

ESS의 안전성 향상을 위한 화재감시시스템에 관한 연구

정창, 태남경, 김재선, 최형락, 오승민, 박형도, 표상운, 권순찬, 최승규
건양대학교 재난안전소방학과
e-mail : skchoi@konyang.ac.kr

A Study on the Fire Monitoring System for Improving the Safety ESS

Chang Jung, Nam-Kyeong Tae, Jae-Seon Kim, Hyeong-Lak Choi, Seung-Min Oh,
Hyeong-Do Park, Sang-Woon Pyo, Soon-Chan Gwon, Seung-Kyou Choi
Department of Disaster Safety & Fire fighting, Konyang University

요 약

리튬이온배터리 기반의 에너지저장시스템 화재는 유독가스의 발생과 적절한 소화약제의 부재로 인해 화재진압에 어려움이 있어 심각한 인명피해와 재산피해를 야기할 수 있다. 에너지저장시스템의 보급이 늘어남에 따라 화재사고 및 재산피해가 발생하고 있으며, 에너지저장장치의 전압, 전류, 온도 등을 관리하는 데 실패한 BMS의 시스템적 오류가 사고의 주요 원인으로 추정되고 있다. 에너지저장시스템의 주요 화재 원인인 BMS의 시스템적 오류를 보완하고 열 폭주 이전에 Off-gas를 조기에 감지하여 화재를 예방할 수 있는 화재감시시스템이 요구된다. 이에 본 논문은 Off-gas 감지기를 이용하여 리튬이온배터리 화재 시 발생하는 Off-gas를 조기에 감지하여 화재가 발생한 랙의 정보를 BMS와 EMS에 각각 전송하고 배터리 셀의 열 폭주 이전에 전원을 차단하여 화재를 예방할 수 있는 화재감시시스템을 제시한다. 또한 Off-gas 감지기를 이용한 화재감시방안의 신뢰성을 확인하기 위하여 시험하고 분석한 결과, ESS의 안전을 확보하고 화재, 폭발사고를 예방하는 데에 유용함을 확인한다.

1. 서 론

ESS(Energy Storage System)는 기후변화에 대응하는 중요한 수단으로 국내에서도 그린 뉴딜 정책과 재생에너지 3020 이행계획 등을 수립하고 추진되고 있다. 또한, 태양광 발전 및 풍력발전 등 신재생에너지의 발전량은 증가하고 있으며 이에 따른 ESS의 보급이 활발하게 진행됨에 따라 화재사고 또한 증가하고 있다[1].

산업통상자원부는 최근 ESS 화재사고의 재발 방지대책의 일환으로 전기안전공사와 공동으로 분야별 전문가들과 함께 현장실태조사를 수행하여 “ESS 안전 강화 대책과 사고원인 조사결과”를 발표하였고, 이에 따른 ESS 안전성에 관한 기술 기준 및 제도개선 등 대책을 마련하고 있다[2].

소방청의 전국 ESS 현황 통계에 따르면 2018년 기준 854개소, 2021년 12월 기준 2,242개소로 집계되었으며 2017년 최초 화재 이후 2022년 1월 기준 33건의 화재가 지속적으로 발생하였으며, 이는 전체 설치 기준 화재 발생 확률이 1.22%에 이르는 것으로 일반적인 전기 시스템 화재 사고율인 0.5%와 비교 시 매우 높은 수준이다[3].

ESS의 리튬이온배터리 화재는 열화, 품질 불량, 스트레스

등으로 인해 내부 온도가 증가하게 되면 구성물질이 기화로 인해 내부 압력이 증가하고 배터리가 감당할 수 있는 압력을 벗어나게 되면 기계적으로 약한 부분이 터지거나 찢어지면서 내부 증기 및 Off-gas가 배출되며 열 폭주로 이어져 화재가 발생한다. 이러한 화재 폭발사고를 예방하기 위하여 리튬이온배터리의 열 폭주를 조기에 감지할 수 있는 첨단 화재감시시스템이 요구된다[4].

이에 본 논문에서는 Off-gas를 감지하여 발생한 랙에 대한 정보를 BMS(Battery Management System)와 EMS(Energy Management System)에 전송하고, 배터리 셀의 열 폭주 이전에 전원을 차단하여 화재를 예방할 수 있는 ESS의 안전성 향상을 위한 화재감시시스템을 제안한다. 또한 화재감시시스템을 이용한 화재감시방안의 신뢰성을 확인하기 위하여 시험하고 분석한 결과 ESS의 안전을 확보하고 화재, 폭발사고를 예방하는 데에 유용함을 확인한다.

2. ESS 화재사고 특성 분석

2019년 6월 정부에서 ‘민관합동 ESS 화재사고 원인조사 위원회’를 편성하여 진행한 ESS 화재사고 원인조사 결과에 따

르면, 배터리 보호시스템 미흡, 보호 체계 미흡, 운영환경 관리 미흡, 통합관리 체계 부재로 인해 ESS 화재가 발생하였지만, 산업통상자원부 통계자료에 따르면 ESS의 화재사고 현황은 표1과 같이 에너지저장시스템의 전압, 전류, 온도 등을 관리하는 데 실패한 BMS의 오류로 인해 화재폭발로 이어져 막대한 인명피해와 재산피해를 발생시킬 수 있어 이에 대한 안전대책이 요구된다[5].

[표1] 산업통상자원부 추정 ESS 사고 원인

일 자	사고 개요 및 원인
2017.08.02	고창군 상하면 전력시험센터 ESS 화재, BMS 전원 미인가 상태에서 화재 발생, 배터리 모듈의 전기적 발열에 의한 발화 추정, 15억 재산피해
2018.05.02	경산변전소 ESS 화재, 한진 측 BMS 설계상 문제 주장, BMS 시스템 오류, 23억원 재산피해
2018.06.02	영암 풍력발전소 연계용 ESS화재, BMS 시스템 오류, 88억원 재산피해
2018.06.15	군산 태양광 발전소 연계용 ESS화재, BMS 시스템 오류, 9억원 재산피해
2018.07.21	거창 풍력발전소 연계용 ESS화재, BMS 시스템 오류, 30억원 재산피해

또한, 2019년 11월 1일 글로벌 안전인증기관인 DNV-GL이 국내 ESS 화재를 조사한 결과, BMS가 전압, 전류, 온도를 측정하여 배터리 셀이 정상운전 범위에서 사용되도록 감시 제어하는 것만으로는 화재 사고를 예방하는 데 불충분하다는 한계를 발표하였다.

리튬이온배터리 셀을 사용하는 ESS 화재는 리튬이온배터리 내부의 휘발성 전해질에 의한 B급 화재, 전기 시설물이 타는 C급 화재, 리튬 금속에 의한 D급 화재에 모두 해당되며, 전해질 연소 시 대량의 유독가스가 발생한다. 그림1과 같이 ESS 화재진압을 충족시키는 완벽한 소화약제가 아직 없기 때문에 화재 발생 이전에 예방할 수 있는 감시제어시스템이 필요하다[6].

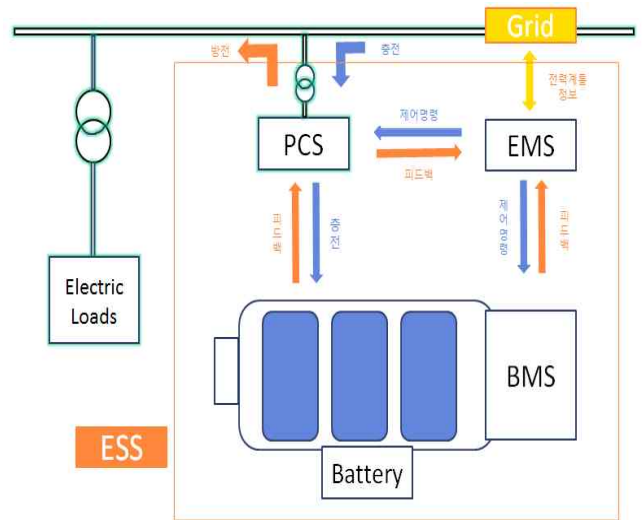
Suppression System(gas or trade name)	Fire Class	Collateral Damage Risk	Electrical Conductivity	Appropriate for Thermal Runway?	Thermal conductivity (heat management)	Human Toxicity
DuPont FM200	A,B,C	Green	Green	Red	Red	Yellow
CO2	B,C	Green	Green	Red	Red	Yellow
Water(Deionized)	A	Red	Red	Red	Green	Green
3M Novec 1230	A,B,C	Green	Green	Red	Red	Yellow
Copper Powder	D(only lithium)	Red	Red	Green	Yellow	Yellow
Foam	A,B	Red	Red	Red	Red	Yellow
Cold Fire	A,B,D	Red	Red	Green	Green	Yellow

[그림 1] 소화약제의 화재진압 적용 범위

3. ESS 화재 안전성 향상을 위한 화재감시 방안

3.1 ESS 화재 감지방안

ESS의 구성요소는 그림2와 같이 배터리의 전압, 전류, 온도 등을 측정하여 안전상태와 고장 유무를 진단하고 배터리의 온도와 셀 밸런싱 제어를 하는 BMS, 배터리와 EMS 사이에서 전력을 공급하거나 충전하는 역할을 수행하는 PCS(Power Conversion System), 배터리의 상태 모니터링과 PCS의 상태 모니터링 및 제어를 하며 컨트롤 센터에서 ESS를 모니터링하고 제어하기 위한 운영시스템인 EMS와 배터리(Battery) 총 4개로 구성된다[7].



[그림 2] ESS의 구성 및 운영 시스템

2017년 8월 이후 지속적으로 ESS 화재사고가 빈번히 일어나고 있으며, 화재사고의 원인으로는 운영환경 관리 미흡, 설치 부주의, ESS 통합제어·보호 체계 미흡 등이 있고 주요 화재 원인으로는 BMS 오류가 있다[8].

BMS 오류에 의한 화재는 Off-gas가 방출된 뒤 열 폭주로 이어질 때까지 기존의 BMS가 이것을 조기에 검출하지 못하고, 소방경보시스템 또한 단 셀의 열 폭주가 진행되어 인접 셀로 전파되기 전후에 이를 검출하기 때문에 실제적인 비-보호 영역이 발생하고 이로 인해 전소에 이르게 된다[9]. BMS 오류로 인한 ESS의 화재 사고를 예방하기 위해서는 배터리 안전을 위한 과전압, 과전류, 과열 등을 방지할 수 있는 기능 및 회로가 반드시 포함해야 한다. 또한, ESS 통합제어·보호 체계 미흡 또한 화재의 원인이 될 수 있기 때문에 BMS와 EMS의 협조체계가 원활하게 이루어져야 한다[10]. 따라서

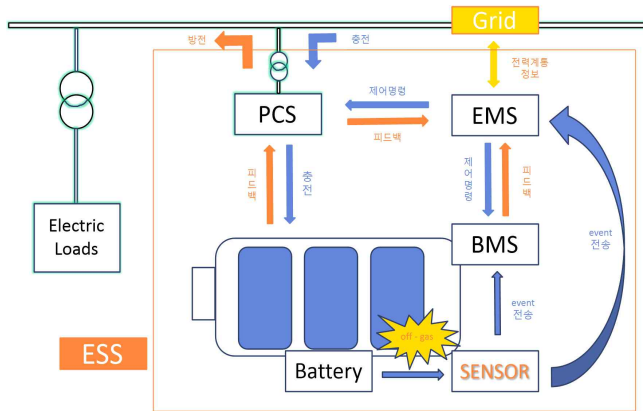
BMS 시스템의 한계점을 극복하고 보완할 수 있는 화재감시 시스템을 제안한다.

3.2 Off-gas 센서를 이용한 화재감시시스템

적용방안

화재폭발 위험성이 상시 내재되어 있는 ESS의 주요 사고 원인은 BMS가 전압, 전류, 온도를 측정하여 배터리 셀이 정상 운전 범위에서 사용되도록 하는 감시 및 제어의 실패가 화재로 이어져 막대한 재산피해를 발생시킨다. ESS의 화재 사고를 예방하기 위해서는 BMS의 한계점을 극복하고 신뢰성을 향상시킬 수 있는 화재감시시스템이 필요하다[11].

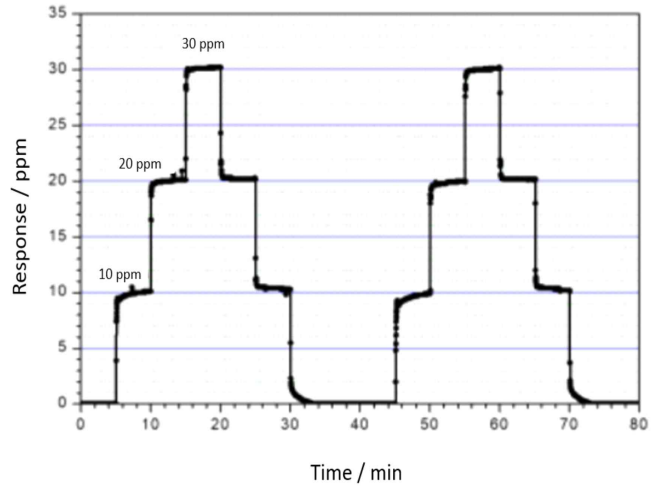
이에 본 논문에서는 ESS의 리튬이온배터리가 열화, 품질 불량, 스트레스 등으로 인해 내부 온도가 증가하게 되면 구성물질의 기화로 내부 압력이 증가하고, 배터리가 감당할 수 있는 압력을 벗어나게 되면 기계적으로 약한 부분이 터지거나 찢어지면서 내부 증기 및 Off-gas를 배출하게 되는데 이를 감지하여 Off-gas가 발생한 랙에 대한 정보를 BMS와 EMS에 전송하고 배터리 셀의 열 폭주 이전에 전원을 차단하여 화재를 예방할 수 있는 감시시스템을 제안한다.



[그림 3] ESS 화재감시시스템의 구성도

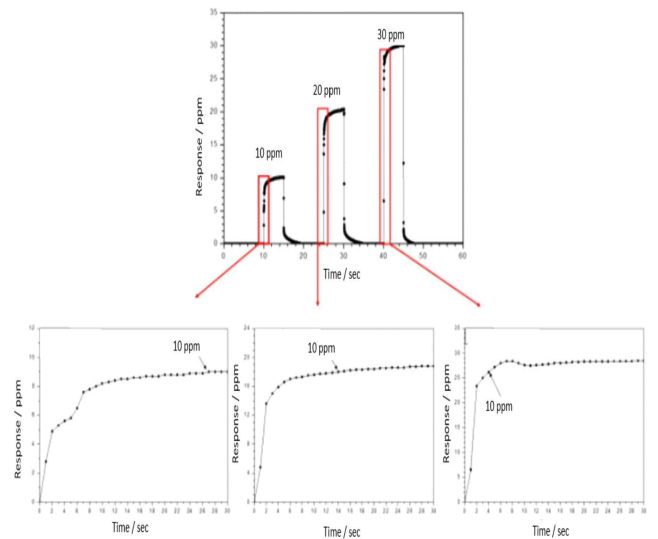
4. 시험 및 결과분석

본 논문에서 제시한 ESS 화재감시시스템을 이용하여 표준 i-C4H8 가스를 사용하고 Off-gas 감도를 시험한 결과는 그림 4와 같다. 실제 ESS 모듈 내부에서 Off-gas가 발생할 경우 30ppm 정도의 작은 변화도 반응해야 한다. 따라서 (10~30) $\mu\text{mol/mol}$ 범위에서 표준 i-C4H8 가스를 300 ml/min의 유속으로 흘려 감응도를 시험한 결과 그림 4와 같이 각 농도에 대해 정확하게 반응하는 것을 확인하였다.



[그림 4] ESS 화재감시시스템을 이용한 Off-gas 감도 시험 결과

표준 i-C4H8 가스를 사용하여 Off-gas 반응속도를 시험한 결과는 그림 5와 같다. 실제 ESS 모듈 내부에서 Off-gas가 발생할 경우 리튬이온배터리가 열 폭주에 이르기 전 가능한 빠른 시간안에 배터리의 전원을 차단해야 한다. 따라서 (10~30) $\mu\text{mol/mol}$ 범위에서 표준 i-C4H8 가스를 300 ml/min의 유속으로 흘려 반응속도를 시험한 결과, 10ppm에서 0~14초, 20ppm에서는 0~10초, 30ppm은 0~5초의 반응속도가 나타남에 따라 농도가 올라갈수록 빠르게 반응함을 확인하였다.



[그림 5] ESS 화재감시시스템을 이용한 Off-gas 반응속도 시험 결과

시험결과를 분석하면 본 논문에서 제안한 ESS의 안전성 향상을 위한 화재감시시스템이 Off-gas를 감지하여 발생한 랙에 대한 정보를 BMS와 EMS에 전송하고, 배터리 셀의 열 폭주 이전에 전원을 차단하여 화재를 예방할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

참고문헌

화재 위험성이 상시 내재되어 있는 ESS의 화재 사고는 해마다 증가하고 있으며 BMS 오류가 주요 원인으로 밝혀지고 있다. ESS에서 발생하는 화재 사고를 예방하기 위해서는 기존 화재감시시스템의 한계점을 극복하고 신뢰성을 향상시킬 수 있는 첨단 화재감시시스템이 필요하다.

이에 본 논문에서는 ESS의 화재를 조기에 감지하기 위하여 ESS의 리튬이온배터리가 열화, 품질 불량, 스트레스 등으로 인해 내부 온도가 증가하게 되면 구성물질의 기화로 인해 내부 압력이 증가하고, 배터리가 감당할 수 있는 압력을 벗어나게 되면 기계적으로 약한 부분이 터지거나 찢어지면서 Off-gas를 배출하게 된다. 이를 감지하여 화재가 발생한 랙에 대한 정보를 BMS와 EMS에 각각 전송하고 배터리 셀의 열 폭주 전에 전원을 차단하여 화재를 예방할 수 있는 감시시스템을 제안한다. 또한, 제안한 ESS 화재감시시스템의 Off-gas 감지 센서를 이용하여 Off-gas의 각 농도에 대한 반응의 정확성과 속도를 시험한 결과, 보다 정확한 화재감지가 가능하고 BMS의 한계점을 개선하여 ESS의 안전성과 신뢰성이 향상되어 유용함을 확인하였다. 또한 본 연구의 ESS 화재감시시스템을 다른 분야에 적용한다면 화재발생 전 사전징후를 감지하여 예방하는 기술발전에 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구 결과입니다(NTIS 과제번호. 1345356198).

- [1] 유연태, 남기범, 노일래, “ESS 화재 및 고장 예방을 위한 ESS 보호장치 및 신호저장장치 개발에 대한 연구”, 조명·전기설비학회 논문집, p.8, 2020.11
- [2] 산업통상자원부, ESS 화재사고 원인조사 결과, 2019.06
- [3] 소방청, 에너지저장장치(ESS) 화재 대응지침, 2019.03
- [4] 황소연, 최성문, 노대석, “ESS용 리튬이온전지의 열 폭주 방지용 Off-gas 검출 알고리즘에 관한 연구”, 2022.12
- [5] 행정안전부, 에너지저장장치 화재예방을 위한 리튬이온배터리용 Off-gas 감지장치 개발, p.1-4, 2021.01(참고문헌 사용 가능한 파일인지 피드백)
- [6] 이후동, 태동현, 강환석, “소방시스템 적용을 위한 ESS 저장실의 화재 메커니즘에 관한 연구”, 대한전기학회 학술대회, p.149-150, 2021.04
- [7] 이용선, “EES 화재예방을 위한 안전관리시스템 개선 연구”, 명지대학교 박사학위 논문, p.1-6, 2022.02
- [8] 송용선, “ESS 차량 화재진압방안에 관한 연구”, 목원대학교 석사학위 논문, p.28-31, 2021.06
- [9] 강줄기, 김환욱, 임홍우, “에너지저장장치(ESS)의 화재 및 열 폭주 억제 기술에 대한 연구”, 조명·전기설비학회 논문집, p.62, 2022.11
- [10] 박상호, 강줄기, 김환욱, “리튬이차전지 기반 에너지저장장치(ESS)의 화재와 열 폭주 억제 기술에 대한 고찰”, 조명·전기설비학회 논문지, p.27-34, 2022.06
- [11] 송정원, “ESS(전기저장장치) 전기화재 원인, 대책 및 안전관리 가이드 분석”, 산업기술연구논문지, p.29-35, 2021.10