서, 리튬이온배터리에서 모듈 급으로 열폭주가 발생하면 일반적인 소화방식으로는 화재를 진압할 수 없으며, 이 단계에서는 리튬이온배터리에서 발생하는 가연성 가스가 농축되어 폭발이 발생하지 않도록 대응하는 것이 가장 중요하다.



[그림1] 리튬이온배터리 화재 발생단계

3. 리튬이온배터리의 화재 발생단계를 고려한 ESS 화재감지 알고리즘

3.1 화재 이상징후의 감지방안

리튬이온배터리의 열폭주 전의 화재 이상징후는 직접 이상징후와 간접 이상징후로 구분할 수 있으며, 직접 이상징후는 온도, 전압, 오프가스이며 그 특성은 표 1과 같다.

[표1] 화재의 직접적인 이상징후

구분	항목	이상징후의 특성
직접징후	온도	배터리에서 벤팅 및 열폭주가 발생하게 되면 내부 온도가 상승
	전압	원통형과 각형 리튬이온배터리는 열폭주가 진행되면서 전압이 강하되지만, 파우치형 리튬이온배터리는 규칙적인 전압 변동은 없음.
	오프가스	오프가스는 리튬이온배터리의 가장 명확하고 직접적인 이상징후로서, 리튬이온배터리 열폭주가 발생하기 이전 벤팅 단계에서 발생함.

또한, 화재 간접징후는 산소, 압력, 먼지, 가연성가스가 있으며 그 특성은 표2와 같이 나타낼 수 있다.

[표2] 화재의 간접 이상징후

구분	항목	이상징후의 특성
간접징후	산소	리튬이온배터리 열폭주 시 산소를 차단하더라도 내부에서 발생하는 산소로 인해 화재가 지속되는 특징이 있음.
	압력	벤팅과 열폭주 발생시 배터리와 배터리 주변에 발생하는 압력의 변화는 화재감지에 중요한 간접적인 요인으로 평가
	먼지	벤팅 및 열폭주시 먼지와 비슷한 입자 크기를 가진 부산물이 발생할 수 있음.
	가연성가스	벤팅 이후 오프가스와 같은 가연성 가스가 열폭주까지 배출되기 때문에, 화재의 간접적인 이상징후 항목으로 선정함.

3.2 화재 단계별 감지방안

리튬이온배터리를 적용한 ESS의 화재 단계를 판단하기 위하여, 각 화재 단계의 특정 파라미터를 검출할 수 있는 센서의 선정과 동작특성을 평가하여 화재단계를 결정하는 알고리즘이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 표 3과 같이 화재 단계별 감지방안을 제안한다.

[표3] ESS 화재 단계별 감지방안

단계	ESS 상태	센서 동작	특징
1	정상	-	-
2	비배터리 화재 발생	연기 감지	비배터리 화재 감지
3	배터리 벤팅 발생	오프가스 검출	오프가스 검출을 통한 벤팅 판단
4	배터리 열폭주 발생	오프가스 검출 연기 감지	배터리의 열폭주 판단
5	ESS 화재 발생	오프가스 검출 연기 감지 열 감지	모듈 또는 랙단위의 ESS 화재

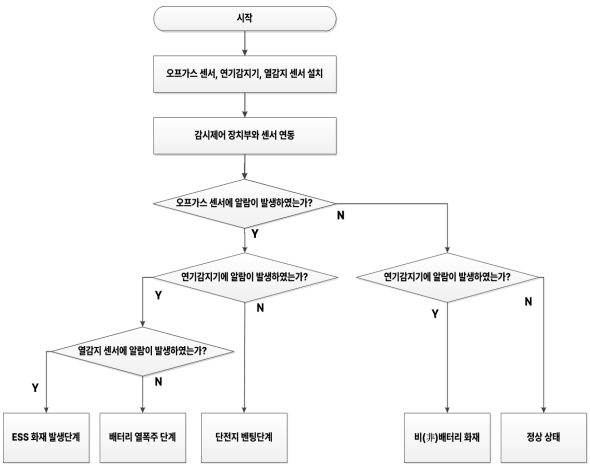
3.3 ESS 화재 단계별 감지 알고리즘

상기에서 제시한 센서들을 바탕으로, 리튬이온배터리 ESS의 화재 단계를 정확하게 판단하는 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] ESS 설치공간의 적절한 위치에 오프가스 검출기, 연기감지기, 열감지기를 설치한다.
[Step 2] 설치한 감지기는 PLC와 연결하여 센서 동작 상태를 실시간으로 감시한다.
[Step 3] 오프가스 검출기가 동작하고 다른 감지기들은 동작하지 않았다면 단배터리 벤팅 단계로 판단한다.
[Step 4] 오프가스 검출기와 연기감지기가 동작하고, 열감지기는 동작하지 않으면 단배터리 열폭주 단계로 판단한다.
[Step 5] 설치한 모든 감지기가 동작하면 ESS 화재 발생단계로 판단한다.
[Step 6] 연기감지기만 동작하고 다른 감지기들은 동작하지 않

았다면 비배터리 화재 발생단계로 판단한다.
[Step 7] 설치한 모든 감지기가 동작하지 않는다면 정상상태로 판단한다.

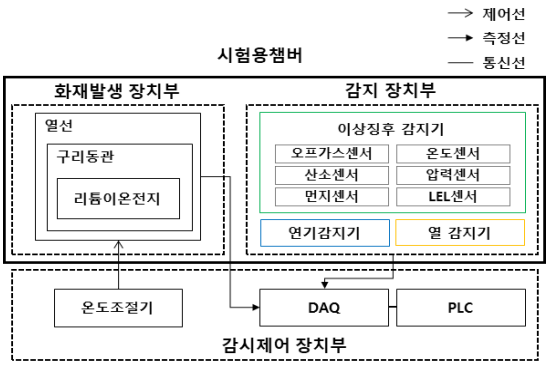
본 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같다.



[그림2] 리튬이온배터리 ESS의 화재감지 알고리즘

4. ESS 화재 감지장치 구현

제안한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여, ESS 화재 시험장치를 구현한다. 먼저, 화재발생장치는 ESS 화재를 유사하게 발생시키는 장치로, 리튬이온배터리 가열장치와 비배터리 화재 발생을 위한 케이블로 구성한다. 또한, 오프가스 검출 센서와 공기흡입형 연기감지기, 차동식 열 감지기로 감지장치부를 구성하여 화재발생 장치부 상단에 설치한다. 여기서, 차동식 열감지기는 급격한 온도상승이 있을 때 알람이 발생하는 장치로, 특정 온도에서 알람이 발생하는 정온식 열감지기와 차이가 있다. 그림 3은 화재발생 장치부와 감지장치부의 구성을 나타낸다. 한편, 감지장치부의 측정 값은 PLC와 연결되어 센서의 알람 발생여부를 실시간으로 파악하고, 제안한 알고리즘을 적용하여 현재 시스템의 화재 단계가 어떤 단계인지 알 수 있도록 출력 신호를 내보내며, PLC의 화재 단계 신호를 측정하고 저장한다.



[그림 3] 화재 감지장치 구성도

5. 시험 결과 및 분석

5.1 시험조건

리튬이온배터리의 이상징후 및 화재 발생단계 감지 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 리튬이온배터리 열폭주 시험과 화재단계 시험을 수행한다. 리튬이온배터리 열폭주 시험은 표 4와 같이 UL9540A 시험방법을 참고하여, 국내 원통형 리튬이온배터리를 외부가열하여 진행하고, 이상징후감지기 및 연기감지기와 열감지기의 센서 출력값을 확인한다[4].

[표4] 배터리 화재 발생단계 감지시험조건

항목	조건
시험 구분	리튬이온배터리 화재 발생단계 감지
시료	원통형 리튬이온배터리 셀
충전율	SOC 100%
스트레스 요인	배터리 표면 외부 가열
온도 파라미터	분당 5~7℃ 상승

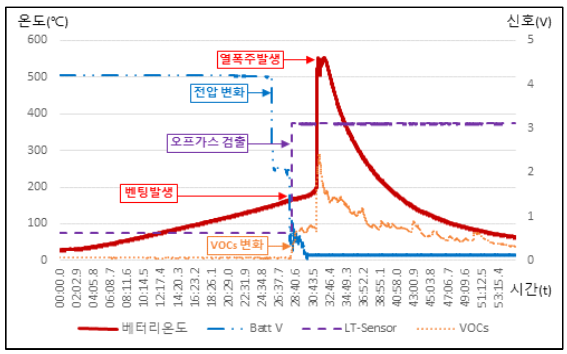
화재단계 시험은 배터리가 개입하지 않은 화재와 단배터리 및 ESS 화재가 발생함을 가정한 시험으로 진행한다. PLC에는 리튬이온배터리 ESS의 화재 감지 알고리즘을 적용하고, 전압레벨(analog output)에 따라 화재 단계를 구분지어 출력하도록 기능 구현한다. 계측기에서는 PLC의 아날로그 전압 출력 측정을 통해 화재 단계를 구분하여 표시하는데, 여기서 PLC 출력 전압은 표 5와 같다.

[표5] ESS 화재 단계 감지 표시값

단계	전압	내용
1	1.0 Vdc	정상상태
2	2.0 Vdc	비배터리 화재 발생
3	3.0 Vdc	배터리 벤팅 발생
4	4.0 Vdc	배터리 열폭주 발생
5	5.0 Vdc	ESS 화재 발생

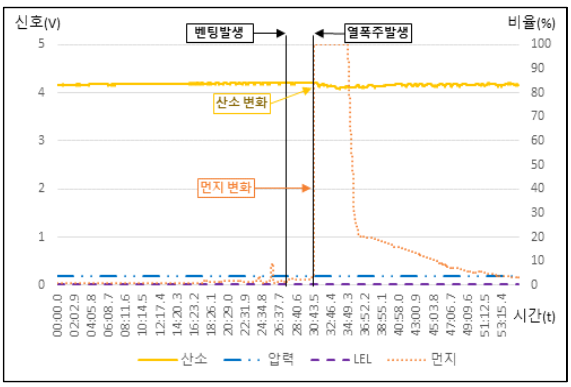
5.2 리튬이온배터리 화재 이상징후 특성분석

리튬이온배터리의 화재 시험을 수행한 결과, 배터리 온도는 지속적으로 상승하다가 28분 9초경 순간적으로 온도가 소폭 하락하였다가 다시 상승하였는데, 이것은 벤팅 발생에 따른 현상이다. 이때, 오프가스 검출 센서의 트리거와 VOCs 센서의 값에 변화를 통해 오프가스를 검출하였다. 이후 30분 경, 온도가 급격히 치솟으면서 리튬이온배터리 열폭주가 발생하였는데, 마찬가지로 VOCs 센서의 값이 크게 치솟는 것을 확인하였다. 다만 전압의 경우, 벤팅 이전에 전압이 순간적으로 감소하였는데, 이는 원통형 배터리 내에 포함된 보호회로가 고열에 의해 동작한 것으로 추측되며, 벤팅 시기에 전압이 2차적으로 감소하여 벤팅시에도 전압값에 변화를 확인할 수 있었다. 직접 이상징후 검출을 통해 원통형 배터리의 벤팅시 전압, 온도, 오프가스의 변화를 확인하였으며, 특성은 그림 4와 같다.



[그림4] 화재 직접징후 특성분석(온도, 전압, 오프가스)

또한, 산소는 열폭주 시 값이 소폭 하락하였다가 천천히 회복하는 모습을 보여, 열폭주 간 주변 공기 중 산소를 소모하는 것을 확인할 수 있었으며, 먼지 역시 벤팅시에는 유의미한 값의 변화가 없었지만 열폭주시 포화상태까지 값이 상승하는 것을 확인하였다. 한편, 압력과 LEL은 열폭주 이후까지 값의 변화가 일어나지 않았는데, 이는 시험용 챔버가 개방형 구조인 이유로 추측된다. 산소와 먼지, 압력, LEL 센서 모두 벤팅 시 특별한 값의 변화는 없었으며, 간접징후 특성은 그림 5와 같다.



[그림5] 화재 간접징후 특성분석 (산소, 압력, LEL, 먼지)

5.3 화재 발생단계 특성분석

시험 시작 시에는 모든 센서에 알람이 발생하지 않아 측정장치에서 1.0 Vdc를 출력하여 정상상태임을 알 수 있었다. 30초 후 시험장치 내 케이블 더미를 점화시켰고, 7초 후 공기흡입형 연기감지기에서만 알람이 발생하여 측정장치에 2.0 Vdc 신호가 나타나 비배터리 화재 발생단계임을 나타내었다. 이후 케이블 더미를 제거하고 바로 배터리 가열장치를 동작시켜 배터리에 열적 스트레스를 전달하였고, 약 12분 후 오프가스 검출 센서에서만 알람이 발생하여 단배터리 벤팅 발생단계임을 알 수 있었다. 약 3분 후, 단배터리 열폭주가 발생하였고 10초 이내에 공기흡입형 연기감지기에 알람이 발생하면서 단배터리 열폭주 발생단계를 나타내었다. 이후 약 2분 후, ESS 화재를 모의하기 위하여 차동식 열감지기에 열 자극을 주었고 곧바로 알람이 발생하여 ESS 화재 발생단계를 나타내었으며, 상기의 화재 발생단계 특성은 표 6과 같다.

[표6] 배터리 화재시험 결과

시간 (mm:ss)	전압 (Vdc)	단계	이벤트
00:00	1.0	1	정상상태
00:30	1.0	1	케이블 점화
00:37	2.0	2	비배터리 화재 발생단계 알람
01:27	1.0	1	케이블 제거 연기감지기 알람 초기화 배터리 가열 시작
13:54	3.0	3	단배터리 벤팅 단계 알람
16:18	4.0	4	단배터리 열폭주 단계 알람
18:38	5.0	5	ESS 화재 발생단계 알람

6. 결 론

ESS 화재사고에 적절하게 대응하기 위하여, 본 논문에서는 ESS용 리튬이온전지의 화재 이상징후를 선정하고, 이상징후 검출을 위한 방안을 제안하였으며, 화재 발생단계 판단을 위한 ESS 화재감지 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘의 유효성을 검증하기 위한 화재 시험장치를 구성하여 리튬이온전지 화재 이상징후 특성분석 시험과 화재단계 모의시험을 수행한 결과, 전압, 온도, 오프가스 파라미터 검출을 통해 리튬이온전지의 화재 이상징후를 조기에 판단할 수 있었으며, 오프가스 센서는 리튬이온전지의 오프가스를 검출하여 벤팅 단계를 확인할 수 있었다. 또한, ESS 화재감지 알고리즘이 적용된 화재 감지장치는 ESS 화재 시험의 각 단계를 모두 구분할 수 있음을 알 수 있어 제안한 알고리즘의 유효성을 확인하였으며, 향후에는 본 연구를 확장하여 다양한 화재 시나리오를 구성하고 각 화재 단계에 대한 적절한 대응방안을 설계하여 ESS 화재에 대해 종합적으로 대응할 수 있는 방법을 연구하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20214910100010 & No.20215910100030)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] UL9540A, “Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems”, UL, U.S., Third Edition, vol. 6, no. 2, pp.10-11, 2018.1