

ESS 운용환경 데이터를 이용한 리튬이온배터리 화재 위험 진단알고리즘에 관한 연구

최형석^{***}, 황소연^{**}, 이명근^{**}, 이수용^{**}, 노대석^{**}

^{*}(주)티팩토리, ^{**}한국기술교육대학교

e-mail:elroi91@tfactory.kr

A Study on the Fire Risk Diagnosis Algorithm of Li-ion Battery Using Operation Environment Data in ESS

Hyoung-Seok Choi^{***}, So-Yeon Hwang^{**}, Myung-Geun Lee^{**}, Soo-Yong Lee^{**}, Dae-Seok Rho^{**}

^{*}TFactory Co.,Ltd,

^{**}Dept. of Electric Engineering, Korea University of Technology and Education

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 권고 사항과 배터리 제조사의 화재대응 방안이 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, ESS에는 대부분 온도, 습도를 비롯한 환경 요인을 모니터링하는 장치가 설치되어 있지만, 리튬이온배터리의 화재 특성과 연관 지어 화재 위험을 판단하고 있지 않은 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 화재 위험성을 판단하기 위하여, ESS용 리튬이온배터리의 화재 특성을 분석하고, 이를 기반으로 온도, 습도, 가스, 먼지와 같은 운용환경 데이터 측정 방법을 제시하며, 운용환경 데이터 간의 상호 화재 위험도를 평가하여 화재 위험성을 진단하는 방안을 제안한다. 또한, ESS 화재 위험 진단알고리즘을 제시하고, 제안한 알고리즘의 유효성을 검증할 수 있는 ESS 화재 모의시험을 수행한 결과, ESS 화재 위험도를 정확하게 판단할 수 있어 제안한 알고리즘의 유효성을 알 수 있다.

1. 서 론

2015년 유엔기후 변화회의에서 채택된 ‘파리 협정’ 이후, 국내에서도 탄소중립 정책을 실시함에 따라 신재생에너지원 및 에너지저장장치(energy storage system, ESS)의 설치사례가 증가하고 있지만, 2017년부터 시작된 ESS의 화재사고가 관련 산업계에 악영향을 끼치고 있다[1-3]. 에너지저장장치의 화재는 리튬이온전지의 열폭주(thermal runaway) 때문에 피해가 커지며, 열폭주가 연쇄적으로 발생하게 되면 일반적인 소화장치로 화재를 억제할 수 없는 것이 현실이다. 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, ESS에는 대부분 온도, 습도를 비롯한 환경 요인을 모니터링할 수단이 설치되어 있지만, 리튬이온배터리의 화재 특성과 연관지어 화재 위험을 판단하고 있지 않은 실정이다. 즉, 대부분의 ESS용 리튬이온배터리의 보

호장치는 전기적인 위험요소에 대해서만 모니터링 할 뿐, 환경적 요인에 의해 발생할 수 있는 화재 위험성에 대한 판단은 이루어지지 않는다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 화재 위험성을 판단하기 위하여 ESS용 리튬이온배터리의 화재 특성을 분석하고, 온도, 습도, 가스, 먼지와 같은 운용환경 데이터 측정 방법을 제시하며, 운용환경 데이터 간의 상호 화재 위험관계를 도출하여 화재 위험성을 진단할 수 있는 방안을 제안한다. 이를 기반으로, ESS 화재 위험 진단알고리즘을 제시하고, 제시한 알고리즘의 유효성을 검증할 수 있는 ESS 화재 모의 시험을 수행한 결과, 화재 위험 진단알고리즘을 통해 ESS 화재 위험도를 정확하게 판단할 수 있어 제안한 알고리즘의 유효성을 확인하였다.

2. ESS 화재 발생 메커니즘

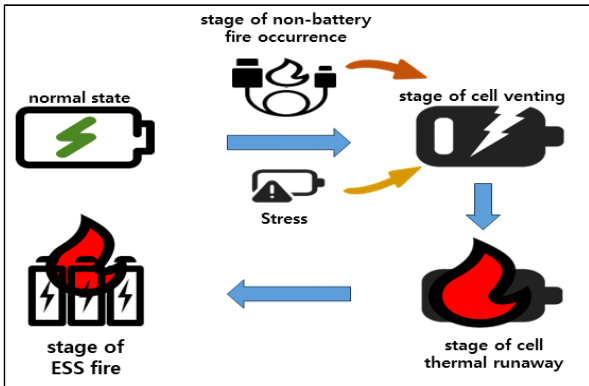
2.1 리튬이온배터리의 화재 발생 메커니즘

리튬이온배터리에 열적, 전기적 또는 기계적 충격이 가해지는 경우, 배터리의 내부온도가 상승하여 전해질이 끓어오르게 된다. 이때, 전해질이 기화되면 배터리 내부 압력이 증

가하게 되고, 이것이 지속되면 배터리 표면이 개방되는 벤팅(venting) 현상이 발생하여 전해질 증기 및 분해가스가 외부로 배출되는데, 이들을 통칭하여 오프가스로 정의된다[4]. 한편, 리튬이온배터리에 스트레스가 지속되면, 배터리 내부 온도 증가로 분해막이 녹게 되고 결국 내부단락이 일어난다. 내부 단락이 발생하면 다량의 반응가스(연기)가 배출되고, 이후 고열에 의해 점화가 되어 화재가 발생하는데 이것을 열폭주라 한다. 또한, 리튬이온배터리의 열폭주는 내부 에너지가 모두 소진될 때까지 끊임없이 열과 산소를 만들어내므로, 일반적인 소화 장비로는 진압할 수 없으며, 배터리 근처에 농축되어 있는 가연성 가스는 큰 폭발을 일으킬 수 있다.

2.2 ESS의 화재 발생 메커니즘

상기에서 제시한 리튬이온배터리의 열폭주에 의한 화재 발생특성을 고려하여 ESS 화재 단계를 구분할 수 있다. 즉, 리튬이온배터리의 화재 발생단계는 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 먼저 정상동작 단계는 ESS 구성 장치들이 고장 없이 정상적으로 동작하는 단계로, BMS와 PMS 등을 통해 모니터링 또는 제어된다. 또한, 비(非)배터리 화재 발생단계는 리튬이온배터리의 개입 없이 화재가 발생하는 단계로서, 과부하로 인한 케이블, 부스바 등이 화재와 장치의 결함이나 과열로 발생하는 화재이며, 이로 인해 리튬이온배터리에 열적 스트레스를 가하여 배터리 화재로 이어질 수 있다. 한편, 배터리 벤팅 단계는 배터리가 열적, 전기적, 물리적 요인에 의하여 지속적으로 스트레스를 받거나 비배터리 화재로 인하여 배터리에 벤팅이 발생하는 단계이다. 또한, 배터리 열폭주 단계는 리튬이온배터리의 벤팅 단계 이후 열폭주가 발생하는 단계이다. 여기서, 배터리의 열폭주는 인접 배터리로 열적 스트레스를 전파하여 연쇄적인 열폭주를 일으키기 때문에, 조기에 열폭주를 감지하여 냉각 또는 소화 등의 화재진압 조치를 수행해야 한다. 마지막으로, ESS 화재 발생단계는 리튬이온배터리의 열폭주로 인한 배터리의 화재가 인접 배터리로 열충격을 주어 모듈, 랙 단위로 확산하게 되는 단계이다.



[그림 1] ESS용 리튬이온배터리의 화재 발생단계

3. ESS 화재 위험 진단알고리즘

3.1 ESS 운용환경 데이터

대부분의 ESS의 경우, 환경감시를 위한 온/습도 센서와 화재 감지를 위한 연기감지기 또는 화재감지기를 설치하여 운영하고 있으며, 일부 ESS에는 오프가스 검출 센서가 ESS의 화재 이상징후를 감시하고 있다. 이처럼 개별 센서의 상태에 따라서 지정된 프로세스가 동작하게 되어있지만, 전체 센서의 상태를 복합적으로 연관지어 화재 위험성을 사전에 판단하는 기술은 도입되지 않은 상태이다. 따라서, 본 논문에서는 일반적인 ESS 환경 데이터인 온도, 습도와 더불어 먼지, 오프가스를 ESS 운용환경 데이터로 선정하고 이를 토대로 ESS 화재 위험진단 방안을 제안한다.

3.2 ESS 화재 발생 위험도 정의

ESS는 리튬이온배터리의 열폭주를 비롯하여 배선, PCB 화재 등 비(非)배터리 화재의 발생 가능성이 존재한다. 이러한 화재 발생 가능성을 ESS 화재 발생 위험도라 명명하고, 표 1과 같이 화재 발생 위험도에 따라 1에서 5단계까지 정의한다. 화재 발생 위험도 1단계는 배터리를 비롯한 시스템에 스트레스를 유발할 수 있는 단계로, 운용환경 요인이 직접적으로 화재에 관여하지 않는 단계이다. 위험도 2단계는 ESS 화재 발생 가능성이 생긴 단계이며, 위험도 3단계는 ESS 화재 발생 가능성이 높은 단계이다. 특히, 위험도 3단계는 운용환경 요인이 배터리를 비롯한 시스템의 화재를 발생시키는 직접적인 원인(절연과피 등)을 제공하는 단계이다. 위험도 4단계는 리튬이온배터리 열폭주의 가능성이 높은 단계로, 대규모 ESS 화재로 이어질 가능성이 높다. 위험도 5단계는 ESS에서 화재 폭발이 일어날 가능성이 있는 단계로, 가연성 가스가 농축되어 있다가 점화원과 산소와 반응하여 화재 폭발을 일으킬 수 있는 단계이다.

[표 1] ESS 화재 발생 위험도 단계

화재 발생 위험도	운용환경 요인에 의한 화재 가능성
1	시스템에 스트레스를 유발할 수 있음
2	시스템에 스트레스가 발생할 가능성 높음
3	ESS 화재 발생 가능성 있음
4	ESS 화재 발생 가능성 높음
5	ESS 화재 폭발 가능성 있음

ESS 화재 발생 위험도를 판단하기 위하여, ESS에 설치된 각종 센서에서 취득한 데이터, 즉 운용환경 데이터에 기반한 화재 위험 진단방안을 제안한다. 먼저, 상기의 ESS 운용환경 데이터를 취득할 수 있는 환경을 구성하고, 각각의 데이터를 PLC, 마이컴 등의 제어장치에서 표 2의 진리표에 따라 판단

하여 위험도를 출력한다.

[표 2] ESS 화재 위험진단방안

온도	습도	먼지	오프가스	위험도
▲				1
		▲		1
	▼			1
	▲			2
▼	▲			3
	▲	▲		3
			●	4
▲			●	5
	▼		●	5

온도가 정상범위에서 벗어나 상승하거나 먼지로 인해 절연 상태가 나빠지면, 배터리와 시스템에 스트레스를 전달할 수 있다. 또한, 낮은 습도는 정전기 및 아크로 화재 가능성을 만들 수 있으며, 높은 습도는 습기로 인한 PCB 오동작, 절연과 피 등을 야기할 수 있다. 한편, 높은 습도에서 낮은 온도가 되면 급격한 결로 발생으로 절연과피의 가능성이 증대되며, 마찬가지로 높은 습도에서 다량의 먼지는 수분과 결합해 절연을 파괴할 수 있다. 배터리에서 발생한 오프가스는 열폭주의 확실한 이상징후이기 때문에 높은 위험도를 가지며, 가연성 가스인 오프가스가 농축된 상태에서 건조상태나 고온으로 인한 아크나 화재를 만나게 되면 화재 폭발이 일어날 가능성이 있다. 이를 기반으로 운용환경 데이터에 가중치를 표 3과 같이 부여하고, 화재 위험진단을 수행하면 합산 가중치와 위험도와 동일한 결과를 갖게 되며, 합산 가중치가 5를 초과하는 위험도는 모두 위험도 5로 정의한다.

[표 3] ESS 운용환경 데이터 가중치

항목	고온	저온	건조	다습	먼지	오프가스
가중치	1	1	1	2	1	4

3.3 ESS 화재 위험 진단알고리즘

상기에서 제시한 ESS 화재 발생 위험도를 진단하기 위한 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] ESS 설치공간에, 운용환경 데이터를 수집할 수 있는 온도, 습도, 먼지, 오프가스 센서를 설치한다.

[Step 2] 각 센서의 경보상태를 확인하고, 경보 상태에 따라 A₀~A₃에 값을 입력한다.

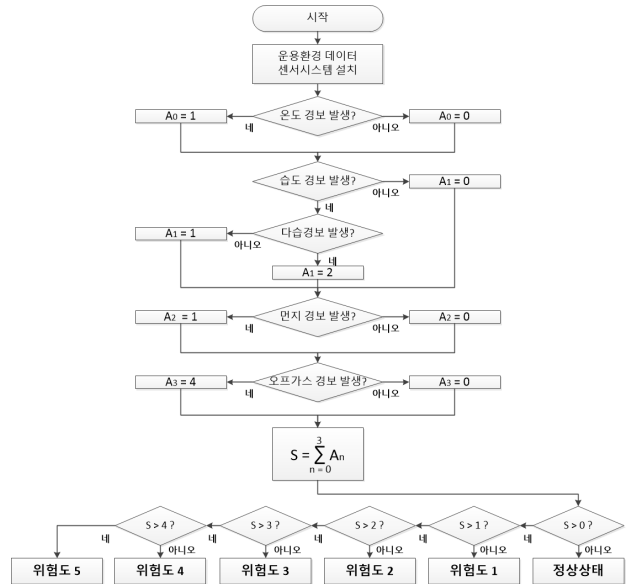
- A₀: 경보 없음=0, 온도경보=1
- A₁: 경보 없음=0, 건조경보=1, 다습경보=2
- A₂: 경보 없음=0, 먼지경보=1
- A₃: 경보 없음=0, 오프가스 경보=4

[Step 3] A₀~A₃의 합을 S로 연산한다.

[Step 4] S의 값에 따라 위험도를 결정한다.

- S = 0, 정상상태
- S = 1, 화재 위험도 1
- S = 2, 화재 위험도 2
- S = 3, 화재 위험도 3
- S = 4, 화재 위험도 4
- S ≥ 5, 화재 위험도 5

따라서, 상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같다.



[그림 2] ESS 화재 위험 진단알고리즘

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

ESS 화재 위험 진단알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여, ESS 운용환경 데이터 모의 시험장치를 구축하여 시험한다. 전체 시험장치는 센서부와 계측부로 이루어지는데, 센서부는 ESS 운용환경 요인인 온도, 습도, 먼지, 오프가스를 검출할 수 있는 센서로 구성되며, 이는 표 4의 내용과 같다.

[표 4] ESS 운용환경 데이터 측정용 센서

항목	장비	제조사	규격
온도 측정	THD-R-V	Autonics	-19.9~60.0°C
습도 측정	THD-R-V	Autonics	0.0~99.9%
먼지 측정	DSM101	RadonFTLab	PM 10
오프가스 측정	Li-ion Tamer	Nexceris	offgas vapor
PLC	PLC-S CM3	CIMON	AI/AO/통신
DAQ	GL820	Graphtec	20채널 Logger

각 센서의 출력값은 전압신호 및 통신 데이터로 출력되어 계측부 장비인 DAQ와 PLC로 연결된다. PLC는 센서 값이 지정된 임계치보다 높거나 낮으면 경보를 발생시키며, DAQ는 센

서 값과 PLC의 경보 값을 모두 측정하여 저장한다. 여기서, PLC에는 ESS 화재 위험 진단알고리즘이 적용된 상태로, 센서들의 경보 상태를 종합하여 화재 위험도를 전압 형태로 출력한다. 시험은 ESS 운용환경 요인인 온도, 습도, 먼지, 오프가스 알람을 발생시키고 화재 위험진단을 통한 위험도를 확인하는데, 여기서 시험 방법과 순서는 표 5의 내용을 따라 수행한다.

[표 5] ESS 화재 위험진단 특성분석 시험방법

순서	사용장비	시험방법
1	가습기	가습기 분무를 통한 다습환경 구성
2	청소기	청소기 먼지배출구 활용 먼지환경 구성
3	송풍기	송풍기 바람을 통한 정상상태 구성
4	전해질시료	DEC 전해질시료 분사를 통한 벤딩 모의
5	열풍기	열풍기 바람을 통한 고온환경 구성

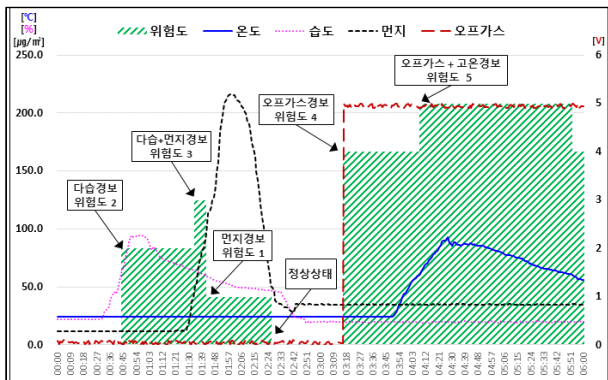
4.2 화재 위험진단 특성분석

상기의 시험조건을 바탕으로, ESS 운용환경 데이터를 통한 화재 위험진단 특성분석 시험을 수행한 결과는 표 6과 같다. 먼저, 센서시스템 인근에 가습기를 작동시키면 다습경보가 발생하여 PLC에서 위험도 2에 해당하는 2V를 출력하였고, 청소기 공기배출구를 센서시스템에 향하도록 하여 동작하면 위험도 3에 해당하는 3V를 출력하였다. 여기서, 시험장치 초기화를 위해 송풍기로 외기를 불어주었더니 다습경보와 먼지경보가 초기화 되었다. 이후 전해질 시료를 센서시스템에 분사하여 위험도 4에 해당하는 4V가 출력되는 것을 확인하였고, 이어서 열풍기로 온도를 상승시키자 위험도 5에 해당하는 5V 출력이 나오는 것을 확인할 수 있었다.

[표 6] ESS 화재 위험진단 특성분석 시험결과

순서	상황	온도	습도	먼지	오프가스	위험도
1	가습기 동작	0	2	0	0	2
2	청소기 동작	0	2	1	0	3
3	송풍기 동작	0	0	0	0	0
4	전해질 분사	0	0	0	4	4
5	열풍기 동작	1	0	0	4	5

화재 위험진단 특성분석 결과 그래프는 그림 3과 같으며, 화재 위험 진단알고리즘의 정상 동작 여부를 확인할 수 있다.



[그림 3] ESS 화재 위험진단 특성분석 시험결과 그래프

5. 결 론

본 논문에서는 일반적으로 ESS에 설치되는 온/습도 센서 뿐 아니라, 리튬이온배터리 열폭주 이상징후인 오프가스 검출 센서 및 환경 감시 센서인 먼지 센서를 통해 취득할 수 있는 ESS 운용환경 데이터를 기반으로 1~5단계의 화재 위험도를 정의하였고, 온도, 습도, 먼지, 오프가스 데이터를 복합적으로 연계하여 ESS 화재 위험 진단알고리즘을 제안하였다. ESS 화재 위험진단 특성분석 시험을 통해 정의된 화재 위험도를 판단하고, 위험도 단계를 정상적으로 출력하는 것을 알 수 있어 제안한 ESS 운용환경 데이터를 통한 화재 위험진단 알고리즘의 유용성을 확인하였다. 향후에는 화재 위험진단 알고리즘을 확대하여, 폭발위험진단 알고리즘 및 화재폭발 대응기술에 대한 연구를 진행하고자 한다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] "ESS Causes Investigation and Safety Reinforcement Measures Announcement", Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019.06.
- [2] Sung-Duck Cho, "A Study on Mechanism and Modeling of CMV in Sharing Energy Storage System", Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.24, no.4, pp. 616-625, 2023.04.
- [3] Sung-Moon Choi, "A Study on Characteristics and Modeling of CMV by Grounding Methods of Transformer for ESS", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.22, no.4, pp. 587-593, 2023.04.
- [4] S. Y. Hwang, 'A Study on the Detection Algorithm of Off-gas to Prevent Thermal runaway of Li-ion Battery for ESS', the Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE), vol.71, no.12, pp.1,787-1,795, 2022.12