

리튬이온배터리 기반의 ESS용 화재 단계 판단알고리즘에 관한 연구

최형식**, 김지명*, 이명근*, 임민규***, 노대석*
*한국기술교육대학교, ** (주)티팩토리, ***한국산업기술시험원
e-mail: elroi91@tfactory.kr

A Study on the Assessment Algorithm for Fire Stages in Li-ion based ESS

Hyoung-Seok Choi**, Ji-Myung Kim*, Myung-Geun Lee*, Min-Gyu Lim***, Dae-Seok Rho*
*Korea University of Technology, **TFactory,Inc., ***KTL

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 높는데, 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 ESS의 화재 발생 메커니즘을 제시하고, 화재 발생단계를 평가할 수 있는 파라미터와 센서를 도출하여, 이를 바탕으로, 화재 발생단계를 구분하는 판단 알고리즘을 제시하며, 이를 검증할 수 있는 모의 화재 발생 시험장치를 구현한다. 상기에서 제시한 판단 알고리즘과 시험장치를 통해 단계별 ESS 화재 시험을 수행한 결과, 본 논문에서 제시한 판단 알고리즘이 화재발생 단계를 구분하는데 유효함을 확인하였다.

1. 서 론

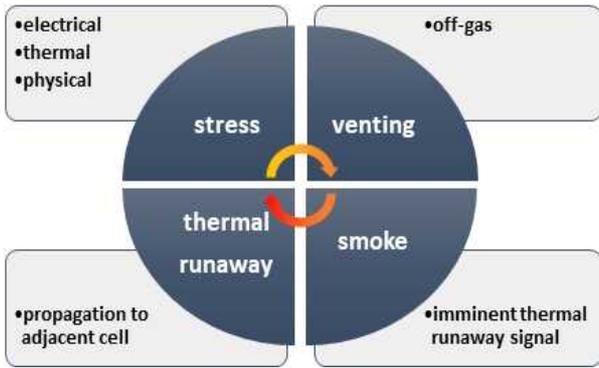
재생에너지 발전의 핵심 장치인 ESS에서 현재까지 총 39건의 화재사고가 발생하여 많은 재산피해가 보고되고 있다[1-2]. 일반 화재의 경우 적절한 소화장비를 사용하면 가연성 물체가 전소하기 전에 화재를 진압할 수 있지만, 리튬이온배터리 기반의 ESS에서 발생하는 화재는 배터리 열폭주(thermal runaway)로 인하여 화재가 급속하게 확산되며, 인접한 배터리 전지에 전파되어 대규모 화재로 이어진다[3]. 이러한 ESS 화재는 발생 단계에 따라 조기에 진압하거나 화재 확산 방지에 총력을 기울여야 하는데, 현재는 ESS의 화재 발생단계를 구분할 수 있는 방안이 없어 화재 발생 시 ESS가 전소되도록 둘 수 밖에 없는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는, 리튬이온배터리 ESS의 화재 발생특성을 분석하고, 이를 바탕으로 ESS 화재 발생단계를 구분하고 판단하는 알고리즘을 제시한다. 또한, 알고리즘의 유효성을 검증하기 위한 ESS 화재 모의시험장치를 구성하여 각 화재 발생단계를 구현하고, 알고리즘이 정상적으로 화재 단계를 구분하는지 시험한 결과, 시스템에서 ESS 화재 발생단계를 정확하게 판단함을 확인하여, 본 논문의 유용성을 알 수 있었다.

2. 리튬이온배터리 ESS의 화재 단계

2.1 리튬이온배터리의 화재특성

ESS용 리튬이온배터리 화재는 배터리 전지 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. 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 기화한 증기가 다량 배출

되다가 시간이 지날수록 분해가스의 배출량이 증가한다.



[그림 1] 리튬이온전지의 열폭주 발생 단계

또한, 벤팅 이후 열폭주까지 일정 시간이 존재하는데 이를 골든타임(golden time)이라고 할 수 있으며, 스트레스가 지속 되면 전지 내부 온도 증가로 분리막이 녹게 되고 결국 내부 단락이 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. 이러한 리튬이온배터리의 화재 발생특성을 고려하여 ESS 화재 단계를 구분하면 다음과 같다.

2.2 정상동작 단계

리튬이온배터리를 비롯한 ESS 구성 장치들이 고장 없이 정상적으로 동작하는 단계로, BMS와 PMS등을 통해 모니터링 또는 제어된다.

2.3 비(非)배터리 화재 발생단계

리튬이온배터리의 개입 없이 화재가 발생하는 단계로, 과부하로 인한 케이블, 부스바 등의 화재, 장치의 결함이나 과열로 발생하는 화재 등을 예로 볼 수 있다. 이 단계에서 초기에 화재를 진압하지 않는다면, 리튬이온배터리에 열적 스트레스를 가하게 되어 배터리가 화재에 개입할 수 있다.

2.4 단전지 벤팅 발생단계

리튬이온배터리의 단전지가 열적, 전기적, 물리적 요인에 의하여 지속적으로 스트레스를 받거나 배터리 전지 품질불량으로 인하여 배터리에 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.

2.5 단전지 열폭주 발생단계

리튬이온배터리의 벤팅 발생단계 이후 열폭주가 발생한 단계이다. 여기서, 단전지의 열폭주는 인접 전지로 열적 스트레스를 전파하여 연쇄적인 열폭주를 일으키기 때문에, 초기에 열폭주를 감지하여 냉각 또는 소화 등의 화재진압을 시도해야 한다.

2.6 ESS 화재 발생단계

리튬이온배터리의 열폭주로 인한 화재가 전지 단위를 벗어나 모듈, 랙 단위로 확산하는 화재 단계이다. 리튬이온배터리에서 모듈 급으로 열폭주가 발생하면 일반적인 소화방식으로 화재를 진압할 수 없으며, 이 단계에서는 리튬이온배터리에서 발생하는 가연성 가스가 농축되어 폭발이 발생하지 않도록 대응하는 것이 가장 중요하다.

3. ESS의 화재 단계 판단알고리즘

리튬이온배터리 ESS 화재 단계를 사용자 또는 관리자가 판단하기 위해서는, 각 화재 단계의 특정 파라미터를 검출할 수 있는 센서와, 센서들의 출력을 조합하여 결정하는 알고리즘이 필요하다. 정상상태에서는 온도 센서를 통해 ESS 운영환경의 이상을 사전에 감시할 수 있다. 또한, 오프가스 검출 센서를 통해 리튬이온배터리의 벤팅 발생단계를 구분할 수 있으며, 공기흡입식 연기감지기를 통해 ESS의 화재를 초기에 검출할 수 있다. 한편, ESS에서 대규모 화재가 발생하게 되면 배터리를 최상단까지 열기가 번지게 되는데, 배터리를 최상단에 열감지 센서를 설치하게 되면 대규모 화재를 구분할 수 있다. 표 1은 ESS 화재 단계를 구분하여, 해당 단계에서 유용한 센서를 나타낸다.

[표 1] ESS 화재 단계별 검출 센서

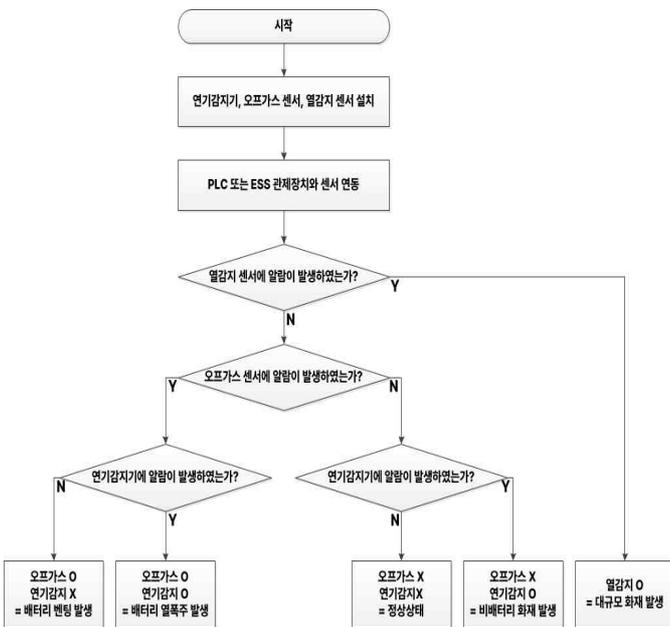
단계	ESS 상태	센서 동작	특징
1	정상	-	센서 동작 없음
2	비배터리 화재 발생	연기감지기	화재 초기 감지
3	단전지 벤팅 발생	오프가스 센서	오프가스 검출을 통한 벤팅 판단
4	단전지 열폭주 발생	오프가스 센서 연기감지기	배터리의 열폭주 판단
5	ESS 화재 발생	오프가스 센서 연기감지기 열감지 센서	모듈 또는 랙단위의 ESS 화재를 판단

상기에서 제시한 센서들을 바탕으로, 리튬이온배터리 ESS

의 화재 단계를 정확하게 판단하는 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

- [Step 1] ESS 설치공간의 적절한 위치에 연기감지기, 오프가스 검출 센서, 열감지 센서를 설치한다.
- [Step 2] 설치한 센서는 PLC 또는 관제장치와 연결하여 센서 동작 상태를 실시간으로 감시한다.
- [Step 3] 오프가스 검출 센서가 동작하고 다른 센서들은 동작하지 않았다면 단전지 벤팅 발생단계로 판단한다.
- [Step 4] 연기감지기만 동작하고 다른 센서들은 동작하지 않았다면 비배터리 화재 발생단계로 판단한다.
- [Step 5] 오프가스 검출 센서와 연기감지기가 동작하고, 열감지 센서는 동작하지 않았다면 단전지 열폭주 단계로 판단한다.
- [Step 6] 설치한 모든 센서가 동작하면 ESS 화재 발생단계로 판단한다.
- [Step 7] 설치한 모든 센서가 동작하지 않는다면 정상상태로 판단한다.

본 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같다.



[그림 2] 리튬이온배터리 ESS의 화재 단계 판단알고리즘

4. ESS 화재 모의시험장치 구현

제안한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여, ESS 화재 모의시험장치를 구현한다. 먼저, 발화장치는 ESS 화재를 유사하게 발생시키는 장치로, 리튬이온배터리 가열장치와 비배터리 화재 발생을 위한 케이블로 구성한다. 또한, 오프가스 검출 센서와 공기흡입형 연기감지기, 차동식 열 감지기로 센서시스템을 구성하여 발화장치 상단에 설치한다. 여기서, 차동식 열감지기는 급격한 온도상승이 있을 때 알람이 발생하는 장치로, 특정 온도에서 알람이 발생하는 정온식 열감지기와 차이가 있다. 그림 3은 발화장치와 센서시스템의 설치 위치와 구성을 나타낸다.



[그림 3] ESS 화재 모의시험장치 구성도

한편, 센서시스템의 측정 값은 PLC와 연결되어 센서의 알람 발생여부를 실시간으로 파악하고, 제안한 알고리즘을 적용하여 현재 시스템의 화재 단계가 어떤 단계인지 알 수 있도록 계측기로 출력 신호를 내보내며, 계측기는 PLC의 화재 단계 신호를 측정하고 저장한다.

5. 시험 결과 및 분석

5.1 시험조건

시험은 ESS 화재 모의시험장치를 기반으로 수행하며, 배터리가 개입하지 않은 화재와 단전지 및 ESS 화재가 발생함을 가정한 시험으로 진행한다. PLC에는 리튬이온배터리 ESS의 화재 단계 판단 알고리즘을 적용하고, 전압 레벨(analog output)에 따라 화재 단계를 구분지어 출력하도록 개발한다. 계측기에서 PLC의 아날로그 전압 출력을 측정을 통해 화재 단계를 구분하여 표시하는데, 여기서 PLC 출력 전압은 표 2와 같이 1단계는 1.0Vdc, 2단계는 2.0Vdc, 3단계는 3.0Vdc, 4단계는 4.0Vdc, 5단계는 5.0Vdc로 나타낸다.

[표 2] ESS 화재 단계 검출 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

시험용 챔버내 18650 원통형 리튬이온배터리 인근에서 케이블을 강제로 발화시켜 추이를 지켜보다가 알람이 발생하면 케이블을 제거하고, 배터리 전지 가열장치를 동작시켜 배터리가 열적 스트레스를 받도록 한다. 이때, 시험용 랙 내부의 공기를 환기시키고 센서에 발생한 알람을 모두 초기화 시킨다. 배터리 가열장치는 분당 8~10℃ 정도로 전지를 가열하는 코일 히터와 온도조절기로 구성한다. 이후 단전지 열폭주까지 시험을 진행한 후, 열폭주가 완화된 상태에서 ESS 화재를 모의하고 시험을 종료한다. 여기서, 실제 ESS 화재를 발생시킬 수 없기 때문에 라이터의 불꽃을 활용하여, ESS 화재가 열감지 센서를 자극하는 것을 모의한다.

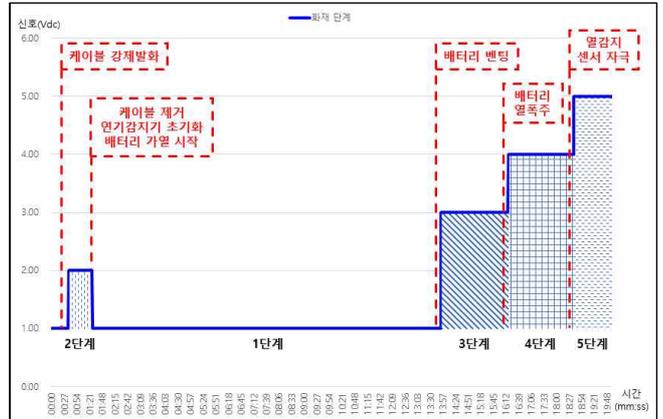
5.2 화재시험 특성분석

표 3과 같이, 시험 시작 시 모든 센서에 알람이 발생하지 않아 측정장치에서 1.0 Vdc를 출력하며 정상상태임을 나타내었다. 30초후 시험장치 내 케이블터미에 라이터로 불을 붙여 강제 발화시켰고, 7초 후 공기흡입형 연기감지기에서만 알람이 발생하여 측정장치에 2.0 Vdc 신호가 나타나 비배터리 화재 발생단계임을 나타내었다. 이후 케이블 터미를 제거하고 바로 배터리 가열장치를 동작시켜 배터리에 열적 스트레스를 전달하였고, 약 12분 후 오프가스 검출 센서에서만 알람이 발생하여 단전지 벤팅 발생단계임을 알 수 있었다. 약 3분 후, 단전지 열폭주가 발생하였고 10초 이내에 공기흡입형 연기감지기에 알람이 발생하면서 단전지 열폭주 발생단계를 나타내었다. 이후 2분 정도 지나 열폭주가 멈춘 상태에서, ESS 화재 모의를 위하여 차동식 열감지기에 라이터 화염으로 자극을 주었고 곧바로 알람이 발생하여 ESS 화재 발생단계를 나타내었다.

[표 3] 배터리 화재시험 결과

시간(mm:ss)	전압 (Vdc)	단계	이벤트
00:00	1.0	1	정상상태
00:30	1.0	1	케이블 강제 발화
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	배터리 벤팅 발생단계 알람
16:18	4.0	4	배터리 열폭주 발생단계 알람
18:38	5.0	5	대규모 화재 발생단계 알람

배터리 화재시험 결과에 따른 측정장치의 화재 단계 특성분석은 그림4와 같다.



[그림 4] ESS 화재 단계 특성분석

6. 결 론

ESS 화재사고에 적절하게 대응하기 위하여, 본 논문에서는 리튬이온배터리 ESS 화재 단계 판단알고리즘을 제시하고, 유효성을 검증하기 위한 시험장치를 구성하여 모의화재시험을 수행하였다. 시험 결과, 시스템이 각 화재 단계를 모두 구분할 수 있음을 알 수 있어 제안한 알고리즘의 유효성을 확인하였다. 향후에는 본 연구를 확장하여, 각 화재 단계에 적절한 대응방안이 무엇인지 알아보고, 추가로 다양한 화재 시나리오를 설계하여 종합적으로 ESS 화재에 대응할 수 있는 연구를 하고자 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 화재 요인 분석 및 표준.안전기준 개발방향 연구”, 표준인증안 전학회지, 2019.09.
- [3] Nexceris, LLC, “Off-gas detection for Lithium-ion Battery System”, Data Pack for NFPA855 Committee, July 11, 2018.